РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН

ДАГЕСТАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО НЕТРАДИЦИОННЫМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ ИСТОЧНИКАМ ЭНЕРГИИ ОЭММПУ РАН

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы»

Выпуск 6

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Материалы X Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна

ТОМ 1

Махачкала 2017

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ОТДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН

ДАГЕСТАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РАН

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО НЕТРАДИЦИОННЫМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМ ИСТОЧНИКАМ ЭНЕРГИИ ОЭММПУ РАН

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы»

Выпуск 6

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Материалы X Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна

ТОМ 1

Махачкала 2017

При поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований Грант № 17-08-20547

ББК 31.4 + 31.6
УДК 620.91 + 620.92

Печатается по решению Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН

Редакционно-издательский совет:
д.т.н. Алхасов А. Б., д.т.н. Попель О. С., д.т.н. Баранов Д. А.
д.т.н. Кобзаренко Д. Н., к.х.н. Рамазанов О. М., к.ф.-м.н. Ниналалов С. А.

Рецензенты:
Берегартен М. Г. – заместитель директора Института инженерной экологии и химического машиностроения Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), профессор.
Ашурбеков Н. А. – проректор Дагестанского государственного университета, профессор.

Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов // Материалы V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и X школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени чл.-корр. РАН Э. Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под. ред. д.т.н. Алхасова А. Б. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. – 358 с.

В материалах научных форумов «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» опубликованы обзорные доклады ведущих специалистов, а также доклады и выступления молодых ученых, в том числе аспирантов, по различным проблемам освоения возобновляемых источников энергии.

Для научных работников, педагогов, молодых специалистов, аспирантов и студентов энергетических специальностей.

ISSN 2313-5743

© Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 2017
© Коллектив авторов, 2017

От редактора

ПРЕДИСЛОВИЕ

Организация и проведение крупных академических форумов, посвященных фундаментальным задачам возобновляемой энергетики, на базе Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН стало хорошей традицией. Место для смотра достижений в исследованиях возобновляемой, в том числе геотермальной энергетики, выбрано не случайно: Институт проблем геотермии – единственное научное учреждение в системе Российской Академии наук, непосредственно занимающееся теоретическими и экспериментальными исследованиями в области геотермальной энергетики.

Институт проблем геотермии, учрежденный в 1980 году, за прошедшее время сформировался в научную организацию, где трудится около 100 работников, в том числе 22 доктора наук, 20 кандидатов наук. Институт успешно решает на современном уровне фундаментальные и практические задачи геотермальной энергетики, механики, теплофизики, термодинамики, прикладной математики, геофизики, гидрогеологии и физхимии термальных вод.

В организации V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», которая будет работать с 23 по 26 октября, приняли участие Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (ОЭММПУ РАН), Объединенный институт высоких температур РАН, Научный совет по нетрадиционным ВИЭ ОЭММПУ РАН, Технологическая платформа «Перспективные технологии возобновляемой энергетики», Институт проблем геотермии ДНЦ РАН.

В рамках Конференции будет проведена X школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени член-корреспондента РАН Эвальда Эмильевича Шпильрайна (1926-2009 г.г.).

Сборник материалов Конференции и Школы молодых ученых состоит из 2-х томов, которые включают 120 докладов. В работе научного форума принимают участие ученые и специалисты из ведущих российских и зарубежных научных и образовательных центров, в том числе из Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска, Самары, Ростова-на-Дону, Баку и др.

Основными направлениями работы научного форума являются анализ современного состояния, прогноз перспективных направлений и разработка современных научных технологий ВИЭ в России и за рубежом. Обзорные доклады и лекции ведущих ученых и специалистов, выступления молодых ученых, в том числе аспирантов, студентов посвящены актуальным теоретическим и прикладным проблемам, прежде всего геотермальной энергии в сочетании с солнечной энергией, энергией ветра, а также места ВИЭ в топливо-энергетическом балансе страны и регионов.

Алхасов А. Б.

ДОКЛАДЫ ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

ГИБРИДНЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Попель О.С., Тарасенко А.Б.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).
125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2. O_Popel@oivtran.ru

Рассмотрены различные аспекты создания и практического применения гибридных (объединяющих в единой системе различные технологии и устройства аккумулирования энергии) накопителей энергии в транспортной, традиционной и возобновляемой энергетике. Показано, что появление новых типов аккумуляторов энергии и расширение спектра их эксплуатационных характеристик открыло благоприятные возможности для комбинирования различных видов накопителей и создания гибридных систем, что обеспечивает возможность улучшения массогабаритных характеристик накопителей энергии и существенной экономии средств на их эксплуатацию. При этом выполненный обзор разработок показал отсутствие в данной области универсальных технических решений, что определяет необходимость расширении исследований в этом перспективном направлении.

Введение. Использование электричества как наиболее удобного, эффективного и широко применяемого в различных секторах экономики и в быту энергоносителя в отличие от других промежуточных энергоносителей, энергия которых запасается в химической или других формах, требует в каждый момент времени строгого равенства подведенной к потребителю и потребляемой им электрической мощности. Это ставит задачу разработки методов и средств оптимального управления производством, транспортом, распределением и потреблением электроэнергии и применения соответствующих интеллектуальных систем. При этом в условиях переменных графиков нагрузки многих типов потребителей, а также в случае использования возобновляемых источников энергии, характеризующихся нестабильной генерацией энергии (прежде всего, солнечные и ветровые установки), требуется использование эффективных накопителей электрической энергии. Аккумуляторы энергии необходимы также для создания систем аварийного, резервного и бесперебойного электропитания потребителей.

В настоящее время в энергетике используется широкий спектр энергоаккумулирующих устройств. Лидерами по масштабам аккумулируемой энергии (десятки и сотни МВт-ч) и мощности (десятки и сотни МВт) являются гидроаккумулирующие станции (PSH), применяемые в централизованной энергетике в сочетании с маломаневренными атомными и тепловыми электростанциями на органическом топливе. Большой практический интерес представляют накопители энергии и других типов, отличающихся принципом работы, ресурсными характеристиками, кпд, характерными временами и токами разряда/заряда, удельной мощностью и энергоемкостью, стоимостью, нишами эффективного применения в централизованной и автономной энергетике и другими параметрами.

Пимимо гидроаккумулирования в энергетике находят применение современные разработки аккумуляторов энергии на сжатом воздухе (CAES), различные технологии электрохимического аккумулирования энергии (свинцово-кислотные, никель-

кадмиевые, литий-ионные, натрий-серные и другие аккумуляторы, суперконденсаторы, проточные батареи, водородные накопители), маховики, сверхпроводниковые индуктивные накопители и др. [1,2].

Долгое время свинцово-кислотные аккумуляторы были единственным используемым на практике типом электрохимических накопителей энергии, однако со второй половины XX века появляются и бурно развиваются другие системы, как правило, более дорогие, но обладающие лучшими ресурсными показателями, более высокими рабочими токами и глубинами разряда, среди которых лидирующее положение занимают литий-ионные аккумуляторы [3], проточные редокс-батареи [4], суперконденсаторы [5] и др.

Появление новых типов аккумуляторов энергии и расширение спектра их эксплуатационных характеристик открыло благоприятные возможности для комбинирования различных видов накопителей и создания гибридных систем, что позволяет в ряде случаев достичь улучшения массогабаритных характеристик, придать системе аккумулирования новые свойства, недостижимые при использовании только одного вида накопителей, и существенной экономии средств на их эксплуатацию.

При этом под гибридным накопителем в отечественной и зарубежной литературе подразумеваются устройства как совмещающие несколько принципов аккумулирования в составе одного электрохимического элемента [6], так и объединяющие несколько накопителей различных видов в одну систему [7]. В данном обзоре рассматриваются преимущественно системы второго типа.

Целесообразность использования гибридных накопителей, как правило, определяется обусловливающими повышенные требования к ним особенностями графика электрической нагрузки потребителя и/или графика генерации энергии в автономных энергокомплексах, включающих в свой состав например солнечные или ветровые установки.

Гибридные накопители энергии на транспорте. Исторически гибридные накопители энергии впервые стали востребованными при разработках водородного и аккумуляторного электрического транспорта. Оказалось, что создать приемлемую по массогабаритным характеристикам транспортную энергоустановку на основе только свинцово-кислотных аккумуляторов, имеющих жесткие ограничения по глубине и току разряда, практически невозможно. В частности, свинцово-кислотные аккумуляторы характеризуются существенными ограничениями по току, что не позволяет обеспечить требуемые разгонные характеристики транспортного средства, а также необходимую для снижения энергозатрат рекуперацию энергии при торможении. Энергетические и стоимостные характеристики некоторых современных электрохимических устройств, используемых в транспортной и стационарной энергетике, приведены в таблице 1. Представленные в ней данные по рекомендуемым рабочим токам для различных видов электрохимических накопителей энергии выражены в единицах номинальной энергоемкости аккумулятора в Ач (C – номинальная энергоемкость в Ач при разряде в течение 1 часа).

Наиболее эффективным решением во многих случаях оказалось применение гибридных силовых установок, в которых мощностные характеристики обеспечивает суперконденсатор, имеющий высокую удельную мощность, а длительность пробега – аккумуляторная батарея [8].

С появлением новых типов аккумуляторов (никель-кадмиевые, литий-ионные), несмотря на их лучшие, чем у свинцово-кислотных, мощностные характеристики, тенденция к сохранению суперконденсатора в составе силовой установки электрического транспортного средства сохранилась. Дело в том, что для этих электрохимических систем переразмеривание аккумуляторной батареи по соображениям обеспечения приема и выдачи необходимой мощности ведет к недопустимому росту не только массогаба-

ритных характеристик (менее существенным, чем у свинцово-кислотных аккумуляторов), но и цены силовой установки [9].

Следует отметить, что комбинация суперконденсатора с аккумулятором применяется также и в гибридных транспортных средствах, снабженных двигателем внутреннего сгорания [10]. Суперконденсатор выполняет ту же роль пикового источника мощности, что позволяет уменьшить мощность и объем двигателя, сократить количество вредных выбросов и расход топлива.

Похожая ситуация складывается и с водородными электротранспортными средствами. Топливные элементы, используемые в такой технике, оказываются также достаточно чувствительными к высоким токам, прежде всего с точки зрения снижения коэффициента полезного использования топлива и срока службы, являющегося одним из проблемных аспектов их применения [12]. Это побуждает создавать комбинированные установки из топливных элементов с аккумуляторами и/или суперконденсаторами [13]. При этом батарея топливных элементов работает в базовом режиме нагрузки, и при использовании баллонов высокого давления в качестве системы хранения водорода способна существенно увеличить дальность пробега транспортного средства.

В ОИВТ РАН созданы прототипы электротранспортных средств на основе алюминий-воздушных топливных элементов, аккумуляторов и суперконденсаторов [14]. По замыслу авторов, такая комбинация химических источников тока обеспечивает максимально комфортный режим работы каждого из них, а алюминий-воздушный генератор позиционируется в качестве высокоэнергоемкой, но более безопасной альтернативы водороду при высоком давлении. Задачей алюминий-воздушных топливных элементов в данном случае является подзаряд аккумуляторов, а функции аккумуляторной и суперконденсаторной батареи совпадают с таковыми в классических электротранспортных средствах. Алюминий-воздушный электрохимический генератор в данной схеме получил название «экстендера» (от английского extend – расширять), что подчеркивает возможность существенного увеличения дальности пробега транспортного средства при добавлении такого устройства в систему. Авторами разработана методика выбора оптимальной энергоемкости и мощности каждого из элементов гибридной силовой установки на основе зависимости потребляемой электродвигателем мощности от времени в рамках типового городского цикла движения транспортного средства [15].

В работе [16] рассматривается возможность использования технологий автомобильной промышленности, активно развивающей гибридные системы энергоснабжения, на случай магистральных дизель-электрических тепловозов. При этом авторы отмечают, что прямой перенос автомобильных подходов на железнодорожный транспорт затруднен из-за различия режимов работы энергоустановок и характерных ограничений. В настоящее время идет активное внедрение гибридных схем с суперконденсаторами, маховиками и топливными элементами, прежде всего для маневровых тепловозов и дизель-поездов, поскольку они используются в пределах городов в резко переменных режимах движения и являются серьезными загрязнителями окружающей среды. Не последнюю роль в мотивации таких исследований и разработок играет и постоянный рост цен на органическое топливо, которое в «рваных» режимах движения расходуется малоэффективно. В указанной работе рассматривается связка из трех локомотивов. Средний из них, работающий преимущественно при движении на подъем, в отличие от двух других оснащен маховиком вместо дизель-электрической установки.

Таблица 1.

Характеристики некоторых аккумуляторов для стационарных и транспортных накопителей электрической энергии [16]

Марка аккумулятора	Технология	Энергоемкость единичного элемента, Ач	Рабочее напряжение, В	Предельный рабочий ток, С	Удельная стоимость, долл./Втч	Допустимая глубина разряда, %	Срок службы, лет	Ресурс при допустимой глубине разряда, циклов	Источник данных
Свинцово-кислотные аккумуляторы									
EnerSys VRLA 40 Ah	AGM, свинцово-кислотный	40	12	10	0,3	50	3	500	ЗАО «БПЦ»
Никель-кадмиевые аккумуляторы									
KGL 160P,	NiCd, никель-кадмий	160	1,2	6	0,36	100	3	600?	ЗАИТ-СПб, Valgen.ru
Литий-ионные аккумуляторы									
Sinopoly SP LFP 40-AHA	LFP, литий-железо-фосфатный	40	3,2	3	0,5 - 0,9	80	8	2000	Aliexpress, Sinopoly.ru
Kokam 70 Ah	LCO, литий-кобальтатный	70	3,7	5	3,3	80	10	4000	ООО «Альфа-Плюс»
XALT Energy 40 HP	NMC, литированные смешанные оксиды	40	3,7	17,6	3,5	80	10	8000	Xalt Energy
Tiankang	LTO, Литированный нанотитанат	16	2,4	5	4,5	90	12	10000	ООО «Альфа-Плюс»
Суперконденсаторы									
TEEMP 3000 F	SC, отечественный суперконденсатор с органическим электролитом	1,1	2,7	680	25	100	10	100000	ООО «ТЭЭМП»
LSMtron 16 V 500 F	Зарубежный суперконденсатор с органическим электролитом	1,3	12	1692	45	100	10	1000000	Российский дистрибьютор

Оптимизация алгоритма работы двух дизель-электрических установок и маховичного накопителя для различных характерных режимов разгона и торможения проводилась по критерию минимизации потребления топлива путем регулирования напряжения на общей шине постоянного тока. Зарядно-разрядное устройство маховика начинает его раскрутку с накоплением энергии при напряжениях, несколько меньших тех, при которых срабатывают резисторы динамического торможения локомотива, что обеспечивает включение резисторов после полной зарядки маховичного накопителя. При разгоне приоритет отдается отбору энергии от маховичного накопителя.

Оптимизации бортового гибридного накопителя для дизельных тепловозов посвящена также работа [17]. Основная цель разработки – снизить уровень выбросов и потребление топлива дизельными локомотивами. В работе описаны модели построения систем энергоснабжения пригородного дизель-поезда, магистрального и маневрового локомотивов с использованием широкого круга накопителей энергии, включая маховики, сжатый воздух, гидростатические аккумуляторы, электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы. По результатам моделирования сделан вывод о перспективности использования в гибридных системах энергоснабжения литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов.

Стационарные применения гибридных накопителей. Гибридные накопители энергии находят все более широкое применение и при создании наземных портативных и стационарных источников энергоснабжения. Примером комбинации из топливных элементов и аккумуляторов является семейство источников электропитания немецкой компании SFC (Smart Fuel Cells). В состав устройства, предназначенного для зарядки аккумуляторных батарей в полевых условиях, входят аккумуляторные батареи и метанольные топливные элементы, обеспечивающие гарантированность электропитания при глубоком разряде батарей. Одна из версий такого устройства (рис. 1) предназначена для питания осветительных устройств и снабжена солнечной батареей, обеспечивающей заряд аккумулятора, при этом метанольные топливные элементы остаются гарантирующим источником питания при длительных периодах бессолнечных дней [18].

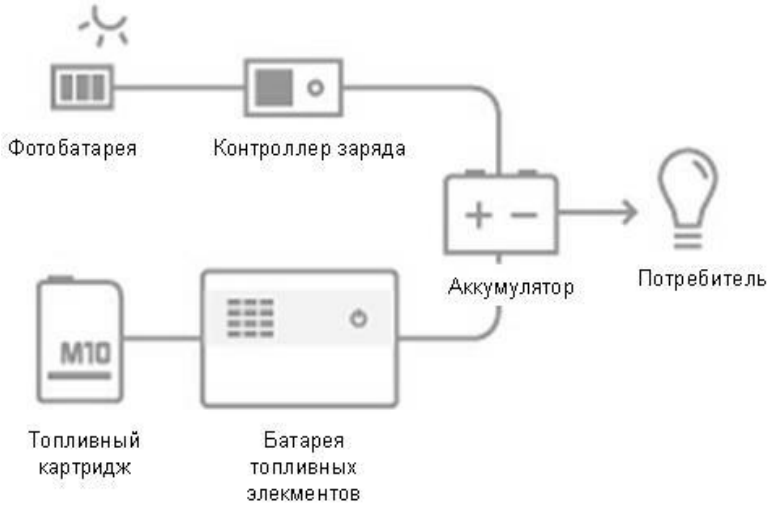


Рис. 1. Гибридный источник энергоснабжения SFC

Следует отметить, что в приведенном примере метанольный топливный элемент является не накопителем энергии, а ее первичным источником, но известен достаточно широкий круг работ, где вместо метанольных топливных элементов используются электрохимические генераторы с водород-воздушными или водород-кислородными топливными элементами дополненные электролизером и системой хранения водорода [19]. Такие установки используются как в возобновляемой энергетике [20], так и в источниках аварийного, резервного и

бесперебойного питания [21]. При этом практически всегда электрохимические генераторы дополняются аккумуляторной [22] или суперконденсаторной батареей [23].

В работе [24] показано, что в случае использования нестабильных возобновляемых источников энергии использование водородного цикла без дополнительных накопителей энергии ведет к ускоренному расходованию ресурса топливных элементов, а периодическая замена этого дорогостоящего компонента ухудшает экономические показатели эксплуатации установки в целом. Поэтому логичным представляется включить в схему более дешевую аккумуляторную батарею для поддержки потребителя в короткие периоды отсутствия первичных источников и накапливать водород в периоды их избыточной генерации для выдачи мощности при разряженной аккумуляторной батарее. В этом случае общая годовая наработка электрохимического генератора уменьшается, что позволяет продлить межремонтный период. Другая причина включения в состав системы энергоснабжения вторичного источника тока типа аккумуляторной или суперконденсаторной батареи в системах с электрохимическими генераторами, обусловлена тем, что часто время запуска самого генератора оказывается больше, чем время срабатывания заряженной батареи аккумуляторов или суперконденсаторов. Время требуется для подачи реагентов в батарею и выхода ее на режим, что в случае наличия необходимости быстрого подхвата нагрузки приводит к падению напряжения на стороне потребителя или даже к перерыву в его питании. В данном варианте аккумуляторная или суперконденсаторная батарея выполняет роль буферного накопителя энергии и в большинстве случаев обеспечивает и собственные нужды электрохимического генератора во время запуска.

Использование водородного цикла наряду с достоинствами (высокая плотность энергии при компримировании водорода, дешевизна системы хранения газов относительно любого типа аккумуляторных батарей [25], экологичность) имеет и существенные недостатки. К ним относятся уже упоминавшийся малый ресурс у большинства модификаций системы, высокая стоимость электрохимических генераторов и батарей топливных элементов, вопросы техники безопасности при хранении водорода при высоком давлении, а также низкий кпд водородного цикла в целом с учетом затрат на электролиз воды, компримирование водорода, а также на работу системы возврата воды и/или ее восполнения.

Одной из альтернатив водородному циклу в нише длительного хранения энергии являются проточные редокс-батареи, построенные на различных па́рах химических элементов [4], но по принципу работы и конструктивно-технологическому исполнению весьма близкие к топливным элементам с твердым полимерным электролитом. Проточные редокс-батареи, как правило, характеризуются более высоким кпд аккумулирования энергии, система становится более простой и дешевой в результате отказа от ряда периферийных модулей (не требуются деионизованная или дистиллированная вода и компримирование рабочего тела), существенно увеличивается срок службы в результате использования замкнутой по реагентам схемы (нет внешних источников примесей, которые могли бы попасть в электролит и на электроды). Однако проблема малой плотности токов остается и даже усугубляется в этих системах по сравнению с топливными элементами. Основные причины состоят в отказе от платиновых катализаторов на электродах с целью снижения стоимости и увеличения срока службы и в необходимости использования достаточно толстых мембран-сепараторов, разделяющих положительный и отрицательный электроды для подавления паразитного транспорта молекул, а не ионов реагентов через сепаратор. Характерное время реакции такого накопителя на изменение нагрузки или питающей мощности целиком связано с изменением объемного расхода насосами.

Проблема регулирования работы мощных ветроэлектрических станций, подключенных к сети, имеет большое значение для энергетики ряда стран с бурно развивающейся ветроэнергетикой, поскольку ветровая энергия характеризуется наибольшей изменчивостью во времени среди всех возобновляемых источников энергии. При этом применение на таких

станциях мощностью в десятки и даже сотни МВт традиционных электрохимических аккумуляторов большой мощности и энергоемкости сопряжено с технологическими и экономическими проблемами. В этой связи анализируются альтернативные электрохимическим способы аккумулирования энергии. Например, в работе [26] рассматривается создание в составе ветропарка так называемого «адиабатического» накопителя энергии со сжатым воздухом в комбинации с маховиковым накопителем. «Адиабатический» режим работы аккумулятора на сжатом воздухе реализуется посредством отбора тепла от компрессора при сжатии воздуха, аккумулирования тепла в масляном тепловом аккумуляторе и подогрева направляемого в турбину воздуха через теплообменник с масляной рубашкой. В работе отмечается возможность частичной компенсации высокочастотных колебаний скорости ветра за счет инерции ротора ветроэлектрогенератора. Оптимизация подбора параметров двух типов применяемых накопителей энергии, входящих в данную гибридную систему, осуществляется посредством анализа временной зависимости выходной мощности ветроэлектрогенератора на основе двойного преобразования Фурье с выделением высоко- и низкочастотных составляющих. Высокочастотные различия в генерации и потреблении энергии компенсируются за счет маховика, а низкочастотные – за счет накопителя на сжатом воздухе. Выполненный в работе теоретический анализ показал, что, несмотря на обеспечение существенного сглаживания зависимости мощности от времени, мелкие флуктуации полностью сбалансировать не удается, что связано с малой энергоемкостью маховика и большой тепловой инерцией накопителя на сжатом воздухе. В работе [27] накопитель на основе сжатого воздуха комбинируется с системой ожижения воздуха. Основная мотивация связана с тем, что хранение жидкого воздуха в цистернах требует меньших финансовых затрат и более дешевых материалов по сравнению с использованием сосудов высокого давления для сжатого воздуха. Пилотный проект накопителя на основе сжиженного воздуха в Великобритании описан в работе [28], при этом достигнутое значение коэффициента рекуперации энергии составило 12% с перспективой роста, по утверждению авторов, до 60%.

Оригинальное решение по созданию эффективных гибридных накопителей энергии с использованием сжатого воздуха предложено специалистами ОИВТ РАН в работе [29]. Водород-воздушная система аккумулирования позволяет обеспечить сочетание положительных качеств как воздухоаккумулирующих так и водородных систем аккумулирования при одновременной компенсации их основных недостатков [30].

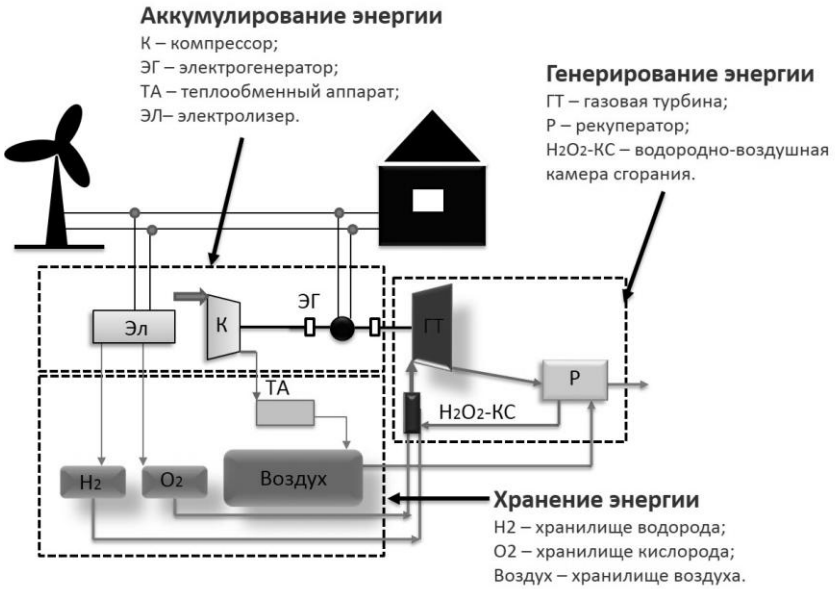


Рис. 2. Водородно-воздушная система аккумулирования энергии

Важным преимуществом предложенной системы является то, что ликвидируется основной недостаток воздухоаккумулирующих систем, связанный с необходимостью использования даже в «адиабатических» вариантах дополнительного топлива для подогрева воздуха перед турбиной. Принцип работы водород-воздушной газотурбинной системы аккумулирования, упрощенная схема которой представлена на рис 2, заключается в следующем. Во время «провального» энергопотребления, аккумулирование происходит по двум направлениям. Первый – получением водорода и кислорода методом электролиза воды с последующим закачиванием их в хранилища. В случае использования электролизера высокого давления дожимной компрессор для водорода и кислорода может либо не понадобиться вовсе, либо потребуется компрессор с небольшой степенью повышения давления. Второй – путем сжатия воздуха компрессорами. Компрессорная группа может состоять из нескольких компрессоров среднего и высокого давления либо одного осевого компрессора с промежуточными отводами тепла. Отведенное при сжатии воздуха тепло может быть направлено в тепловой аккумулятор, либо использоваться напрямую для нужд теплоснабжения. Охлажденный воздух после компрессоров поступает в хранилище. В режиме выработки электроэнергии воздух из хранилища вначале поступает в регенератор, где происходит его подогрев выхлопными газами газовой турбины до температуры 200…350 °С. Далее воздух поступает в H_2/O_2-камеру сгорания, где за счет теплоты сгорания водорода в кислороде происходит его нагрев до 850…950 °С. В H_2/O_2-камере сгорания осуществляется предварительное сжигание водорода в кислороде с последующим смешением полученного высокотемпературного водяного пара с воздухом, в результате чего происходит его нагрев до требуемой температуры. Следует отметить, что в ОИВТ РАН разработаны, созданы и испытаны водородосжигающие установки тепловой мощностью от 100 кВт до 25 МВт [31-33], разработаны конструкции смесительных элементов H_2/O_2-парогенератора тепловой мощностью до 25 МВт, обеспечивающие повышение эффективности процессов генерации пара [34], разработаны и испытаны автоматическая система управления H_2/O_2-парогенератором тепловой мощностью до 200 кВт и водородно-кислородная паротурбинная энергоустановка с мощностью на валу до 5 МВт и временем запуска менее 15 секунд.

Анализ комбинированной системы накопления энергии на основе электрохимических аккумуляторов и водородного цикла выполнен в работе [35]. Особое внимание уделено потерям в электротехнических преобразователях. Стратегия управления накопителем в данной системе, включающей в качестве первичных источников энергии помимо солнечной энергии также биомассу и ветер (солнечная батарея работает на шину постоянного тока, а ветроэлектрогенератор и газификатор с газотурбинной установкой – на шину переменного тока) сводится к использованию водородного цикла только в те моменты, когда свинцово-кислотная аккумуляторная батарея полностью заряжена или разряжена. Расчетно-аналитические исследования на основе адаптированного к энергетическим потокам метода пинч-анализа показали, что существенное влияние на величину мощности первичных источников энергии имеет эффективность и особенности работы выпрямителя, подающего питание на электролизер от шины переменного тока, а емкость накопителя водорода в основном определяется работой топливного элемента.

Оптимизация гибридного накопителя, содержащего водородный цикл, также рассмотрена в [36]. Для продления срока службы оборудования при параллельном соединении накопителя на основе аккумуляторных батарей и водородного цикла выбраны следующие уставки: электролизер включается при 75% уровне заряда аккумуляторных батарей, батарея топливных элементов – при 40%.

В работе [23] выполнено математическое и физическое моделирование гибридного накопителя на основе суперконденсаторных батарей и водородного цикла. Рассмотренный гибридный накопитель способен компенсировать как длительные периоды отсутствия возобновляемых источников энергии, так и реагировать на быстрые переходные процессы, вы-

званные особенностями нагрузки или первичного источника энергии. При этом ресурсные характеристики и кпд накопителя повышаются за счет использования суперконденсаторной батареи (батарея топливных элементов постоянно работает в режиме близком к оптимальному). Преимущество перед комбинацией водородного цикла с аккумуляторной батареей обеспечивается за счет лучших ресурсных показателей суперконденсаторов.

Требования сетевых компаний по регулированию выходной мощности крупных фотоэлектрических сетевых станций (ФЭС) также заставляют разработчиков переходить к применению гибридных накопителей. В [37] рассмотрены вопросы подбора оптимального состава и анализа экономической целесообразности гибридного накопителя для регулирования выработки крупной сетевой фотоэлектрической станции. Рассмотрена схема совместного использования проточных ванадиевых редокс-батарей и суперконденсаторных батарей. Схема накопителя – подключение обеих батарей параллельно ФЭС на общую шину переменного тока через инвертор-зарядные устройства (свои для каждого типа источников). Основная цель использования накопителя энергии – выполнение требований сетевого оператора по качеству и стабильности выдачи электроэнергии в сеть с учетом влияния станции на параметры сети. Важно отметить, что сетевые операторы требуют выдачи данных по прогнозируемой выработке всех подключенных к сети электрических станций установленной мощностью более 30 МВт на сутки вперед (как правило, с получасовым разрешением). Выбранная комбинация накопителей энергии позволяет компенсировать отклонения от прогнозной выработки электроэнергии ФЭС и обладает наилучшими ресурсными показателями среди всех химических источников тока, что положительно отражается на стоимости владения накопителем с учетом избежания негативных экономических последствий от ошибок прогноза. В указанной работе оптимизационные расчеты проводились на основе анализа месячного профиля производительности 30 МВт сетевой ФЭС. Проточная ванадиевая редокс-батарея использовалась для коррекции выработки мощности, выдаваемой в сеть, а суперконденсаторная батарея дополняла ее в диапазоне мощностей ниже 20% от номинальной мощности, так как согласно [38] в этой области наблюдается существенное падение кпд редокс-накопителя. В ходе моделирования работы станции было установлено, что оптимальная энергоемкость ванадиевого редокс-накопителя должна обеспечивать выдачу номинальной мощности в течение 35 минут, а оптимальная мощность батареи суперконденсаторов должна составлять около одной пятой от мощности редокс-батареи. При этом, учитывая выбранные ниши (участие в регулировании параметров сети) мощность имеет большее влияние на экономические показатели, чем энергоемкость. Установлено, что для условий австралийского рынка электроэнергии и климатических условий в месте расположения 30 МВт станции оптимальные параметры гибридного накопителя составят 3 МВт/1.25 МВтч для проточной ванадиевой редокс-батареи и 600 кВт/250 кВтч для суперконденсаторной батареи. Основным критерием оптимизации при этом служило получение максимальных доходов от оказания услуг на энергетическом рынке Австралии. Также было показано, что применение данного гибридного накопителя позволяет увеличить коэффициент использования установленной мощности фотоэлектрической станции, так как накопитель позволяет утилизировать не востребованную сетью в данный момент времени энергию.

Системы холодного запуска двигателей внутреннего сгорания. В России, в отличие от большинства развитых зарубежных стран, имеются большие территории с длительными периодами отрицательных температур. Это обстоятельство накладывает определенные особенности на использование различной техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания. Такие же проблемы имеют место и при запуске дизелей и ДВС на всех объектах РЖД, эксплуатируемых в северных регионах, в Сибири и Заполярье [39]. Эти же особенности затрудняют работу других видов техники в данных регионах, включая тягачи, автомобили, вертолеты, специальную колесную и гусеничную технику. При эксплуатации транспортных средств типичной является ситуация, в которой аккумуляторная батарея имеет неполный заряд, темпера-

тура окружающей среды ниже 0 °С, и необходим запуск двигателя, который без внешнего источника тепла или электроэнергии в данных условиях заканчивается неудачей [40].

Нами выполнены измерения энергоемкости ряда коммерчески доступных химических источников тока при отрицательных температурах и заряде-разряде различной силой тока. Каждый из образцов на сутки помещался в климатическую камеру КХТ-450 М и выдерживался при заданной температуре, после чего с использованием анализатора химических источников тока АСК150.24.1750.1 проводились циклы заряда и разряда. Измерения были направлены на определение остаточной энергоемкости, определяемой как отношение отданной энергоемкости при заданной в климаткамере температуре к энергоемкости, измеренной при температурах, близких к комнатной. Некоторые результаты измерений представлены на рис. 3.

Климатические испытания показали, что только суперконденсаторы с органическим электролитом (кривые 1 и 2) сохраняют практически номинальную энергоемкость, кпд и мощность в широком диапазоне отрицательных температур. У других типов испытанных электрохимических аккумуляторов остаточная емкость резко снижается в зоне отрицательных температур, а также с возрастанием тока разряда.

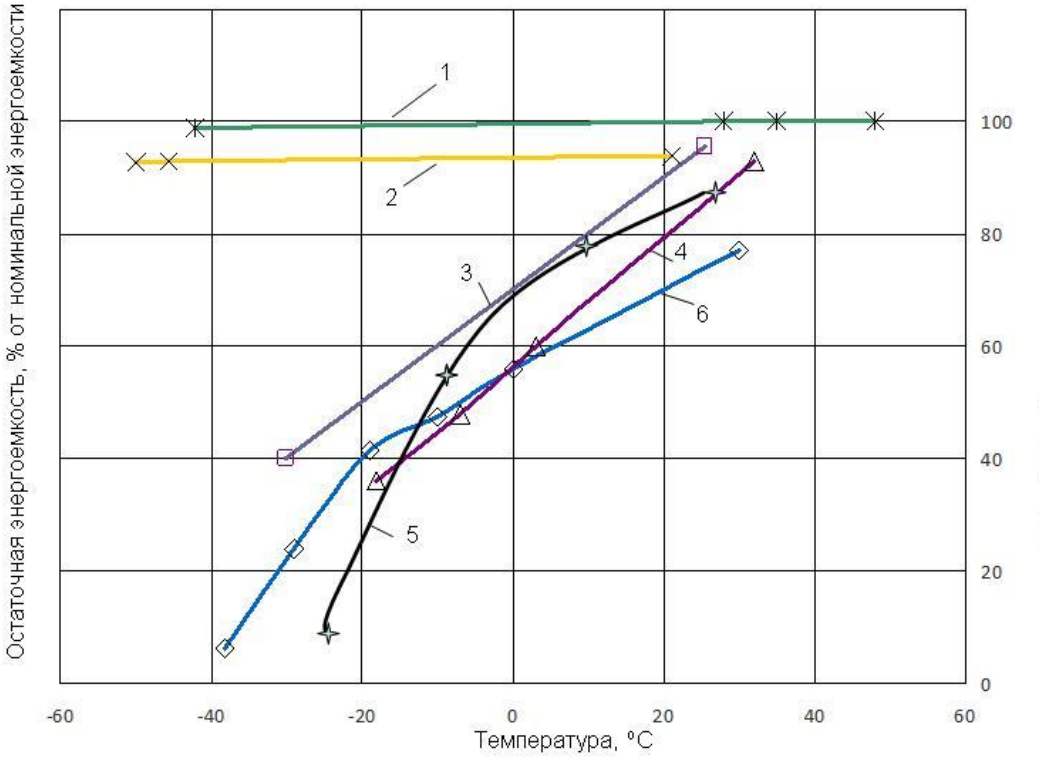


Рис. 3. Результаты измерений остаточной ёмкости некоторых химических источников тока при отрицательных температурах и различных значениях тока заряда-разряда (данные авторов).

1 – суперконденсатор TPS-16-500, ток 105 С,
2 – суперконденсатор LSMtron 500 F 16 V, ток 105 С;
3 – Литий-ионный железо-фосфатный аккумулятор Sinopoly 200 AHA, ток 0,05 С;
4 – Литий-ионный железо-фосфатный аккумулятор Sinopoly 200 AHA, ток 0,5 С;
5 – Литий-ионный титанатный аккумулятор Tiankang 16 Ah, ток 0.25 С;
6 – Никель-кадмиевый аккумулятор Ni-Cd KGL 200 P, ток 0,2 С.

В данной ситуации оптимальный алгоритм запуска двигателя должен быть построен следующим образом: аккумуляторная батарея малым током обеспечивает зарядку суперкон-

денсаторной батареи (при этом из-за малой энергоемкости суперконденсаторов данный процесс не займет много времени), а последняя высокой мощностью обеспечивает запуск двигателя. Подобные устройства могут находиться как на самом объекте (при этом подразумевается максимальный заряд аккумуляторной батареи при работающем двигателе, сбросное тепло которого способно также обеспечить ее плюсовую температуру), так и вне его, что позволяет предварительно осуществить заряд аккумуляторной батареи в теплом помещении без существенных потерь энергии.

Возникает естественный вопрос о целесообразности использования в данной системе аккумуляторов вообще. На самом деле, если энергоемкость аккумулятора, в отличие от суперконденсатора, при понижении температуры претерпевает существенное падение, то не следует ли отказаться от этого компонента? Ответ на этот вопрос связан с необходимостью обеспечить надежный пуск двигателя и соотношением удельной стоимости энергии, запасаемой в аккумуляторах и суперконденсаторах (см. табл. 1). Для гарантированного пуска двигателя производители систем предполагают от 3 до 5 актов подачи напряжения на обмотки стартера, то есть суперконденсаторная батарея должна иметь существенный запас энергии, и это обстоятельство вкупе с удельной энергоемкостью и стоимостью суперконденсаторов и аккумуляторов, требует наличия в системе аккумуляторов. Вместе с тем, при наличии определенного прогресса в повышении удельных характеристик и снижения стоимости суперконденсаторов, в будущем такая ситуация представляется возможной. Для такого развития событий необходимы дополнительные исследования в области химии электролитов суперконденсаторов.

Во многих научных центрах в настоящее время ведутся работы по достижению устойчивой работы суперконденсаторов и аккумуляторов при отрицательных температурах. При этом основным направлением исследований является использование многокомпонентных электролитов. Основная цель этих работ – создание эффективных электрохимических накопителей для электрических самолетов, морской и специальной техники. Так в работе [41] исследуется зависимость проводимости различных электролитов и емкости лабораторных макетов суперконденсаторов от температуры. В качестве перспективных электролитов исследовались смеси ацетонитрила с метилформиатом, метилацетатом и 1,3-диоксаланом, ионогенной солью являлся тетрафторборат тетраметиламмония. Наиболее предпочтительным по результатам экспериментов оказалось использование смеси ацетонитрила с метилформиатом в качестве электролита. Такая комбинация позволяет получить минимальное среди всех опытов внутреннее сопротивление макетной ячейки при сравнимой емкости. Влияние температуры на работу коммерческих суперконденсаторов исследовалось также в работе [42]. Интерес к работе суперконденсаторов при пониженных температурах в данном случае был обусловлен возможностью их использования в электрических летательных аппаратах. Показано, что коммерческий суперконденсатор на основе ацетонитрила в качестве основного компонента электролита при минус 55 ^{0}C не способен осуществлять ни заряд, ни разряд – его внутреннее сопротивление оказалось в 10000 раз выше, чем при комнатной температуре. Поэтому был выбран тот же путь, что и в выше упомянутой работе – добавки в растворитель электролита метилацетата. Оптимальная доля добавки составила 25-35 об. % и позволила сдвинуть нижнюю границу диапазона рабочих температур с минус 40 ^{0}C до минус 55 ^{0}C. При этом устройство стабильно работало при температурах до плюс 60 ^{0}C и напряжении на элементе 2,7 В.

Преобразование избыточной электрической энергии в полезные продукты как аналог гибридного аккумулирования энергии

В последние годы обозначилось новое интересное направление исследований и разработок: преобразование избыточной электроэнергии, генерируемой с помощью энергоустановок на возобновляемых источниках энергии, которая не поглощается ни штатной нагрузкой, ни накопителем, имеющимся в составе установки, в другие полезные продукты. Такой под-

ход позволяет увеличить коэффициент использования установленной мощности относительно дорогих солнечных и ветровых станций и может быть применен в системах, где энергия либо является промежуточным продуктом, не выдаваемым потребителю, либо имеются потребности в каких-либо других продуктах (опреснительные установки, ко- и тригенерационные системы и т.д.).

Так, в работе [43] на примере анализа работы ветроустановки на автономного потребителя было показано, что вследствие несовпадения суточных и сезонных графиков выработки и потребления электроэнергии более половины выработанной ветроустановкой электроэнергии должно рассеиваться на балластном сопротивлении, которым обычно снабжается ветроустановка. Преобразование избыточно выработанной электроэнергии в тепло и его аккумулирование для горячего водоснабжения и отопления потребителя позволяет существенно улучшить технико-экономические показатели автономной системы энергоснабжения.

Для изучения различных вариантов преобразования энергии от энергоустановок на возобновляемых источниках в Университете г. Хемниц (ФРГ) создана стендовая база для тестирования комбинаций различных накопителей с возможностью преобразования энергии в тепло и водород [44]. На стенде имеется возможность физического моделирования гибридных систем накопления и преобразования энергии следующего состава: аккумуляторная батарея + преобразование в тепло, аккумуляторная батарея + преобразование в тепло и водород, аккумуляторная батарея + суперконденсаторная батарея, комбинация нескольких типов аккумуляторных батарей. Созданный стендовый комплекс используется и для моделирования переходных процессов как в стационарных, так и в транспортных энергетических установках.

Увеличение доли использования солнечной энергии в рамках активного жилого дома или целого поселка может быть достигнуто за счет использования избыточной выработки электроэнергии на нужды получения тепла или холода [45]. При этом возможно как прямое преобразование солнечной энергии в тепло, так и ее использование для электропитания тепловых насосов, что обеспечивает существенную экономию традиционных энергоресурсов в подобном поселке. При этом для территорий с большим потенциалом возобновляемых источников возможен полный отказ от использования ископаемых энергоресурсов [46]. В рамках популярной за рубежом в настоящее время концепции Power-to-Gas предлагается питание электролизера за счет избыточной выработки энергии с последующим использованием полученного водорода как топлива для автомобилей с топливными элементами или добавки в природный газ [47]. Похожая тенденция прослеживается также для крупных сетевых ветровых энергоустановок [48] и солнечных электростанций [49]. В последней работе рассматривается использование водорода как аккумулятора энергии ветра и солнца в те периоды, когда она не может быть выдана в сеть по техническим (избыточная генерация и провальное потребление) или экономическим причинам (недостаточно высокий тариф). Кроме того в качестве опции рассматривается вариант продажи выработанного водорода в качестве топлива для электротранспорта на топливных элементах. Для моделирования использовались часовые последовательности данных по выработке ВИЭ, сгенерированные на основе среднемесячных значений, согласно [50]. В результате показано, что при существующих ценах на закупку электрической энергии от ВИЭ и топливных элементов такие системы рентабельны только в местностях с высокими скоростями ветра. В этом случае из-за особенностей работы ветроустановки без производства водорода часть энергии должна быть попросту рассеяна в тепло в тех случаях, когда она не может быть воспринята сетью. То есть электролизер превращается в аналог балластного сопротивления, рассеивающего избыточную энергию в классическом варианте. Основная причина такого положения – высокие цены на электролизеры и топливные элементы. Критической для окупаемости большинства схем авторы называют цифру в 10 Евро/кг водорода при его продаже в качестве товарного продукта.

Различные системы (солнце, ветер и их комбинация) рассматриваются в работе [51] как первичные источники питания щелочного электролизера в составе автономной энергоуста-

новки в условиях Ирана. Показано, что наилучшей для данных климатических условий является именно комбинация солнечной и ветровой энергоустановок, поскольку в этом случае повышается надежность работы системы и существенно снижается стоимость каждого компонента (солнечной батареи и ветротурбины) за счет снижения пиковой мощности обоих. В статье также в качестве одного из аргументов за использование водорода в качестве промежуточного продукта для систем с ВИЭ указывается потеря части выработанной ветром избыточной энергии на балластных сопротивлениях, включенных в ветроустановку в качестве схемы защиты от разноса в отсутствие нагрузки на больших скоростях ветра. В качестве исходных данных для моделирования использовались реальные метеоданные, собранные за несколько лет.

Пресная вода является одним из наиболее ценных ресурсов XXI века. При этом целый ряд стран и островных территорий, испытывающих проблемы с водоснабжением, реализуют проекты опреснительных установок с использованием возобновляемых источников энергии. Часто такие системы строятся без использования накопителя, на основе комбинации возобновляемого источника и теплового двигателя [52]. Однако в ряде случаев используются различные системы аккумулирования энергии, включая водородный цикл [53]. В то же время расчеты показывают, что в такой системе наиболее целесообразно использовать избыточную мощность возобновляемых источников для производства запаса пресной воды, которая и является конечным продуктом таких установок [54]. В то же время накопитель энергии небольшой энергоемкости может применяться в составе установки для компенсации переходных процессов [55].

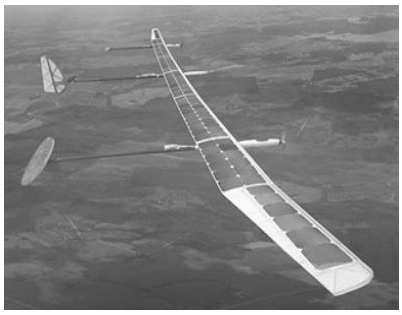
Наиболее распространенные схемы использования избыточной выработки энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии представлены на рис. 4.

Рис 4. Основные схемы утилизации избыточной выработки энергоустановок на возобновляемых источниках энергии

Интересный пример комбинации высокоемкой аккумуляторной батареи и полезного использования избыточной выработки солнечных батарей представляют современные прототипы высотных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В последние годы технический прогресс как в повышении кпд фотоэлектрических преобразователей, так и в увеличении удельной энергоемкости электрохимических накопителей энергии обеспечил возможность создания так называемых «атмосферных псевдо-спутников», способных длительное время (многими сутками) находиться в полете на больших заоблачных высотах (более 15 км), выполняя различные функции мониторинга окружающего пространства. На рис. 5 приведены фотографии наиболее известных БПЛА, разрабатываемых в Великобритании, Китае и России. На современном техническом уровне создание таких БПЛА оказывается возможным лишь при комбинированном использовании гравитационной энергии, запасаемой аппаратом при наборе высоты в светлое время суток, и химической энергии, запасаемой в электрохимических аккумуляторах.

БПЛА Zephyr (Airbus) – UK, совершивший наиболее длительный автономный полет в течение 340 ч [56]

Китайский солнечный БПЛА «Morning Star» [57]



Атмосферный спутник «Сова» - российский прототип солнечного высотного БПЛА [58]

Рис. 5. Атмосферные солнечные псевдо-спутники

В работе [59] выполнено математическое моделирование полета подобного БПЛА на высотах более 16 км с целью выбора оптимального алгоритма работы бортовой системы управления. Первый этап полета включает в себя набор высоты с одновременной зарядкой батарей (светлое время суток), второй – планирование со спуском до высоты 16 км, и третий – полет на 16 км с использованием запасенной в литий-серных аккумуляторах энергии. Авторы достаточно объективно оценивают недостатки литий-серных аккумуляторов с точки зрения ресурса и экономических показателей, однако для расчетно-аналитических исследований привлекательной является рекордно высокая удельная энергоемкость этой системы (достигнутая – 350 Втч/кг, предельная – до 2600 Втч/кг [60]). Подъем аппарата осуществляется в периоды, когда доступная мощность солнечной батареи превышает предельную мощность заряда аккумуляторной батареи. Выравнивание мощностей переводит летательный аппарат в горизонтальный полет, а при дальнейшем в зависимости от времени суток снижении мощности солнечной батареи прекращается заряд аккумулятора (оставшаяся мощность солнечной батареи, если не достигнута минимально допустимая высота полета все еще направляется на винт), и начинается снижение аппарата. Рассматриваемый аппарат имеет следующие параметры – масса 53 кг, из которых 16 приходится на батарею, размах крыльев 22,5 м, площадь солнечной батареи 20,25 м^2. Принятая схема управления энергоустановкой, как показывают расчеты, позволяет сохранить около 23% номинального заряда батареи для следующих суток полета. Полученный результат свидетельствует о возможности реализации длительных многосуточных полетов аппарата, а также указывает на возможность снижения массы аккумуляторов в составе энергоустановки при улучшении летно-технических характеристик, либо на замену литий-серных аккумуляторов на реально существующие литий-ионные с относительно небольшим снижением автономности подобного беспилотного летательного аппарата.

Схемы построения гибридных накопителей. Схемотехнические решения и алгоритмы управления имеют принципиальное значение для эффективной работы гибридных накопителей. Применяются схемы с общей шиной постоянного и переменного тока. При этом необходимо отметить, что разные типы накопителей, подключаемые к общей шине, имеют различные значения допустимых токов и диапазоны рабочих напряжений, что обычно требует использования согласующих электротехнических преобразователей в любой из схем, что приводит к удорожанию и усложнению системы в целом. Необходимо также учитывать, что особенности самих схемотехнических решений и графиков потребления энергии способны существенно повлиять на эффективность аккумулирования энергии.

Возможна коммутация нескольких типов накопителей на общую шину постоянного или переменного тока через отдельные преобразователи для каждого из накопителей (рис. 6, а,б). Выбор постоянного или переменного напряжения в общей шине обычно определяется

требованиями потребителя. Такая схема позволяет решать наиболее широкий круг задач и наиболее полно использовать возможности каждого из накопителей за счет различных алгоритмов управления преобразователями и различных уставок по токам и напряжениям заряда/разряда на каждом из них. При этом эта схема является самой дорогой и имеющей пониженный кпд, так как при передаче энергии между накопителями количество преобразований существенно увеличивается. Альтернативным вариантом является параллельное включение двух накопителей на общую шину постоянного тока без каких-либо преобразователей (рис. 6, в). Этот вариант является более экономичным, но его эффективность существенно зависит от подбора напряжений на батареях: именно соотношение рабочих и предельных напряжений батарей будет определять отдаваемые ток и мощность каждого из источников. При этом батарея с более узким диапазоном напряжений будет определять характеристики накопителя в целом. Поэтому наиболее распространенной является схема с рис. 6, г, где один из накопителей присоединяется к инвертору или потребителю напрямую (что позволяет поднять кпд), а второй – через согласующий преобразователь постоянного тока.

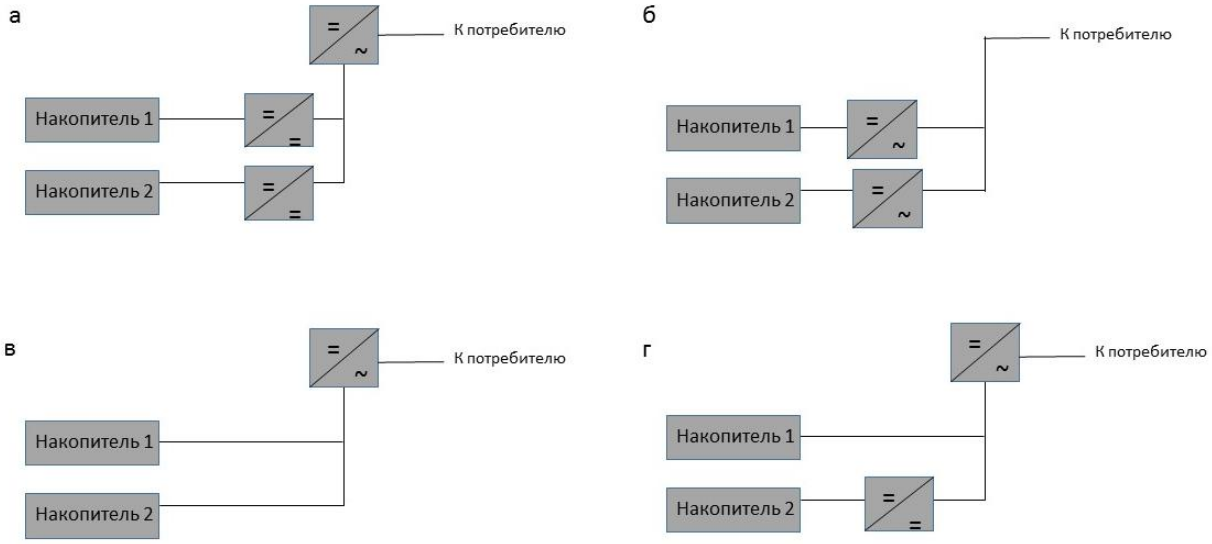


Рис. 6. Различные схемы коммутации накопителей энергии при создании гибридной системы

Обзор возможных схем построения гибридных накопителей, включающих несколько систем аккумулирования приведен в [61]. В статье рассмотрены:

- три основные схемы с параллельным соединением нескольких накопителей без каких-либо согласующих устройств (наиболее простая и дешевая схема, но не имеющая возможности полностью использовать особенности каждого типа накопителей),

- параллельное соединение по шине постоянного тока с согласующими преобразователями под каждый тип накопителей (учет особенностей работы каждого типа накопителей, снижение эффективности передачи энергии за счет потерь при преобразовании, повышение стоимости), а также

- каскадная схема, при которой несколько накопителей включаются на потребителя последовательно через согласующий преобразователь (имеется возможность сохранить достоинства общей шины постоянного тока, но со снижением числа преобразователей, при этом имеются ограничения по токам заряда и разряда накопителей, включенных за первым из них).

Наличие ветроэлектрогенератора наряду с солнечной батареей в гибридной энергетической системе для удаленных территорий обусловило интерес авторов работы [62] к суперконденсаторам, дополняющим аккумуляторную батарею в составе накопителя. Система с

пассивным соединением (без дополнительного преобразователя между суперконденсаторной и аккумуляторной батареями) была промоделирована в среде Simulink и испытана в виде экспериментального образца. По результатам первых опытов параллельно батарее был подключен дроссельный элемент, выполняющий роль фильтра коротких, но резких колебаний со стороны нагрузки или потребителя. Использование суперконденсаторов позволило повысить мощность системы в 2,5 раза по сравнению с аккумуляторным вариантом, а введение дросселя снизило токи нагрузки аккумуляторной батареи с 0,8 до 0,3 А. Продемонстрирована работоспособность гибридного накопителя с минимальной стоимостью. В то же время очевидно, что пассивная схема существенно ограничивает энергоемкость суперконденсаторной батареи за счет равенства напряжений на суперконденсаторной и аккумуляторной батареях между собой в некоторый момент времени.

В работе [63] рассмотрены различные схемы построения гибридных накопителей на основе суперконденсаторных и аккумуляторных батарей для электротранспортных средств и проводится их оптимизационное моделирование. Во всех четырех рассматриваемых схемах потребителем является электродвигатель переменного тока, подключаемый через инвертор к общей шине постоянного тока, содержащей аккумуляторы и суперконденсаторы. Так как рабочий диапазон суперконденсаторной батареи обычно составляет от половины максимального напряжения до его полного значения, а для аккумуляторной батареи нижняя граница диапазона ограничена значением в 70-75% от максимального напряжения (по особенностям работы аккумуляторов), то во всех четырех схемах используются согласующие преобразователи постоянного тока. Первая из рассматриваемых схем предполагает включение суперконденсаторной батареи через двунаправленный согласующий преобразователь параллельно аккумуляторной батарее на шину постоянного тока. Плюсом такой схемы является возможность глубокой разрядки суперконденсаторов независимо от напряжения на аккумуляторной батарее. Минусы связаны с тем, что наибольшая мощность протекает именно через этот преобразователь, что ведет к увеличению его цены и потерь при высоких токах заряда-разряда, компенсируемых суперконденсатором. Вторая схема предполагает обратную ситуацию – теперь суперконденсаторная батарея подключена напрямую к инвертору, а аккумуляторная – через согласующий преобразователь. Теперь потери и стоимость, связанные с преобразователем, снижены, однако более широкий диапазон напряжений на входе инвертора может привести к ухудшению динамики разгона при низких напряжениях в шине, а также к удорожанию собственно инвертора. Третья схема предполагает параллельное включение суперконденсаторной и аккумуляторной батарей, при этом между ними также расположен двунаправленный преобразователь постоянного тока, а прямой заряд аккумуляторной батареи от инвертора невозможен, поскольку в этой цепи находится обратный диод. Четвертая схема является модификацией третьей, с той разницей, что преобразователь работает только в одном направлении – на заряд аккумуляторной батареи при рекуперации энергии торможения после того, как полностью заряжена суперконденсаторная батарея. Эти схемы обеспечивают снижение стоимости преобразователя за счет снижения мощности, передаваемой через него, однако их общими недостатками являются широкий диапазон напряжений на шине постоянного тока и проблемы с управлением разрядом суперконденсаторной батареи при достижении напряжения, сопоставимого или ниже, чем на аккумуляторной батарее. Математическое оптимизационное моделирование всех схем с использованием в качестве критерия минимальной стоимости владения показало, сто оптимальными являются первая и вторая схемы, при этом конкурентоспособность каждой из них относительно друг друга связана со стоимостью суперконденсаторов и аккумуляторов. Третья и четвертая схемы ведут к ускоренной деградации аккумуляторной батареи.

Проблема сопряжения и оптимальных алгоритмов управления гибридным накопителем транспортного средства, состоящим из аккумуляторной и суперконденсаторной батарей рассматривается также и в работе [64]. При этом рассматривается схема, близкая к схеме 3 из

ранее упомянутой работы, однако помимо обратного диода, запрещающего прямой заряд аккумуляторной батареи в режиме рекуперации энергии, в схему введены два управляемых транзисторных ключа (между мотор-генератором и суперконденсаторной батареей, между мотор-генератором и аккумуляторной батареей), а согласующий преобразователь между аккумуляторной и суперконденсаторной батареями может работать как в повышающем, так и понижающем режиме. Транзисторные ключи подключены таким образом, что подача напряжения приводит к тому, что один из них открывается, а второй закрывается. Обратная полярность управляющего напряжения открывает второй и закрывает первый ключ. Это позволяет направлять энергию из аккумуляторной батареи на подпитку суперконденсаторной батареи (режим разгона транспортного средства) или напрямую на мотор-генератор. Первый режим позволяет ограничить токи разряда аккумуляторной батареи для продления ее срока службы, второй – минимизировать потери энергии при малом потреблении.

В статье [65] описываются различные схемы контроллеров заряда для гибридных накопителей на основе аккумуляторной и суперконденсаторной батарей для фотоэлектрических энергоустановок постоянного тока. Необходимость использования таких накопителей автор объясняет ростом импульсных нагрузок постоянного тока со стороны таких потребителей как телекоммуникационные системы и портативные мультимедийные устройства. Предложена топология и алгоритм управления экстремального регулятора для использования в этих установках, при которых стратегия управления обеспечивает поддержание энергетического баланса из расчета среднего энергопотребления за счет аккумуляторной, а быстрых переходных процессов – за счет суперконденсаторной батареи.

Таким образом, в большинстве электрических схем гибридных накопителей с использованием суперконденсаторов используется согласующий преобразователь между аккумуляторной и суперконденсаторной батареями (либо в цепи одной из них), при этом большинство разработчиков защищает аккумуляторную батарею от прямого заряда при рекуперации энергии.

Заключение. Появление новых типов аккумуляторов энергии и расширение спектра их эксплуатационных характеристик открыло благоприятные возможности для комбинирования различных видов накопителей и создания гибридных систем, что обеспечивает возможность улучшения массогабаритных характеристик накопителей энергии и существенной экономии средств на их эксплуатацию. Основной движущей силой создания гибридных накопителей электрической энергии является желание разработчиков снизить либо токи нагрузки, либо количество циклов заряда-разряда для одного из входящих в систему накопителей. В транспортных системах практически всегда ключевым является интегральный кпд системы, в том числе с учетом согласующих преобразователей. Использование гибридных накопителей эффективно решает проблему «холодного запуска» различных видов двигателей внутреннего сгорания, характерную для многих холодных регионов России. В стационарных системах гибридные накопители обычно применяются там, где график нагрузки имеет ярко выраженные участки с различными характерными временами режимов потребителя. Многие энергоустановки, использующие в качестве первичных источников энергии ВИЭ, содержат ветроэлектрогенератор, работа которого сопряжена с ярко выраженными кратковременными неоднородностями выработки генерируемой мощности, компенсация которых целесообразна с применением комбинированных аккумулирующих устройств. Использование ВИЭ в сетевой энергетике существенно стимулирует развитие накопителей энергии, как гибридных, так и использующих какую-либо единичную технологию аккумулирования. Одной из ключевых тенденций как в сетевой, так и в автономной энергетике является стремление повысить коэффициент использования установленной мощности энергоустановок с возобновляемыми источниками, в том числе за счет получения водорода и других полезных продуктов в дополнение к аккумулированию электрической энергии в тех или иных накопителях. При разработке схем гибридных накопителей большое внимание уделяется повышению кпд преоб-

разования энергии при минимальной стоимости системы и сохранению ресурсных характеристик наиболее слабых с этой точки зрения компонентов системы (обычно электрохимических аккумуляторов). Наиболее популярной среди разработчиков является схема с подключением одного из накопителей к потребителю или инвертору напрямую, а другого – через согласующий преобразователь постоянного тока. Обычно напрямую подключается суперконденсатор, как имеющий наибольшие допустимые токи и лучшие ресурсные показатели по числу циклов заряда-разряда. В отсутствие необходимости передачи энергии между накопителями, каждый из них может быть подключен к общей шине через собственный согласующий преобразователь.

Выполненный обзор разработок в области гибридных накопителей энергии свидетельствует об отсутствии в данной области универсальных технических решений и необходимости расширении исследований в этом перспективном направлении.

Обзор подготовлен в рамках Научной школы РФ НШ-8406.2016.8 «Разработка научных основ новых технологий распределенной и возобновляемой энергетики» при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 16-19-10659 «Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования комбинированных систем аккумулирования и преобразования энергии в обоснование оптимальных конфигураций автономных фотоэлектрических энергоустановок для энергоснабжения потребителей в различных природно-климатических зонах России.

Литература:

1. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Сравнительный технико-экономический анализ систем длительного аккумулирования электрической энергии для источников резервного и аварийного питания, а также энергоустановок с возобновляемыми источниками энергии. // Теплоэнергетика. №11. 2012. С. 1-8.
2. Mathew Aneke, Meihong Wang. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review // Applied Energy V. 179. 2016. P. 350–377.
3. B. Scrosati, J. Garche. Lithium batteries: Status, prospects and future // Journal of Power Sources V. 195. 2010. P. 2419–2430.
4. Petra de Boer, Jillis Raadshelders. Flow Batteries // KEMA Report, June 2007.
5. Ю.М. Вольфкович, Т.М. Сердюк. Электрохимические конденсаторы // Электрохимическая энергетика. 2001. Т. 1. №4. С. 14-28.
6. Patricia Díaz, Zoraida Gonzalez, Ricardo Santamaría, Marcos Granda, Rosa Menendez, Clara Blanco. Optimization of a carbon-based hybrid energy storage device with cerium (III) sulfate as redox electrolyte // Journal of Power Sources V. 309. 2016. P. 50-55.
7. Zhou H, Bhattacharya T, Tran D, Siew TST, Khambadkone AM. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications. // IEEE Trans Power Electron V. 26 (3). 2011. P. 923-930.
8. Kotz R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // Electrochimica Acta. V. 45. 2000. P. 2483–2498.
9. Деньщиков К.К., Жук А.З., Герасимов А.Ф., Голиков М.В. Суперконденсаторы в современной энергетике // Известия РАН, Энергетика, № 5. 2011. С. 125-131.
10. A. Burke. Ultracapacitor Technologies and Application in Hybrid and Electric Vechicles // Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2009.
11. Schmittinger W, Vahidi A. A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells. // J Power Sources V. 180(1). 2008. P. 1-14.
12. Mehdi Ansareya, Masoud Shariat Panahi, Hussein Ziarati, Mohammad Mahjoob. Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming // Journal of Power Sources V.250. 2014. P. 359-371.

13. Zhuk A., Denschikov K., Fortov V., Sheindlin A., Wilczynski W., Hybrid energy storage system based on supercapacitors and li-ion batteries // Journal of Applied Electrochemistry. V. 44. № 4. 2014. P. 543-550.
14. Шейндлин А.Е., Жук А.З., Клейменов Б.В., Панкина Ю.В., Судариков И.О., Бузоверов Е.А. Комбинированная энергоустановка транспортного назначения на основе воздушно-алюминиевого электрохимического генератора // Известия РАН, Энергетика, №5. 2011. С. 45-55.
15. Maksym Spiryagin, Peter Wolfs, Frank Szanto, Yan Quan Sun, Colin Cole, Dwayne Nielsen, Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives // Applied Energy. V.157. 2015. P.607–618.
16. Киселева С.В., Тарасенко А.Б., О некоторых нишевых применениях суперконденсатоторов в распределенной и возобновляемой энергетике // Альтернативная энергетика и экология, № 07-09. 2017, С. 90-104.
17. M. Meinert, P. Prenleloup, S. Schmid, R. Palacin. Energy storage technologies and hybrid architectures for specific diesel driven rail duty cycles: Design and system integration aspects. // Applied Energy. V.157. 2015. P. 619–629.
18. Web-сайт компании Smart Fuel Cells Energy. https://www.sfc.com/en/the-company/technology/fuel-cells.
19. Sakhare A, Davari A, Feliachi A. Fuzzy logic control of fuel cell for stand-alone and grid connection. // J Power Sources. V/ 135. 2004. P. 165-176.
20. Ntziachristos L, Kouridis C, Samaras Z, Pattas K. A wind power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid. // Renew Energ. V. 30. 2005. P. 1471-1487.
21. Li X, Song Y, Han S. Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller. // J Power Sources. V. 180. 2008. P. 468-475.
22. Tan X, Qingmin L, Wang H. Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. // Electric Power Energy Syst. V.44. 2013. P. 179-191.
23. Idoia San Martı´n, Alfredo Ursu´a, Pablo Sanchis. Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis, modelling and experimental validation // International Journal of Hydrogen Energy. V. 38. 2013. P. 11655-11671.
24. Габдерахманова Т.С., Директор Л.Б., Попель О.С., Тарасенко А.Б. Сравнительный анализ электрохимических накопителей энергии // Альтернативная энергетика и экология. Т. 23 (187). 2015. С. 185-195.
25. Vachirasricirikul S, Ngamroo I, Kaitwanidvilai S. Application of electrolyzer system to enhance frequency stabilization effect of microturbine in a microgrid system. // Int J Hydrogen Energy. V. 34. 2009. P. 7131-7142.
26. Pan Zhao, Mingkun Wang, Jiangfeng Wang, Yiping Dai. A preliminary dynamic behaviors analysis of a hybrid energy storage system based on adiabatic compressed air energy storage and flywheel energy storage system for wind power application // Energy V. 84. 2015. P. 825-839.
27. Andrew J. Pimm, Seamus D. Garvey, Bharath Kantharaj. Economic analysis of a hybrid energy storage system based on liquid air and compressed air // Journal of Energy Storage. V. 4. 2015. P. 24–35.
28. Adriano Sciacovelli, Daniel Smith, Helena Navarro, Yongliang Li, Yulong Ding. Liquid air energy storage – Operation and performance of the first pilot plant in the world. // Proceedings of ECOS 2016-The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. June 19-23, 2016, Portorož, Slovenia.
29. Счастливцев А.И., Назарова О.В. Водородно-воздушная газотурбинная система аккумулирования энергии // Теплоэнергетика №2. 2016. С. 31-38.

30. Karellas S., Tzouganatos N. Comparison of the performance of compressed-air and hydrogen energy storage systems: Karpathos island case study / Renewable and Sustainable Energy Reviews, V. 29. 2014. pp. 865-882.
31. A.N. Gryaznov, S.P. Malyshenko, O.V. Nazarova, V.I. Prigozhin, V.S. Rachuk, A.R. Savich, A.I. Schastlivtsev, Hydrogen steam generators for stationary energy applications, in: 17th World Hydrogen Energy Conference 2008, WHEC 2008, Vol. 2, Brisbane, QLD, 2008, pp. 1141-1144.
32. В.А. Ильичев, В.И. Пригожин, А.Р. Савич, О.П. Свиридов, С.П. Малышенко, О.В. Назарова, А.И. Счастливцев, Разработка высокотемпературного водородного минипароперегревателя, Тепловые процессы в технике, 11 (2011) 517-522.
33. S.P. Malyshenko, V.I. Prigozhin, A.R. Savich, A.I. Schastlivtsev, V.A. Il'Ichev, O.V. Nazarova, Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class // High Temperature. V. 50. 2012. P. 765-773.
34. С.П. Малышенко, В.И. Пригожин. Разработка и создание водородно-кислородных парогенераторов для энергетики. В кн: Инновационные технологии в энергетике: сборник / Под ред. О. М. Бударгина и С. П. Малышенко. – М.: Наука, 2012. Т. 2. .162 с.
35. I. Janghorban Esfahani, Pouya Ifaei, Jinsoo Kim, Chang Kyoo Yoo. Design of Hybrid Renewable Energy Systems with Battery/Hydrogen storage considering practical power losses: A MEPoPA (Modified Extended-Power Pinch Analysis) // Energy V. 100. 2016. P. 40-50.
36. L. Valverde, F.J. Pino, J. Guerra, F. Rosa. Definition, analysis and experimental investigation of operation modes in hydrogen-renewable-based power plants incorporating hybrid energy storage. // Energy Conversion and Management V. 113. 2016. P. 290–311.
37. Idoia San Martin, Alfredo Ursua, Pablo Sanchis. Integration of fuel cells and supercapacitors in electrical microgrids: Analysis, modeling and experimental validation. // International Journal of Hydrogen Energy V. 38. 2013. P. 11655-11671.
38. H. Bindner, C. Ekman, O. Gehrke, F. Isleifsson. Characterization of Vanadium Flow Battery, revised, Riso-R-1753(EN). 2011.
39. А.И. Валеев. Комбинированная система электропитания для пуска двигателей внутреннего сгорания маневровых тепловозов (автореферат диссертации на соискание звания кандидата технических наук). Казань, 2010.
40. Beliakov, Alexey I. Starting of Locomotive Diesel Engines Using Electrochemical Capacitors. ELIT Co., Kursk-26, Russian Federation. Presented at "Advanced Capacitor World Summit 2003," Washington, D.C. August 11–13. 2003.
41. Erik J. Brandon, William C. West, Marshall C. Smart, Larry D. Whitcanack, Gary A. Plett. Extending the low temperature operational limit of double-layer capacitors // Journal of Power Sources. V. 170. 2007. P. 225–232.
42. E. Iwama, P.L. Taberna, P. Azais, L. Brégeon, P. Simon. Characterization of commercial supercapacitors for low temperature applications // Journal of Power Sources V. 219. 2012. P. 235-239.
43. Анисимов А.М., Попель О.С. Когенерационные автономные ветроустановки с теплоаккумуляторами. // Академия энергетики. 2009. № 1. С. 36.
44. T. Bocklisch, Hybrid energy storage approach for renewable energy application // Energy Procedia.V. 73. 2015. P. 103-111.
45. A. Pitts. Future proof construction – Future building and systems design for energy and fuel flexibility. // Energy Policy. V. 36. 2008. P. 4539–4543.
46. F.R. Pazheri. Tri-generation based hybrid power plant scheduling for renewable resources rich area with energy storage. // Energy Conversion and Management V. 103. 2015. P. 717–725.
47. González E López, Llerena F Isorna, Pérez M Silva, Iglesias F Rosa, Macho J Guerra. Energy evaluation of a solar hydrogen storage facility: comparison with other electrical energy storage technologies. // Int. J Hydrogen Energy. V. 40. 2015. P. 5518–5525.

48. Mantz RJ, De Battista H. Hydrogen production from idle capacity of wind turbines. // Intю J Hydrogen Energy. V. 33. 2008. P. 4291-4300.
49. Rodolfo-Dufo-Lopez, Jose´ L. Bernal-Agustın, Franklin Mendoza. Design and economical analysis of hybrid PV–wind systems connected to the grid for the intermittent production of hydrogen. // Energy Policy. V. 37. 2009. P. 3082–3095.
50. Bernal-Agustın, J.L.,Dufo-Lopez, R. Hourly energy management for grid-connected wind–hydrogen systems. // International Journal of Hydrogen Energy. V. 33. 2008. P. 6401–6413.
51. A. Khalilnejad, G.H. Riahy. A hybrid wind-PV system performance investigation for the purpose of maximum hydrogen production and storage using advanced alkaline electrolyzer. // Energy Conversion and Management. V. 80. 2014. P. 398–406.
52. A.M. Helal, S.A. Al-Malek, E.S. Al-Katheeri. Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates // Desalination. V. 221. 2008. P. 1–16.
53. Said Touati, Abderrahmane Belkaid, Rabah Benabid, Khaled Halbaoui, Mustapha Chelali. Pre-Feasibility Design and Simulation of Hybrid PV/Fuel Cell Energy System for Application to Desalination Plants Loads // Procedia Engineering. V. 33. 2012. P. 366 – 376.
54. Десятов А.В., Попель О.С., Тарасенко А.Б. Сравнительный анализ технико-экономических параметров различных схем электропитания автономных опреснительных установок // Гелиотехника №4. 2015. С. 53-59.
55. Bryce S. Richards, Gavin L. Park, Thomas Pietzsch, Andrea I. Schäfer. Renewable energy powered membrane technology: Brackish water desalination system operated using real wind fluctuations and energy buffering // Journal of Membrane Science. V. 468. 2014. P. 224–232.
56. Zephyr, the High Altitude Pseudo-Satellite - Defence – Airbus. http://defence.airbus.com/ portfolio/uav/zephyr/
57. Airshow China: AVIC unveils Morning Star solar-powered HALE UAV. http://airrecognition.com/index.php/archive-world-worldwide-news-air-force-aviation-aerospace-air-military-defence-industry/defense-security-exhibitions-news/air-show-2016/airshow-china-2016/3069-airshow-china-avic-unveils-morning-star-solar-powered-hale-uav.html.
58. Первый российский атмосферный спутник «Сова» достиг стратосферы. https://tvzvezda.ru/news/opk/content/201706291619-vw32.htm.
59. Gao Xian-Zhong, Hou Zhong-Xi, Guo Zheng, Liu Jian-Xia et al. Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft. // Energy Conversion and Management V. 70. 2013. P. 20–30.
60. Liang X, Wen ZY, Liu Y. New development of key materials for high-performance lithium–sulfur batteries. // Progr. Chem. V. 23(2/3). 2011. P. 520–526.
61. Younghyun Kim, Jason Koh, Qing Xie, Yanzhi Wang, et al. A scalable and flexible hybrid energy storage system design and Implementation // Journal of Power Sources. V. 255. 2014. P. 410-422.
62. T. Ma, Hongxing Yang, Lin Lu. Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems // Applied Energy. V. 153. 2015. P. 56–62.
63. Ziyou Song, Heath Hofmann, Jianqiu Li, Xuebing Han, et al. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles. // Journal of Power Sources. V. 274. 2015. P. 400-411.
64. Bin Wang, Jun Xu, Binggang Cao, Xuan Zhou. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles // Journal of Power Sources. V. 281. 2015. P. 432-443.
65. T. Ahmad. A hybrid grid connected PV battery energy storage system with power quality improvement // Solar Energy. V. 125. 2016. P. 180–191.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПАРОВОДЯНЫМ И ОРГАНИЧЕСКИМ ЦИКЛАМИ

Томаров Г.В.[1], Шипков А.А. [1], Борзенко В.И. [2], Счастливцев А.И. [2]

[1]ООО «Геотерм –М»;
Москва, Россия; 111250, ул. Лефортовский Вал, 24; e-mail: geotherm@gmail.com
[2]ФГБУН «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук»;
Москва, Россия; ул. Ижорская, 13 стр.2; e-mail: webadmin@ihed.ras.ru

Рассмотрены особенности геотермального теплоносителя и их влияние на конструкцию оборудования и технологическую схему геотермальной электростанции. Определены основные технологические схемы, применяемые в современной геотермальной энергетике. Отмечены принципы проектирования геотермальных электростанций, работающих на перегретом паре, пароводяной смеси и воде. Сформулированы преимущества бинарных энергоустановок перед паротурбинными агрегатами. Предложены технические решения по повышению эффективности и надежности геотермальных турбоустановок в составе электрогенерирующего комплекса утилизации высокотемпературных геотермальных ресурсов за счет применения устройств увеличение потенциала насыщенного пара вторичного вскипания, используемого в промежуточных вводах в проточную часть турбины, либо в турбине вторичного пара.

Геотермальная энергетика является одним из наиболее конкурентоспособных видов возобновляемых источников энергии. Технический потенциал мировых геотермальных ресурсов, которые могут быть использованы для производства электроэнергии, достигает 118 ЕДж/год на глубине до 3 км и 1.1 ЕДж/год – до 10 км. В 2015 году более чем в 50 странах работали геотермальные электростанции (ГеоЭС) общей установленной мощностью 12 647 МВт [1].

Использование геотермального теплоносителя в технологической схеме электростанций сопряжено с необходимостью решения ряда оптимизационных научно-технических задач, связанных с его относительно низким потенциалом, коррозионной агрессивностью и склонностью к образованию отложений. Физико-химические свойства и потенциал флюида различных месторождений могут существенно отличаться по температуре, химическому составу и газовой составляющей. Это требует индивидуального подхода при проектировании и создании геотермальных электростанций, учитывающего особенности геотермального теплоносителя каждого месторождения. Практически каждая геотермальная электростанция является уникальных энергетическим объектом.

Одной из ключевых задач проектирования геотермальных энергоблоков является обеспечение максимально возможной эффективности использования низкопотенциального геотермального теплоносителя. В зависимости от фазового состояния, температуры и химического состава геотермального флюида применяются различные технологические схемы геотермальных электростанций. При наличии перегретого геотермального пара обычно применяется технологическая схема с прямым циклом, где в качестве рабочей среды используется геотермальный теплоноситель.

Геотермальные месторождения с пароводяным теплоносителем являются наиболее распространенными. В этом случае применяются технологические схемы с бинарным и комбинированным циклами. ГеоЭС с бинарным циклом предполагают двухконтурную схему, где первый контур предназначен для подготовки и подачи геотермального теплоносителя к теплообменному аппарату, в котором его тепло передается органическому рабочему телу бинарного цикла. Комбинированный цикл включает паровую турбоустановку, работающую на геотермальном паре, а также бинарный энергоблок на органическом рабочем теле. Известно, что удельная мощность на единицу расхода геотермального теплоносителя энерго-

блоков с комбинированным циклом на 20–25% превышает этот показатель традиционных одноконтурных ГеоЭС [2].

Бинарные энергоустановки обладают рядом преимуществ перед паротурбинными агрегатами [3]:

- рабочий контур бинарных установок герметичен, отсутствует необходимость водоподготовки, подпитки контура и поддержания водно-химического режима;
- высокая плотность рабочего тела позволяет сделать оборудование более компактным;
- меньшее количество ступеней в турбине;
- высокое давление при конденсации пара позволяет исключить присосы воздуха в конденсаторе;
- отсутствует необходимость в оборудовании для удаления неконденсирующихся газов и соответствующие затраты энергии;
- возможность утилизации тепловой энергии при низкой температуре. Все это лежит в основе активного развития бинарных энерготехнологий в мире (см.рис.2).

Рис. 1. T, s-диаграмма процесса преобразования тепловой энергии геотермального флюида в электроэнергию на ГеоЭС с двумя давлениями сепарации.
a – точка, соответствующая состоянию геотермального флюида в продуктивном пласте; a–b – вскипание жидкости в скважине; b–c, b–d – разделение фаз в сепараторе; c–e – расширение геотермального пара в цилиндре высокого давления турбины; d–f – вскипание сепарата в расширителе; f–g, f–h – разделение фаз в расширителе; i – точка состояния пара перед цилиндром низкого давления турбины; e–j – расширение пара в цилиндре низкого давления турбины; j–k – конденсация пара

Значительное количество геотермальных месторождений обладает низкотемпературным водным теплоносителем, использование которого для электрогенерации возможно только на основе применения двухконтурных технологических схем с органическим циклом. Бинарные геотермальные энергоблоки характеризуются экологической чистотой.

Для повышения эффективности использования геотермального теплоносителя широко применяются технологические схемы одноконтурных геотермальных электростанций с одним, двумя и тремя давлениями сепарации, так называемые схемы single-flash, double-flash и triple-flash соответственно. Особенностью этих технологий является возможность использования в схеме дополнительного пара, полученного в расширителе за счет вскипания сбросного сепарата, что увеличивает коэффициент использования тепла геотермального флюида.

Технологическая схема ГеоЭС типа double-flash предполагает применение турбин с промежуточной подачей пара в проточную часть.

При этом насыщенный пар от первичного сепаратора направляется через стопорный и регулирующий клапаны к первой ступени турбины, а вторичный пар полученный в расширителе подается в отсек проточной части с низким давлением. Отдельными оптимизационными задачами можно считать определение давления в расширителе и места промежуточного ввода пара в проточную часть паровой турбины.

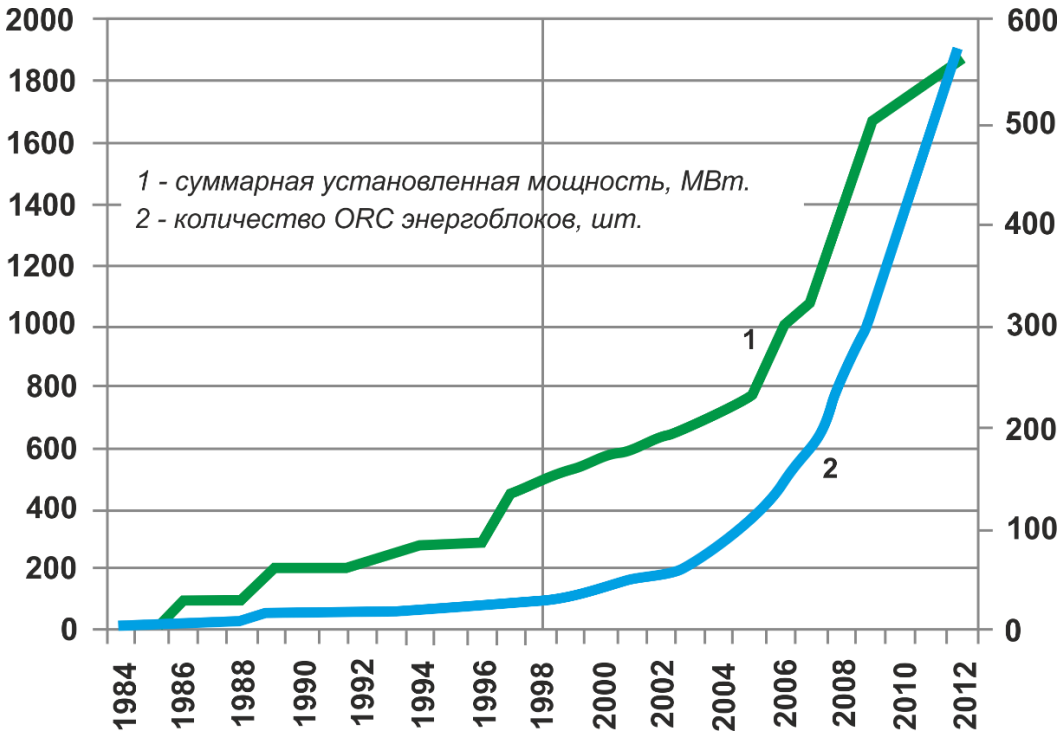


Рис. 2. Динамика роста суммарной установленной мощности и количества бинарных энергоблоков в мире

Диаграмма процессов преобразования тепловой энергии геотермального флюида на ГеоЭС типа double-flash показана на рис.1. За счет применения промежуточного ввода насыщенного пара в проточную часть турбины в последних ступенях турбины снижается степень влажности и увеличивается расход пара. Это приводит к повышению эффективности и мощности турбоустановки. Применение такой схемы требует учета возможности увеличения минерализации жидкой фазы в виде сепарата отводимого из расширителя.

Известны немногочисленные случаи применения технологических схем ГеоЭС типа triple-flash. Существенное усложнение конструкции и эксплуатации таких геотермальных электростанций сдерживает их более активное распространение.

Важной современной задачей в области геотермальной энергетики является повышению эффективности и надежности геотермальных турбоустановок в составе электрогенерирующего комплекса утилизации высокотемпературных геотермальных ресурсов. Одним из перспективных путей решения этой проблемы может стать разработка и применения устройств повышения потенциала насыщенного пара вторичного вскипания, используемого в промежуточных вводах в проточную часть турбины, либо в турбине вторичного пара.

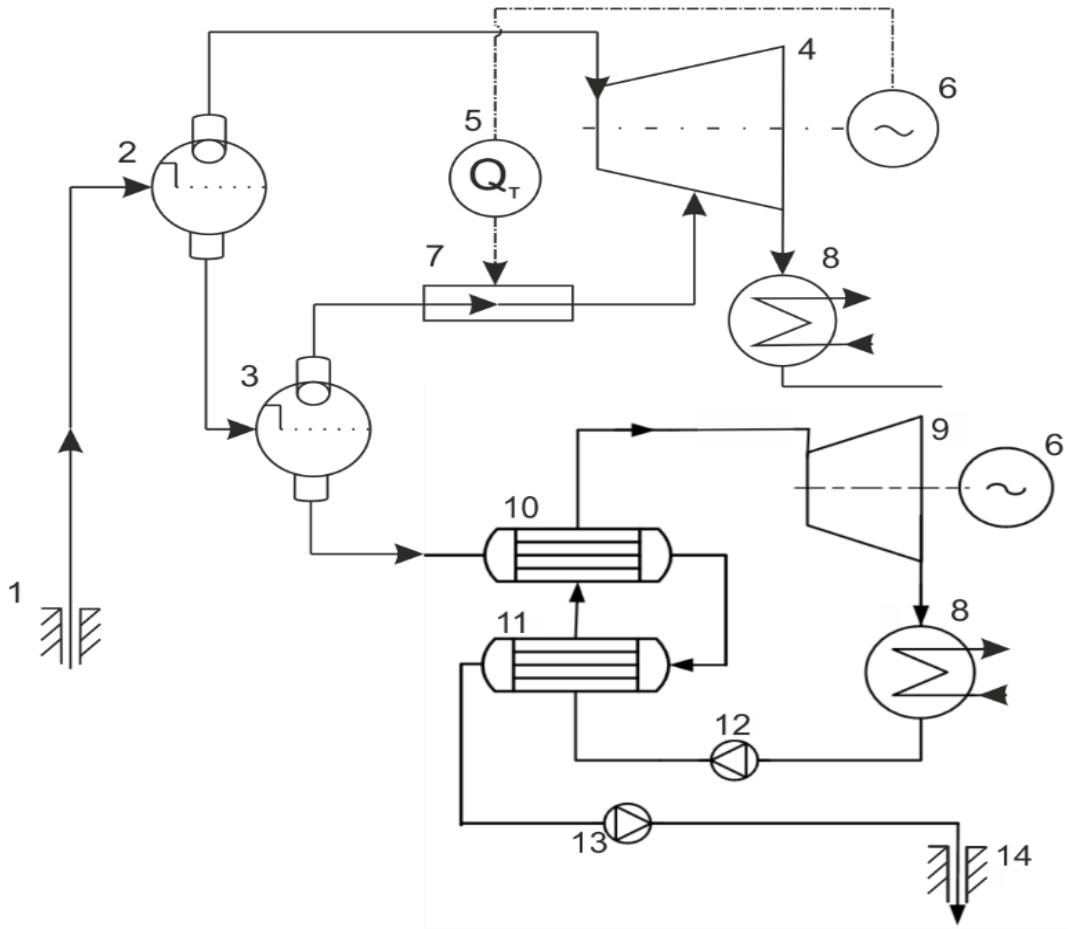


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема комбинированного энергоблока ГеоЭС с паровой и бинарной турбоустановками и использованием системы повышения энергопотенциала пара вторичного вскипания: 1 – продуктивная скважина; 2 – сепаратор; 3 – расширитель; 4 – паровая турбина; 5 – парогенератор; 6 - электрогенератор; 7 – смесительное устройство; 8 - конденсатор; 9 – бинарная турбина; 10 - испаритель; 11 - подогреватель; 12 – высокогерметичный питательный насос; 13 – насос реинжекции; 14 – скважина реинжекции

Принципиальная технологическая схема комбинированного энергоблока ГеоЭС с паровой и бинарной турбоустановками с использованием системы повышения энергопотенциала пара вторичного вскипания представлена на рис.3. Новизна предлагаемого совершенствования технологической схемы геотермальной электростанции комбинированного цикла заключается в применении специального устройства (например, водородного пароперегревателя) для повышения энергопотенциала вторичного пара после расширителя перед подачей его в промежуточную ступень проточной части паровой турбины. Это позволяет снизить степень влажности пара в последних ступенях турбины, что повышает ее эффективность и увеличить мощность турбоагрегата за счет дополнительного расхода пара.

Поскольку в настоящее время комбинированный цикл является наиболее распространенным на современных ГеоЭС освоение вышеуказанного способа повышения его эффективности может получить широкое использование.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии №14.607.21.0188, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI60717X0188) в рамках выполнения федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Заключение (выводы).

1. При создании геотермальных электростанций необходимо учитывать уникальные физико-химические свойства и энергетические характеристики геотермального теплоносителя конкретного месторождения, что ограничивает возможности тиражирования одинаковых технических решений при проектировании ГеоЭС для различных геотермальных источников;

2. Перспективным направлением повышения эффективности и надежности геотермальных энергоблоков комбинированного цикла является применении специальных устройств для увеличения энергопотенциала вторичного пара после расширителя, подаваемого в проточную часть паровой турбины.

Литература:

1. *Bertani R.* Geothermal power generation in the world 2010–2014. Update Report // Proc. WGC-2015. Melbourne, Australia, 19–25 April 2015. p.15
2. *Томаров Г.В., Никольский А.И., Семенов В.Н., Шипков А.А.* Геотермальная энергетика: Справочно-методическое издание. Москва: «Интехэнерго-издат», «Теплоэнергетик», 2015. 304 с.
3. International renewable energy agency (IRENA). Renewable power generation costs in 2014, Jan. 2015.

КОМПЛЕКСНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ, КАЛОРИЧЕСКИХ И АККУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НОВЫМ СПОСОБОМ

В.Г.Гасанов*, А.Н.Шахвердиев*, Г.Н.Наджафов*, А.Г.Муслимов*, А.Н.Гулузаде*

**Азербайджанский Технический Университет*
E-mail: vgasanov2002@yahoo.com

В статье, мы, используя только p-V-T зависимости индивидуальных жидкостей решив известные уравнения термодинамики в дифференциальной и интегральной формах, вычислили изменения одной из термодинамических величин – энтальпии, и после этого используя принцип подобия вычислили изобарные и изохорные теплоемкости, скорость распространения звука в жидкости при широких параметрах состояния и постарались обосновать этот метод вычисления.

Теория. Эксперимент:

В статье, мы, используя только p-V-T зависимости индивидуальных жидкостей, решив в определенных граничных условиях известные уравнения термодинамики в дифференциальной и интегральной формах, вычислили одну из термодинамических величин, например, изменение энтальпии, после чего используя принципы подобия, рассчитали в широких параметрах состояния изобарическую и изохорическую теплоемкости, скорость распространения звука в жидкости, и постарались ниже обосновать этот метод вычисления. Для обоснования этого метода мы используем уравнение термодинамики относящееся к энтальпии [1÷6].

В термодинамике энтальпия определяется как $u+pV$, где u – внутренняя энергия системы, p – внешнее давление над системой, V – удельный объем системы. Отметим, что энтальпия также является функцией состояния, и она одна из основных термодинамических величин определяющих состояние системы. Однако, определение абсолютного значения энтальпии сложно, а её изменение определяется следующим образом:

$$di = d(u + pV) = du + pdV + Vdp \qquad (1)$$

При изотермическом процессе зависимость изменения энтальпии di от параметров состояния выражается следующим термодинамическим уравнением:

$$i(p_2T)-i(p_1T)=\int_{P_1}^{P_2}\left[V-T\cdot\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P\right]_T dp \qquad (2)$$

А теперь раскроем интеграл, а точнее упростим это выражение. Все опытные исследования доказывают нелинейный рост удельного объема жидкости с ростом температуры, а также такое же нелинейное уменьшение его с ростом давления. Исследуемые нами углеводороды также относятся к нормальным жидкостям. С учетом этого положения, для упрощения данного выражения, примем следующее выражение для определения объема исследуемой нами жидкости

$$V=a_0^{'}+a_1^{'}\frac{T}{P}+a_2^{'}\left(\frac{T}{P}\right)^2 \qquad (3)$$

Здесь коэффициенты $a_0^{'}, a_1^{'}, a_2^{'}$ определяются в зависимости от значений *p,V,T.*

Анализ и обработка графиков удельного объема жидкостей подтверждает в общем виде возможность такой зависимости.

Теперь, из выражения (3) при условии *p=const,* определим производную удельного объема по температуре $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P=a_1^{'}\frac{1}{p}+2a_2^{'}\frac{T}{p^2} \qquad (4)$$

Запишем этот результат, а также (3) - в (2) и раскроем интеграл:

$$i(p_2T)-i(p_1T)=\int_{P_1}^{P_2}\left[V-T\cdot\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P\right]_T dp=$$

$$=\int_{P_1}^{P_2}\left[a_0^{'}+a_1^{'}\frac{T}{p}+a_2^{'}\left(\frac{T}{p}\right)^2-T\left(a_1^{'}\frac{1}{p}+2a_2^{'}\frac{T}{p^2}\right)\right]dp=a_0^{'}(p_2-p_1)-a_2^{'}T^2\frac{p_2-p_1}{p_1\cdot p_2}, \qquad (5)$$

$$i(p_2T)-i(p_1T)=\Delta p\left(a_0^{'}-a_2^{'}T^2\frac{1}{p_1\cdot p_2}\right)$$

Здесь $\Delta p=p_2-p_1$. Как видно из этого выражения, для вычисления изменения энтальпии для различных изотерм в интервале давления p_2-p_1 из используемого нами уравнения состояния (3) коэффициенты $a_0^{'}$ и $a_2^{'}$ должны быть определены на основе опытных значений *p, V, T.*

Такое вычисление изменения энтальпии и анализ графиков результатов полученных этим методом для нескольких жидкостей показывает, что зависимость изменения энтальпии от температуры для индивидуальных жидкостей имеет вид показанный на рис.1.

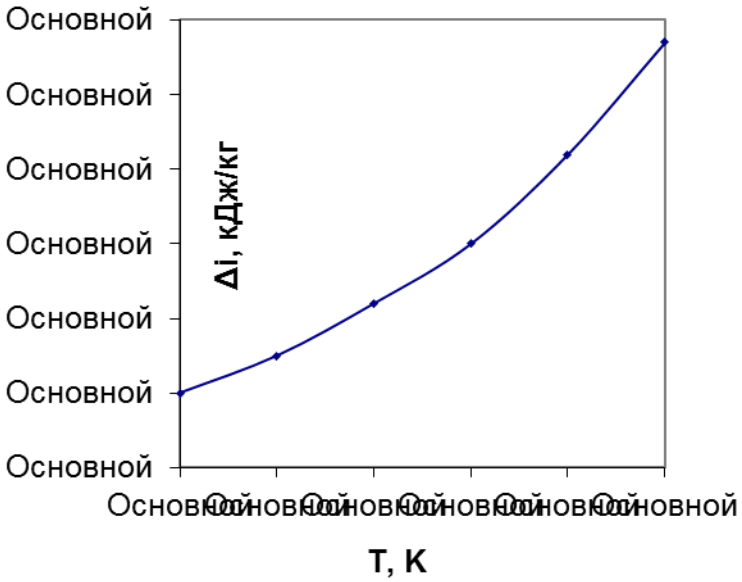


Рис. 1. Зависимость изменения энтальпии от температуры

Между изменением энтальпии и изобарической теплоемкостью существует следующая термодинамическая зависимость:

$$c_P = \left(\frac{\partial(\Delta i)}{\partial T} \right)_P \tag{6}$$

Пользуясь этим выражением можно вычислить зависимость изобарической теплоемкости от температуры по энтальпии. Однако эти результаты будут соответствовать одному значению давления. В результате мы по выражению (3) получим температурную зависимость c_p при $p=const$. Для определения c_p при различных температурах и давлениях, а точнее для определения влияния на c_p, в том числе и давления, мы используем следующую термодинамическую зависимость.

$$c_P(p_2T) - c_P(p_1T) = -T \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right) dp \tag{7}$$

Для упрощения данного интеграла предположим, что зависимость удельного объема жидкости (V) от температуры при $p=const$ определяется следующим выражением.

$$V = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 \tag{8}$$

Здесь C_0, C_1, и C_2 – определенные постоянные.

Определив из этого выражения $\left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)$, и подставив его в (7) получим:

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right) = 2C_2 \tag{9}$$

$$c_p(p_2T) - c_p(p_1T) = -T \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right) dp = -T \cdot 2C_2(p_2 - p_1) \tag{10}$$

$$c_p(p_2T) = c_p(p_1T) - 2C_2 T \cdot \Delta p \tag{11}$$

Здесь $\Delta p=p_2-p_1$.

На основании последнего выражения можно вычислить изобарическую теплоемкость для различных температур и давлений. Отметим, что изобарическая теплоемкость при низких давлениях $(c_p(p_1T))$ вычисляется, как отмечалось выше, по энтальпии.

Рассчитав на основе этой схемы c_p при различных параметрах состояния, для расчета изохорической теплоемкости жидкости (c_v) мы использовали следующий метод.

Для подобных термодинамических систем предложено следующее выражение:

$$\frac{c_P}{c_V}=1+\frac{K}{\mu\cdot c_p} \qquad (12)$$

Где K=56,7 $\frac{Дж}{моль\cdot K}$.

Здесь μ - мольная масса жидкости. Если использовать известные значения изобарической теплоемкости, то сможем определить отношение $\frac{c_P}{c_V}$ относительно c_p. Определив значения этого отношения при различных температурах и давлениях, мы на основании значений c_p определим $c_v(p, T)$.

Таблица 1.

Экспериментальные значения плотности ρ, *кг/м³* н.октана

p	*ρ*	*p*	*P*	*p*	*ρ*	*p*	*ρ*	*p*	*ρ*	*p*	*ρ*	*p*	*ρ*
T = 298,15 K		*T = 323,15 K*		*T = 348,15 K*		*T = 373,15 K*		*T = 398,3 K*		*T = 423,15 K*		*T = 448,15 K*	
49,870	1015,4	48,870	978,5	48,850	972,1	49,620	984,1	48,950	966,4	48,712	945,4	48,740	924,6
30,120	1012,4	30,153	976,3	30,019	970,4	30,013	978,6	30,321	960,6	30,157	939,9	29,389	917,1
20,095	1002,2	22,840	974,4	22,790	961,5	25,111	976,5	25,450	958,3	24,587	937,3	24,895	914,6
15,076	1007,1	19,502	972,5	19,403	966,3	21,210	974,3	20,246	953,8	19,797	934,8	20,438	911,9
10,288	1006,2	16,453	970,5	16,096	964,2	16,160	972,1	15,344	953,4	15,072	932,2	15,362	908,9
5,0410	1005,3	11,566	968,4	11,395	962,2	11,074	969,6	10,122	950,8	10,097	929,5	10,116	905,6
3,0021	1004,4	8,396	967,0	8,560	961,1	8,209	968,0	5,504	948,2	6,206	926,7	5,305	902,6
2,0850	1003,2	4,929	960,6	4,196	960,2	6,071	966,5	2,995	947,1	3,002	925,6	2,948	901,2
1,0062	1002,3	1,1267	965,7	1,1270	959,4	1,6136	965,1	0,641	946,0	0,649	924,1	0,984	899,8
T = 473,15 K		*T = 498,15 K*		*T = 523,15*		*T = 548,15 K*		*T = 573,3 K*		*T = 598,15 K*			
49,130	900,4	49,445	873,6	49,345	844,2	49,625	811,2	48,956	771,4	49,171	725,2		
30,021	892,3	30,003	865,3	29,097	834,7	30,007	800,3	29,987	761,2	30,000	715,4		
25,420	889,5	25,369	861,6	25,793	830,0	26,524	795,0	24,909	753,9	27,698	711,0		
20,784	886,3	20,348	857,6	20,529	825,6	20,636	789,5	20,349	746,7	25,117	705,7		
15,586	882,8	15,698	853,8	15,664	820,9	15,330	782,8	18,002	742,5	22,783	700,6		
10,628	879,4	10,210	849,3	10,758	815,5	13,432	780,4	15,625	738,6	20,271	694,4		
8,027	877,6	7,998	847,2	8,768	813,7	10,592	776,4	13,602	735,0	17,863	688,0		
5,302	875,5	5,009	844,4	6,524	812,6	8,475	773,2	11,031	729,8	15,422	681,2		
1,947	873,0	2,626	842,4	4,189	808,8	6,339	770,3	8,878	725,3	12,129	670,6		

Рассчитав изохорическую теплоемкость, мы выяснили рациональность данного метода.

$$C_T=\sqrt{\frac{c_p}{c_V}\cdot\frac{V}{\beta_T}} \qquad (13)$$

Где β_T - коэффициент изотермической сжимаемости жидкости, C_T – изотермическая скорость звука.

Таблица 2.

Сравнение экспериментальных значений для н.октана с данными полученными из уравнения состояния

p, МПа	***$\rho_{оп}$, кг/м^3***	***ρ, кг/м^3***	***$\Delta\rho$, кг/м^3***	***$\Delta\rho$, %***
T = 323,15 K				
30,011	976,3	976,42	-0,12	-0,12
15,856	970,5	970,64	-0,14	-0,14
0,6123	965,7	965,85	-0,15	-0,15
T = 373,15 K				
30,096	978,6	978,73	-0,13	-0,13
20,316	974,3	974,43	-0,13	-0,13
0,6132	965,1	965,20	-0,10	-0,10
T = 423,15 K				
29,517	939,8	939,99	-0,19	-0,18
19,797	934,8	935,00	-0,20	-0,19
0,6419	924,1	924,22	-0,12	-0,11

Выше приведен метод определения c_p/c_v. При этом β_T находится из термического уравнения состояния. Для определения, на сколько представленная нами схема расчета пригодна, должна быть выбрана такая индивидуальная жидкость, чтобы было возможным сравнение рассчитанных значений изобарической теплоемкости данной жидкости с опытными данными. Поэтому, для определения пригодности предоставленной схемы расчета нами была использована вода. Отметим, что p-V-T зависимость воды экспериментально исследована и имеются экспериментальные данные относительно зависимости ее изобарической теплоемкости от температуры.

На основании экспериментальных данных p-V-T зависимости приведенных выше спиртовых растворов проанализирована плотность, составлено уравнение состояния. На основании уравнения состояния получено термодинамическое дифференциальное уравнение. Отсюда были определены c_p, c_v и скорость звука водного раствора при p=10 МПа.

Методом гидростатического взвешивания экспериментально исследована плотность н.октана в интервале температур 298,15-573,15К и давлений 6-39 МПа и определено свыше 100 значений плотности.

Анализ экспериментальных значений плотности сделал возможным предложить такое термическое уравнение состояния (14):

$$\nu = a_0 + a_1 \frac{T}{P} + a_2 \frac{T}{P^2}^2 \qquad (14)$$

Где a_0, a_1, a_2 постоянные величины для каждой изотермы. Значения этих постоянных для раствора 8,2 г/л приводим для двух температур:

Таблица 3.

Зависимость коэффициентов уравнения (14) от температуры

T, K	$a_0\left(\frac{м^3}{кг}\right)$	$a_1\left(\frac{Дж}{кг \cdot К}\right)$	$a_1\left(\frac{м^3}{кг}\right)$
298,15	0,00095	1,006	-2079,3
448,15	0,001050399	0,69038	-0,552043

Выражение (14) описывает экспериментальные значения плотности с точностью 0,03-0,05%.

Используя выражение (14) можно определить изменение энтальпии спиртовых раствора. Используем следующее термодинамическое уравнение [4÷6]:

$$I(p_2T)-I(p_1T)=\int_{P_1}^{P_2}\left[V-T\cdot\frac{\partial V}{(\partial T)p}\right]_T dp \qquad (15)$$

Для упрощения этого уравнения запишем значения V и $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)$ из выражения (14) в уравнение (15), и получим

$$I(p_2T)-I(p_1T)=\int_{P_1}^{P_2}\left[V-T\cdot\frac{\partial V}{(\partial T)p}\right]_T dp=$$

$$=\int_{P_1}^{P_2}\left[a_0+a_1\frac{T}{p}+a_2\frac{T}{p_2}-T\left(a_1\frac{1}{p}+2a_2\frac{T}{p_2}\right)R\right]dp=\Delta p\left(a_0+a_2\frac{T^2}{p_1\cdot p_2}\right)_T dp$$

Таким образом, для определения изменения энтальпии спиртовых раствора при изотермическом процессе, используем следующее эмпирическое уравнение:

$$\Delta i=i(p_2T)-i(p_1T)=\Delta p\left(a_0+a_2\frac{T^2}{p_1\cdot p_2}\right) \qquad (16)$$

Ниже приведены данные по изменению энтальпии н.октана для различных температур при давлении *Δp=10 МПа.*

Таблица 4.

Зависимость изменения энтальпии от температуры

T, K	273	303	333	363
$\Delta i\left(\frac{кДж}{кг}\right)$	29,10	114,10	198,60	285,40

Эти табличные данные можно выразить следующей эмпирической формулой:

$$\Delta i=0{,}0005T^2+2{,}49T-691{,}83,\quad \left(\frac{кДж}{кг}\right) \qquad (17)$$

Используя выражение (17) вычислим изобарическую теплоемкость н.октана из следующей термодинамической формулы [5÷6]:

$$c_P=\left(\frac{\partial(\Delta i)}{\partial T}\right)_P \qquad (18)$$

учтем (17) в (18):

$$c_P=\left(\frac{\partial}{\partial T}(0{,}0005T^2+2{,}49T-691{,}83)\right)_P \qquad (19)$$

Из выражения (19) была вычислена изобарическая теплоемкость н.октана для нескольких температур. Эти значения вычислены при давлении *Δp=10 МПа.*

Таблица 5.

Зависимость изобарической теплоемкости от температуры

T, K	298,15	348,15	398,15	448,15
$c_P\left(\frac{кДж}{кг\cdot К}\right)$	2,791	2,841	2,891	2,941

При определении C_p для других давлений мы использовали следующую термодинамическую зависимость [5÷6]:

$$c_P(p_2T)-c_P(p_1T)=-T\int_{P_1}^{P_2}\left(\frac{\partial^2\nu}{\partial T^2}\right)dp \qquad (20)$$

Здесь можно принять $c_P(p_2T)=c_P(10MPa,T)$. Значения $c_P(10MPa)$ приведены в таблице выше. Теперь предположим, что зависимость удельного объема от температуры при изобарическом процессе (p=*const*) следующее:

$$V=C_0+C_1\cdot T+C_2\cdot T^2 \qquad (21)$$

Из (21) получим - C_0, C_1, и C_2 - постоянные.

$$\frac{\partial^2\nu}{\partial T^2}=2C_2T$$

Выражение (20) примет вид:

$$c_P(p_2T)=c_P(10МПа,T)-2C_2T^2\cdot\Delta p \qquad (22)$$

Значения C_2 для двух температур: p_1*=18,27 МПа;* p_2*=27,49 МПа;*

$$C_1=0{,}025133\cdot10^{-7}\left(\frac{м^3}{кгК^2}\right)\quad C_2=0{,}0201733\cdot10^{-7}\left(\frac{м^3}{кгК^2}\right)$$

Таким образом, из выражения (22) вычислена изобарическая теплоемкость н.октана в широкой области температур и давлений, и полученные результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Изобарическая теплоемкость н.октана, $c_p\left(\frac{кДж}{кг\cdot К}\right)$

p, МПа / T, K	0,1	10	18,27	27,49	38,0
298,15	2,800	2,791	2,779	2,775	2,754
348,15	2,905	2,841	2,829	2,817	2,800
398,15	3,006	2,891	2,879	2,864	2,844
448,15	-	2,941	2,923	2,892	2,888

После этого вычислили изохорическую теплоемкость данного раствора. Для этого использовали следующую зависимость [3]:

$$\frac{c_P}{c_v} = 1 + \frac{K}{\mu \cdot c_P} \qquad (23)$$

Здесь, K=56,7 $\frac{Дж}{моль}$, μ – молярная масса.

Вычисленные с помощью этого выражения значения изохорической теплоемкости приведены в таблице 7.

Таблица 7.

Изохорическая теплоемкость 5% -ного водного раствора, $c_p\left(\frac{кДж}{кг \cdot K}\right)$

p, МПа / T, K	0,1	10	18,27	27,19	38,04
298,0	1,977	1,908	1,839	1,816	1,781
348,0	2,479	2,253	2,027	1,930	1,864
398,0	2,870	2,496	2,113	1,949	1,940
448,0	-	2,740	2,503	2,394	2,326

Экспериментальные данные плотности, а также данные по изобарической и изохорической теплоемкости, позволили также определить скорость распространения (*W*) волн звуковой частоты в 5% -ном спиртовых растворе. Для этого было использовано следующее термодинамическое выражение [6]:

$$W_T = \sqrt{\frac{c_P}{c_v} \cdot \frac{\nu}{\beta_T}} \qquad (24)$$

Здесь, β_T – коэффициент изотермического сжатия жидкости

ν – удельный объем жидкости

β_T -определили из уравнения состояния (1).

Таблица 8.

Скорость распространения $W\left(\frac{м}{сек}\right)$ **волн звуковой частоты в н.октана**

P, МПа / T, K	0,1	10	18,27	27,49	38,0
298,15	1168	1313	1595	1938	2382
348,15	946	1176	1373	1696	2130
398,15	-	926	1192	1503	1802
448,15	-	784	966	1162	1407

Отметим, что предложенный метод вполне пригоден для расчета теплофизических свойств водных растворов сложного состава.

Литература:

1. *Кириллин* В. *А*., Сычев В. В., *Шейндлин А*. *Е*. Техническая термодинамика, М., Госэнергоздат, 1956.

2. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических веществ, Из-во Энергия, М., 1977.
3. Ивернева В.П. Физический практикум, Из-во технико-теоретической литературы, М., 1955.
5. Həsənov V.H., Naziyev C.Y., Əliyev N.S. Metil spirtinin karbohidrogenlərlə qarışığında səs surəti // AzTU, Elmi əsərlər fundamental elmlər, 2011, №1, cıld X(37), səh.14-17
6. Гасанов В.Г. Скорость звука в углеводородах и спиртах и их растворах, методы измерения (монография): Баку, из-во «Элм», 2011, 240 с.

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ

[1]Григорьев Б.А., [2]Александров И.С.

[1]ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина; Москва, Россия; 119991, Ленинский проспект, 65; e-mail: gba41@mail.ru
[2]ФГБОУ ВО Калининградский государственный технический университет; Калининград, Россия; 236022, Советский проспект, 1; e-mail: alexandrov_kgrd@mail.ru

В докладе представлены результаты моделирования термодинамических свойств перспективного хладагента R507a (R125/R143a) методом Монте-Карло на основе оптимизированных потенциалов межмолекулярного взаимодействия. Полученный массив данных сравнивался с, имеющимся для данной смеси, высокоточным эталонным уравнением состояния. Отклонения данных моделирования от расчетных по уравнению состояния близки к погрешностям экспериментального определения соответствующих свойств. Показано, что предлагаемый подход может быть использован в дальнейшем для моделирования термодинамических свойств перспективных хладагентов и их смесей, для которых имеется недостаток экспериментальных данных.

Введение. Возрастающие потребности нетрадиционной энергетики, а также глобальные экологические проблемы делают весьма актуальной как задачу создания или выбора рабочих веществ с оптимальными свойствами, так и разработку эффективных способов получения информации о теплофизических свойствах веществ. Классическим источником сведений о свойствах веществ служит физический эксперимент. Однако возможности его естественно ограничены огромным числом известных на сегодня молекулярных соединений, а также дороговизной и трудоемкостью самого эксперимента.

Решением данной проблемы может стать применение методов численного (компьютерного, машинного) моделирования (или эксперимента), которые в последние десятилетия наряду с развитием ЭВМ получили широкое применение в различных областях науки и техники. В данной работе выполнено моделирование методом Монте-Карло термодинамических свойств, широко используемого в промышленности, хладагента R507a. Данное рабочее вещество является смесью двух хладагентов R125 и R143a. Выбор данной системы обусловлен тем, что для нее существует точное уравнение состояния, с которым имеется возможность сравнить, полученные в результате моделирования, термодинамические свойства. Моделирование производилось как в диапазоне применимости уравнения состояния, так и за его пределами при более экстремальных параметрах состояния. Таким образом, имеется возможность протестировать экстраполяционные возможности уравнения за пределами экспериментально исследованного диапазона и оценить применимость метода моделирования.

1. Молекулярное моделирование. Используемый метод базируется на формализме Люстига, предложенном им в [1]. В рамках этого подхода имеется возможность получать производные свободной энергии любого порядка (вплоть до третьего) относительно собственных переменных в процессе единого моделирования. Это позволяет рассчитывать любые термодинами-

ческие свойства как комбинацию этих производных, и, в последующем, использовать эту информацию для разработки, например, уравнения состояния. В данной работе методом Монте-Карло был получен массив производных свободной энергии смеси эквимолярного состава R125/R143a для десяти состояний равномерно распределенных в однофазной области. Моделирование производилось с помощью алгоритма, представленного в [2].

Для каждого состояния производилось моделирования для 500 молекул в течении 300000 циклов методом Монте-Карло в каноническом NVT-ансамбле. Избыточная свободная энергия определялась методом вставки частиц Уидома [3]. В качестве силового поля были выбраны оптимизированные потенциалы, предложенные в [2]. Данные потенциалы учитывают ван-дер-ваальсовские и дипольные взаимодействия, и имеют вид

$$U(r_{ij}) = 4\varepsilon_{ij}\left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}}\right)^{6}\right] + \\ + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{\mu_i\mu_j}{r_{ij}^3}\left(\sin\theta_i\sin\theta_j\cos\phi_{ij} - 2\cos\theta_i\cos\theta_j\right) \quad (1)$$

где r_{ij}, σ_{ij}, ε_{ij}, q_i,μ и ε_0 – это, соответственно, расстояние между сегментами взаимодействующих молекул, параметры потенциала Леннарда-Джонса, диполь, а также диэлектрическая проницаемость вакуума. Все указанные параметры приведены в таблице 1. Внутренние степени свободы не учитывались в виду компактности формы и небольшого размера молекулы. Применительно к различным углам, входящим в формулу (1) приводится рисунок 1.

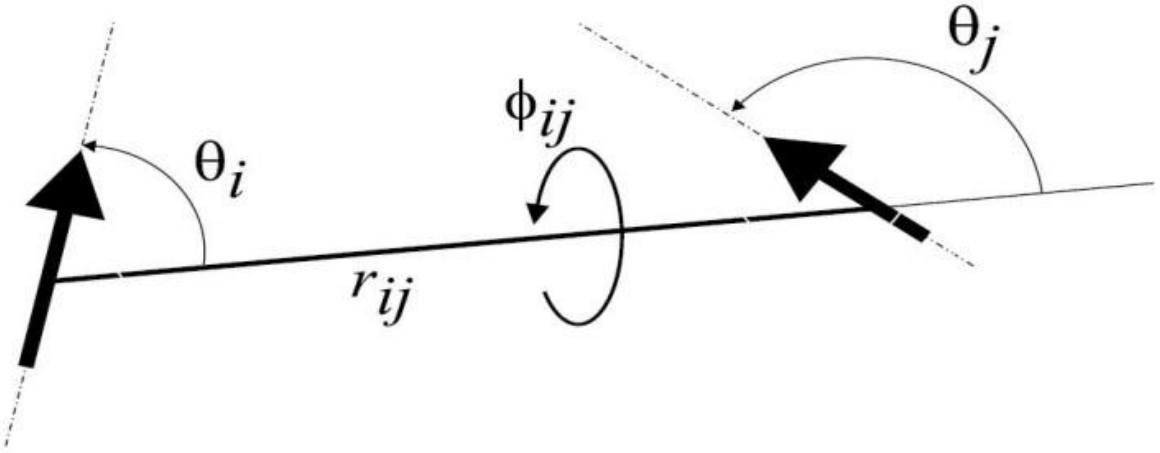


Рис. 1. Схема углов между двумя точечными диполями *i* и *j*.

В качестве правил комбинирования для параметров потенциала использовались следующие простые зависимости

$$\sigma_{ij} = \eta\frac{\sigma_{R125} + \sigma_{R143a}}{2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \xi\sqrt{\varepsilon_{R125}\cdot\varepsilon_{R143a}} \quad (3)$$

В приведенных выше правилах комбинирования коэффициенты взаимодействия η и ξ принимались равными единице.

Таблица 1.

Параметры потенциала (силового поля) для R125 и R143a по данным [2]. Все координаты даны по главным осям относительно центра масс молекулы.

№	*Сегмент*	*x, Å*	*y, Å*	*z, Å*	*σ, Å*	*ε/k*$_B$*, K*	*θ*	*φ*	*μ, D*
R125									
1	CF_3	0	0	-1,84305	3,6861	162,77			
2	CHF_2	0	0	1,84305	3,6861	162,77			
3	Диполь	0	0	0	-	-	0	0	2,8245
R143a									
1	CF_3	0	0	-1,76975	3,596	165,04			
2	CH_3	0	0	1,76975	3,596	165,04			
3	Диполь	0	0	0	-	-	0	0	2,7470

Примечание: Величины углов θ и φ инициировались автоматически генератором случайных чисел в методе Монте-Карло, поэтому их значения в таблице обнуляются.

2. Сравнение результатов моделирования с уравнением состояния смеси. В данной работе для оценки точности полученных результатов проведено сравнение с уравнение состояние смеси R125 – R143a, которое разработано Леммоном с соавторами [4]. Данное уравнение разработано в Национальном институте стандартов и технологии (NIST, USA) и является эталонным для расчета термодинамических свойств указанной системы. Уравнение представлено в виде зависимости приведенной свободной энергии Гельмгольца α от приведенной плотности δ, приведенной температуры τ и мольной доли компонентов x

$$\alpha(\delta,\tau,x) = \alpha^0(\rho,T,x) + \alpha^r(\delta,\tau,x) \tag{4}$$

где $\alpha(\delta,\tau,x)$ – свободная приведенная энергия Гельмгольца смеси; $\alpha^0(\rho,T,x)$ – идеальная часть энергии Гельмгольца; $\alpha^r(\delta,\tau,x)$ – избыточная часть энергии Гельмгольца; $\delta = \rho/\rho_r(x)$; $\tau = T_r(x)/T$; $\rho_r(x)$, $T_r(x)$ – параметры приведения (псевдокритические свойства), определяемые по правилу комбинирования, предложенному Кунцем и Вагнером [5]

$$\frac{1}{\rho_r(x)} = \sum_{i=1}^{N} x_i^2 \frac{1}{\rho_{c,i}} + \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} 2x_i x_j \beta_{v,ij}\gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \frac{1}{8}\left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}}\right)^3 \tag{5}$$

$$T_r(x) = \sum_{i=1}^{N} x_i^2 T_{c,i} + \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} 2x_i x_j \beta_{T,ij}\gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j}\left(T_{c,i}\cdot T_{c,j}\right)^{0.5} \tag{6}$$

где $T_{c,i}$ и $\rho_{c,i}$ – критические свойства i-того компонента; x_i – мольная доля i-того компонента в смеси; β_v,, γ_v, β_T, γ_T – коэффициенты бинарного взаимодействия.

Идеальная часть определяется по соотношению

$$\alpha^0(\rho,T,x) = \sum_{i=1}^{N} x_i\left[\alpha_{0i}^0(\rho,T) + \ln x_i\right] \tag{7}$$

где $\alpha_{0i}{}^0(\rho,T)$ – идеальная часть энергии Гельмгольца i-того компонента.

Избыточная часть определяется по соотношению

$$\alpha^r(\delta,\tau,x) = \sum_{i=1}^{N} x_i \alpha_{0i}^r(\delta,\tau) + \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} x_i x_j F_{ij}\alpha_{ij}^r(\delta,\tau) \tag{8}$$

где $\alpha_{0i}^r(\delta,\tau)$ – избыточная часть энергии Гельмгольца *i*-того компонента; $\alpha_{ij}^r(\delta,\tau)$ – избыточная функция. Коэффициенты бинарного взаимодействия компонентов, эмпирические коэффициенты и показатели степени приведены в [5].

Для расчета избыточной и идеальной части свободной энергии Гельмгольца компонентов использовались современные надежные уравнения состояния, описывающие с высокой точностью все термодинамические свойства в широком диапазоне температур и давлений. В частности, для расчета свойств компонентов использовались уравнения Леммона и Якобсена [6, 7]. Критические свойства компонентов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Критические свойства компонентов системы R125 – R143a.

Обозначение	Химическая Формула	Молярная масса, г/моль	Критические свойства		
			T_c, K	p_c, кПа	ρ_c, моль/л
R125	CHF_2CF_3	120,0214	339,173	3617,7	4,779
R143a	CF_3CH_3	84,041	345,857	3761	5,128

Результаты моделирования, а также результаты расчетов по приведенной выше модели (зависимости (4)-(8)) представлены в таблице 3. По значениям производных свободной энергии, представленных в таблице 3, на основе дифференциальных соотношений термодинамики могут быть рассчитаны такие основные термодинамические свойства как давление, изохорная и изобарная теплоёмкости

$$\frac{p}{\rho RT} = 1 + a_{01}^r \tag{8}$$

$$\frac{C_p}{R} = -\left(a_{20}^0 + a_{20}^r\right) + \frac{\left(1 + a_{01}^r - a_{11}^r\right)^2}{1 + 2a_{01}^r + a_{02}^r} \tag{9}$$

$$\frac{C_v}{R} = -\left(a_{20}^0 + a_{20}^r\right) \tag{10}$$

где нижний индекс при *a* показывает частную производную по соответствующей собственной переменной.

Таблица 3.

Результаты моделирования и сравнение с уравнением состояния (4).

№ п/п	T, K	ρ, моль/л	P, МПа Модель	P, МПа Расч., УС	a_{10}^r Модель	a_{10}^r Расч., УС	a_{20}^r Модель	a_{20}^r Расч., УС	a_{01}^r Модель
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	400	5,00	8,7475	8,5130	-1,9719	-1,9378	-1,1010	-1,2930	-0,4740
2	400	9,5	30,0401	29,3850	-3,4041	-3,3672	-0,9918	-1,0723	-0,0492
3	500	5,00	17,4121	17,1400	-1,4147	-1,3723	-0,6247	-0,6552	-0,1623
4	500	9,5	61,9686	61,6780	-2,5461	-2,4971	-0,7992	-0,9302	0,5691
5	600	1,00	4,8015	4,7945	-0,2532	-0,2284	-0,1537	-0,1354	-0,0375
6	600	5,00	25,9595	25,6070	-1,0920	-1,0515	-0,4439	-0,4798	0,0407
7	600	9,5	92,7161	92,2410	-1,9983	-1,9295	-0,6896	-0,8917	0,9563
8	700	1,00	5,7808	5,7706	-0,1987	-0,1794	-0,1080	-0,0983	-0,0068
9	700	5,00	34,3715	33,8520	-0,8795	-0,8384	-0,3524	-0,4099	0,1811
10	700	9,5	122,4340	121,0600	-1,6198	-1,5281	-0,6164	-0,8703	1,2143

Продолжение таблицы 3.

a_{01}^r Расч, УС	a_{02}^r Модель	a_{02}^r Расч, УС	a_{11}^r Модель	a_{11}^r Расч, УС	a_{12}^r Модель	a_{12}^r Расч, УС	a_{21}^r Модель	a_{21}^r Расч, УС
11	12	13	14	15	16	17	18	19
-0,4881	0,3756	0,3735	-1,5538	-1,5649	-0,3693	0,2995	0,0106	0,1593
-0,0699	2,7119	2,9445	-3,1578	-3,2401	-0,6757	-1,1131	-0,4204	-0,3888
-0,1754	0,3299	0,3394	-1,2352	-1,2365	-0,2693	0,0772	-0,2105	-0,2130
0,5617	2,7643	3,0475	-2,4130	-2,4232	1,0873	0,0581	-0,7167	-1,1522
-0,0389	0,0133	0,0103	-0,2237	-0,2216	0,0071	0,0119	-0,1329	-0,1237
0,0266	0,3465	0,3301	-0,9986	-0,9840	0,1656	0,0412	-0,2506	-0,3250
0,9463	2,7345	2,9866	-1,8764	-1,8088	-0,2491	0,5682	-0,8799	-1,3354
-0,0085	0,0100	0,0088	-0,1772	-0,1749	0,0165	0,0078	-0,0890	-0,0918
0,1633	0,3214	0,3238	-0,8266	-0,7928	0,2211	0,0449	-0,2023	-0,3750
1,1895	2,6527	2,8792	-1,4977	-1,3573	0,5690	0,8098	-0,8313	-1,3542

Заключение. Выполнено молекулярное моделирование термодинамических свойств хладагента R507a, представляющего собой смесь эквимолярного состава из хладагентов R125 и R143a. Моделирование выполнялось методом Монте-Карло в каноническом ансамбле с использованием оптимизированных потенциалов (силовых полей). Полученный массив данных моделирования сравнивался с высокоточным уравнением состояния для данной смеси. Результаты сравнения показывают хорошую согласованность сравниваемых данных. Используемый метод может быть в дальнейшем применен для моделирования свойств других перспективных хладагентов и их смесей, для которых имеется недостаток экспериментальных данных.

Литература:

1. R. Lustig Direct molecular NVT simulation of the isobaric heat capacity, speed of sound and Joule–Thomson coefficient // Molecular Simulation 37 (2011) 457–465.
2. S. Deublein, B. Eckl, J. Stoll, S. V. Lishchuk, G. Guevara-Carrion, C. W. Glass, T. Merker, M. Bernreuther, H. Hasse, J. Vrabec. ms2: A molecular simulation tool for thermodynamic properties // Computer Physics Communications 182 (2011) 2350–2367.
3. B. Widom, Some Topics in the Theory of Fluids // The Journal of Chemical Physics 39 (1963) 2808–2812.
4. Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2010.
5. The Gerg-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures / O.Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, M. Jaeschke. – Dusseldorf, 2007. – 535 p.
6. Lemmon, E.W. and Jacobsen, R.T. A New Functional Form and New Fitting Techniques for Equations of State with Application to Pentafluoroethane (HFC-125) // J. Phys. Chem. Ref. Data, 34(1):69-108, 2005.
7. Lemmon, E.W. and Jacobsen, R.T. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1-Trifluoroethane for Temperatures from 161 to 450 K and Pressures to 50 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data, 29(4):521-552, 2000.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ВИЭ ДЛЯ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Елистратов В.В., д.т.н., профессор, Заслуженный энергетик РФ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Аннотация: Около 65% территории России находится в зоне изолированного (автономного) энергоснабжения и в основном обеспечиваются электроэнергией от дизельных электростанций, работающих на привозном топливе. По оценке Российского энергетического агентства число дизельных электростанций (ДЭС), работающих в этих зонах составляет около 900, выработка электроэнергии около 2,54 млрд кВт-ч в год. Стоимость производства энергии на таких ДЭС составляет 025-2,0 Евро/кВт-ч, что значительно дороже чем в зонах централизованного энергоснабжения. Поэтому уменьшение объема потребления дальнепривозного топлива для работы ДЭС является важной социально-экономической задачей. В тоже время в зонах автономного энергоснабжения велик потенциал ветровой и солнечной энергии. Валовые ветроэнергетические ресурсы (ВЭР) России составляют - 80 х 10^{15} кВт-ч/год, технические ВЭР– 6.2х10^{15} кВт-ч /год, экономические 31х10^{12} кВт-/год. Около 38% сосредоточено в Европейской части, около 30% сконцентрировано на Дальнем Востоке, около 16% в Западной Сибири и около 16% в Восточной Сибири. Ресурсы солнечной энергии имеют высокий потенциал также в Регионах Сибири и Дальнего востока (Республики Якутия, Бурятия, Приморский край). В этих регионах эффективное и современное энергоснабжение может быть обеспечено путем создания эффективных модульных энергокомплексов на базе ВИЭ, обеспечивающих высокую долю замещения дизельного топлива.

Основной проблемой энергоснабжения изолированных северных территорий, где по оценке Российского энергетического агентства работает более 900 ДЭС с выработкой электроэнергии 2,54 млрд кВт-ч/год, является низкая эффективность их работы из-за изношенности оборудования, при которой себестоимость производимой энергии находится в диапазоне 15 – 150 руб/кВт-ч.

Учитывая наличие высокого ветропотенциала этих территорий, оптимизация и модернизация существующих систем энергоснабжения и развитие новых, может эффективно проводиться на основе создания энергокомплексов на базе ВИЭ модульного типа, например, в составе ветро-дизельных электростанций (ВДЭС), обеспечивающих высокую долю замещения дальнепривозного дизельного топлива. При этом такие энергокомплексы должны быть адаптированы к суровым северным климатическим условиям (низким температурам до -50 град, возникновению изморози, наличию вечномёрзлых грунтов основания и др. экстремальным условиям), а также к сложным транспортно-логистическим условиям доставки, монтажа и эксплуатации оборудования.

Для создания эффективной и конкурентоспособной системы энергоснабжения на базе ВИЭ, в НОЦ «ВИЭ» СПбПУ решены следующие задачи:

1) Разработка методических принципов многоцелевого подхода, реализованных в программном комплексе, выбора основного и вспомогательного оборудования энергокомплекса на основе ВИЭ, включающие расчет режимов работы ЭК в реальных условиях эксплуатации в месте размещения.

2) Разработка методики оценки ветроэнергетических ресурсов при ограниченной метеорологической информации, основанной на трехуровневом подходе, сочетающей в себе преимущества микро-, мезо- и крупномасштабного моделирования.

3) Разработка и создание уникального экспериментального стенда для проведения имитационных исследований элементов энергокомплекса на основе ВИЭ и оценки влияния различных вариантов регулирования на качество электроэнергии,

4) Разработка концепции модульной автономной системы энергоснабжения на базе ВДЭС с унифицированным энергетическим блоком, адаптированным для работы в российских северных условиях, позволяющим формировать энергокомплекс требуемой мощности.

5) Разработка алгоритма интеллектуальной системы преобразования, управления и распределения энергии, позволяющую интегрировать энергокомплекс на основе ВИЭ в автономную систему энергоснабжения в качестве активно-адаптивной установки для обеспечения надежного и эффективного энергоснабжения потребителей.

6) Разработка и создание макетного образца отечественного программно-аппаратного модуля интеллектуальной системы автоматического управления на основе активно-адаптивных связей, обеспечивающую высокий уровень замещения органического топлива энергокомплексом.

7) Разработка технических и технологических предложений и рекомендаций по адаптации элементов оборудования, конструкций, фундамента, методов возведения и монтажа основных элементов модульной ВЭУ в российских климатических условиях.

8) Разработка методики расчета технико-экономических показателей и инвестиций в ЭК на базе ВИЭ для автономных регионов энергоснабжения с обеспечением требуемой надежности и экономичности с учетом ресурсной обеспеченности, графика энергопотребления объекта, схем и особенностей формирования тарифов, адаптированного к этим условиям оборудования и технологий строительства, природно-климатических, социально-экономических, транспортных, логистических и экологических факторов

9) Разработка эскизного проекта отечественной ВЭУ, оптимальной для северных условий мощности 50-100 кВт, адаптированной под возможности транспортной логистики, монтажа, природно-климатические условия и ресурсы ВИЭ.

10) Разработка эскизного проекта типового модуля автономного ЭК на основе традиционных и возобновляемых источников энергии с интеллектуальными системами управления, адаптированного к северным условиям.

Для поиска оптимальной структуры, параметров и режимов работы автономного энергокомплекса на основе ВИЭ в реальных условиях эксплуатации разработана методология, представляющая последовательную реализацию 4-х функциональных блоков, программно объединенных в единое многоуровневое оптимизационное пространство (рисунок 1). Каждый блок предусматривает решение конкретных задач и выполнение критериальных условий, обеспечивающих формирование расчетных данных для последующего блока.

Первый блок предусматривает формированные из разных источников массивов исходных данных природно-климатической информации и ветрового режима и по специальной 3-уровневой методике крупномасштабного, мезомасштабного и микромасштабного моделирования проводится оценка ресурсного потенциала для планируемых площадок размещения ЭК. В этом же блоке на основе типовых графиков и моделей пересчета генерируются графики энергопотребления объектов энергопотребления и базы данных нормативно-правовых, финансовых и экономических показателей.

В основу методики оценки ветроэнергетических ресурсов (ВЭР) заложен принцип трехуровневой системы. На первом уровне на основании анализа данных разработанных ранее атласов ветров России проводится предварительное крупномасштабное моделирование и интегральная оценка ветроэнергетических ресурсов. На втором уровне проводится региональная оценка ВЭР на основе мезомасштабного моделирования ветрового потока и расчета ветроэнергетических ресурсов с учётом природно-климатических особенностей региона. На третьем уровне проводится микромасштабное моделирование ветрового потока и расчет ресурсов с учетом орографии, рельефа, топографии и др. для конкретного места размещения энергокомплекса.

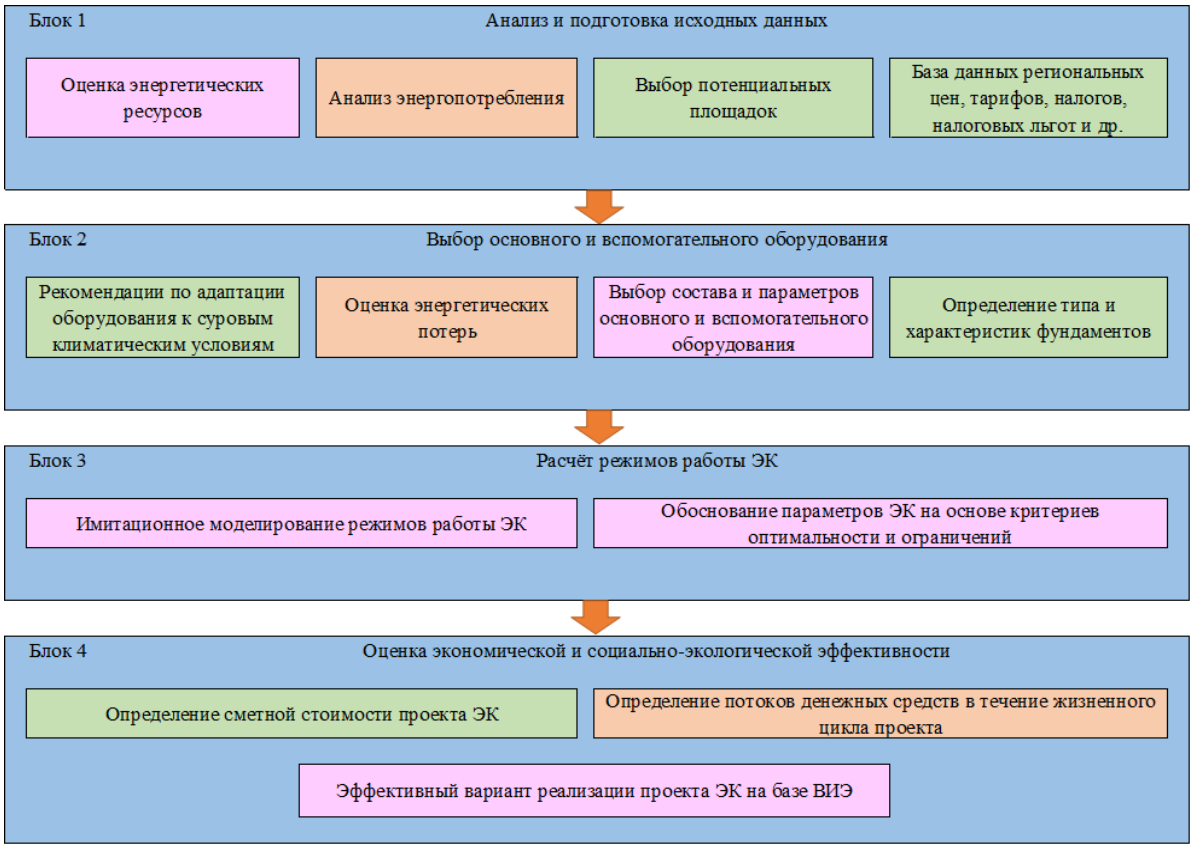


Рис. 1. Функциональная схема методологии расчета оптимальных параметров и режимов работы автономного энергокомплекса на основе ВИЭ

Во втором блоке проводится отбор и ранжирование вариантов реализации ЭК на основе многопараметрического сравнения. Варианты состава и параметров оборудования ЭК сопоставляются с учетом рекомендаций по адаптации к северным условиям и характеристик надежности, ресурсообеспеченности, экологичности и экономичности работы оборудования [4]. Ранжированный ряд вариантов передается в блок 3 для оптимизации режимов работы ЭК. Для этих вариантов рассчитываются параметры фундаментов ВЭУ для конкретных площадок размещения в северных условиях на вечной мерзлоте и определяются затраты на строительно-монтажные работы по возведению ВЭС.

В блоке 3 на основе данных блоков 1 и 2 проводится имитационное моделирование режимов работы энергокомплексов, различных по составу и техническим параметрам оборудования. Имитационная схема расчёта включает следующие математические модели оборудования:1) Модели ВЭУ или ВЭС, 2) Модель СФЭУ, 3)Модель ДЭС, 4) Модель аккумулирующей системы (АС), 5) Модель управляемой балластной нагрузки (УБН), 6) Модель интеллектуальной системы управления.

При обосновании параметров автономного энергокомплекса на ВИЭ в месте размещения предложено решать многокритериальную задачу принятия решения, состоящую в оптимизации по нескольким критериям.

При этом главным критерием оптимизации является:

- удельные дисконтированные затраты на производство электроэнергии:

$\text{УДЗ} \rightarrow min.$

УДЗ представляются как дисконтированная стоимость производства электроэнергии C_{lev} (Levelized discounted electricity generation cost) и рассчитывается по формуле:

$$\text{УДЗ} = C_{lev} = \sum_{t=T_B}^{T_E} \frac{C_t}{(1+d)^{t-T_D}} \Big/ \sum_{t=T_o}^{T_L} \frac{W_t}{(1+d)^{t-T_D}}$$

где t – текущий год на горизонте планирования, C_t - полные затраты электростанции (капитальные, на топливо, эксплуатацию и вывод из эксплуатации); W_t - производство электроэнергии (кВт·ч. в год); d – ставка дисконтирования; T_B - дата подачи заявки на тендер; T_D - момент приведения разновременных затрат, т.е. дата, к которой приводятся расчеты; T_0 - дата начала коммерческого производства электроэнергии; T_L - дата окончания срока жизни установки; T_E - дата снятия электростанции с эксплуатации (дата снятия электростанции с эксплуатации T_E может не совпадать с датой окончания срока жизни установки T_L). Момент приведения T_D может выбираться собственником или инвестором и, как правило, он совпадает или с датой подачи заявки на тендер или с датой начала эксплуатации, т.е. началом коммерческого производства электроэнергии.

В зависимости от особенностей проекта энергоснабжения рассматриваются и другие критерии:

- ущерб от вредных выбросов в атмосферу в эквивалентном значении: CO_2экв;
- время автономности (время автономной работы без технического обслуживания): $T_a > T_{a\,min}$;
- максимум полезной выработки возобновляемой энергии: $W_{виэ} > W_{виэ\,min}$

Результатом имитационного моделирования и оптимизации параметров являются один или несколько вариантов реализации энергокомплекса с конкретным составом, техническими и режимными параметрами.

В блоке 4 проводится финансово-экономический анализ эффективности вариантов проектных решений создания ВДЭС и схем финансирования.

На рисунке 2 приведен пример оптимизации параметров ветродизельного энергокомплекса в п. Тикси республики Саха (Якутия) для различных схем формирования ЭК, которые отличались количеством ВЭУ, ДГУ и аккумуляторных батарей. Оптимальным вариантом состава оборудования с минимальной себестоимостью производства энергии оказался вариант, обеспечивающий высокую долю замещения дизельного топлива с семью ВЭУ 50 кВт, одним ДГУ-440, преобразователем напряжения и 18 аккумуляторными батареями. Данный вариант имеет высокие исходные капитальные вложения в оборудования, но которые окупаются за счет оптимального управления и экономии дизельного топлива.

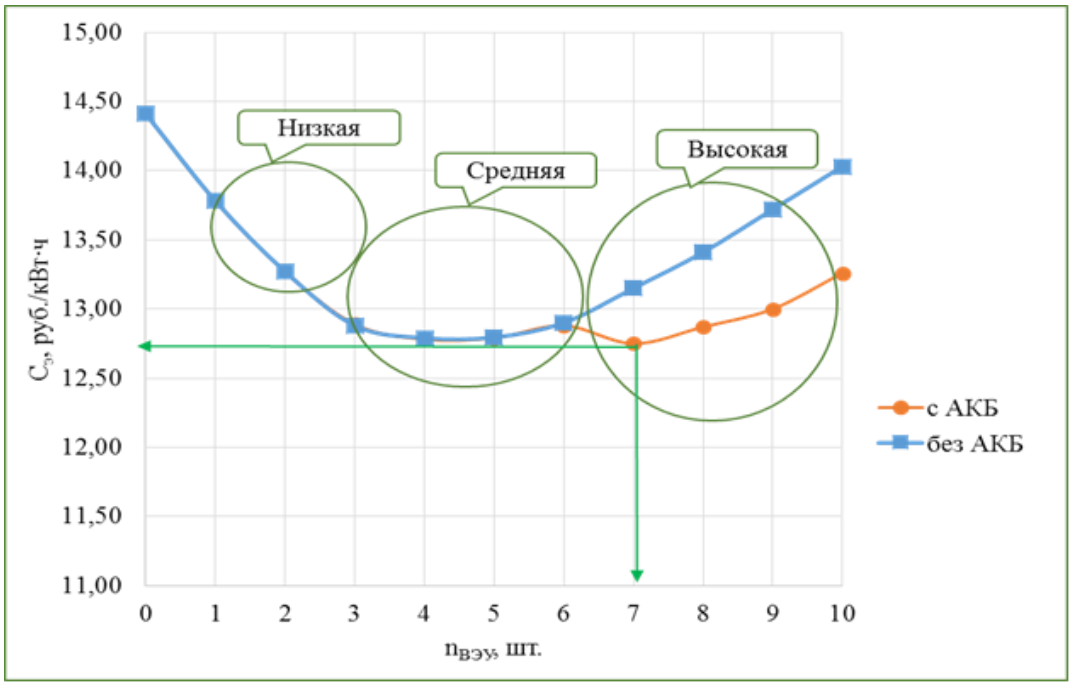


Рис. 2. Себестоимость производства электроэнергии при различном составе оборудования

Предложенная методология была внедрена при проектировании и создании ВДЭС в п. Амдерма (мощность ДЭС – 1050 кВт, ВЭС – 250 кВт, объем производства энергии – 2790 МВт-ч), строительства которой завершено осенью 2016 г. Для данного проекта была оптимизирована площадка под ВЭС, выбрана мощность и количество ВЭУ, разработана и установлена система интелллектуального управления, рассчитан фундамент под ВЭУ оргинальной конструкции, предложена технология бескранового монтажа. Для данного проекта использованы ВЭУ мощностью 50 кВт, производства Китая, для которых внедрены мероприятия по адаптации под российские условия, разработанные СПбПУ и компанией VTR Engineering. На рисунке 3 показан бескрановый монтаж ВЭУ на ВДЭС Амдерма. Опыт эксплуатации ВДЭС в течении 10 месяцев показал высокий КИУМ, очень близко коррелируемый с расчетным.

Реконструкция системы электроснабжения п. Амдерма и создание ВДЭС с интеграцией 4-х ВЭУ позволит снизить:

- производство электроэнергии на ДЭС с 510 тыс. кВт-ч до 160 тыс.·кВт-ч (более, чем в 3 раза);
- расход дизельного топлива с 719 тыс. л до 500 тыс. л (на 30%), т.е. на 169 тыс. л в год,
- объемы выбросов CO_2 на 600 т.

Экономический эффект за счет сокращения объема привозного топлива составляет около 7 млн. руб/год, снижение экономически обоснованного тарифа на 34% за счет снижения издержек на эксплуатацию и расходы собственных нужд. В целом системный эффект при создании ВДЭС оценивается величиной около 30 млн. руб. в год.

Рис. 3. Бескранового монтажа ВЭУ в п. Амдерма

Выводы

1) Высокая стоимость тарифа на электроэнергию в автономных и децентрализованных зонах энергоснабжения и наличие высокого потенциала ВИЭ создают хорошие предпосылки для строительства ВДЭС с высокой долей замещения.

3) Предложена методика выбора параметров и режимов работы энергокомплексов на базе ВИЭ, включающая оценку ресурсного потенциала в условиях дефицита природно-климатической информации, выбор и оптимизацию состава и параметров оборудования с системой интеллектуального управления, обеспечивающая высокое замещение дизельного топлива.

4) Реализация принципов многоцелевого комплексного подхода к созданию и оценке эффективности проектов энергокомплексов на базе ВИЭ обеспечивает повышение научно-технического уровня и инвестиционной привлекательности проектов для отдаленных районов в суровых природно-климатических условиях.

О ПРОЕКТЕ ЗАКОНА РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН "О ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКЕ В СФЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ"

Гаджиев Г. А.[1], Мухидинов М. С.[2], Ниналалов С. А.[3]

[1] ООО «Ватан», г. Махачкала,
[2] Народное Собрание Республики Дагестан,
[3]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а, said2706@gmail.com

Использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как энергия солнца, ветра, воды, геотермальных ресурсов, природного градиента температур, естественного движения водных потоков, биомассы имеет большие преимущества по сравнению с традиционными энергоносителями Внедрение ВИЭ сокращает издержки общества на энергообеспечение и транспорт энергоносителей, улучшает экологию региона за счет уменьшения объемов сжигания органического топлива, обеспечивая сбережение потенциала невозобновляемых энергоресурсов для будущих поколений.

ВИЭ в Дагестане представлены во всём многообразии, тем не менее. они занимают менее 0,5% в топливно-энергетическом балансе республики. Недостаточность электрической энергии в горных территориях, большие потери из-за протяженности ЛЭП и изношенности энерготранспортной системы, а также недостаточные объемы завозимого твердого топлива для удовлетворения потребностей населения приводит к топке печей дровами. За последние 120 лет лесистость Дагестана, особенно в горной местности, уменьшилась с 24,7% до 5 – 7,2%.

Децентрализованная энергетика на ресурсах ВИЭ, с ее использованием для бытовых нужд, – это не только сохранение лесов. В последние 10 лет централизованный завоз угля в горы сократился на 90%. Перепады напряжения в селах горного Дагестана в последние годы вызвали пожары, в которых сгорели десятки населенных пунктов. Использование ВИЭ позволит восстанавливать лесистость, травостой, влагозадерживание, что повлияет на регуляцию водного баланса в почве, в реках и на оползневых массивах, из-за которых сегодня к отселению из разрушенных жилищ подлежит более 2260 хозяйств (~9,5 тыс. чел.).

В связи с всемирным потеплением, которое связывают с парниковым эффектом, истощаются ледники Кавказского хребта – основные источники водных ресурсов рек. За последние 22 года дебит реки Сулак уменьшился с 176 – 182 м^3/с на 23 м^3/с. Под большим вопросом производительность существующих крупных и средних ГЭС, так как снижаются не только объемы воды и выработка электроэнергии, но и заиляются водохранилища. В частности, водохранилище Чиркейской ГЭС емкостью 1,320 млн. м^3 с 1973 сегодня заилено более чем на 800 млн. м^3. 16 существующих ГЭС – это не только генерация электроэнергии, но и несколько тысяч километров линий электропередач, и подстанции, под которые отведены десятки тысяч гектаров территории.

Сегодня под угрозой энергетическая безопасность региона, тем более, что ежегодно в Дагестан поставляется из других регионов России более 1 млрд. кВт. ч. электроэнергии. Потери энергии в единой системе составляют более 1,5 млрд. кВт. ч. По потреблению электроэнергии на душу населения, особенно в горных территориях, республика отстает в среднем от других регионов и России в 3-6 раза. Горные территории потребляют эл. энергию до 750 млрд. кВт. ч., в то время как суммарный потенциал ВИЭ горных территорий в 12 раз больше.

Гелиоресурсы. При широкомасштабном тиражировании технологии солнечных батарей и коллекторов, гелиоресурсы позволят, в зависимости от времени года обеспечить республику от 40 до 80 % теплом и горячим водо- и электроснабжением. Большая часть оборудования ВИЭ может быть произведена на заводах республики.

Геотермальные ресурсы. Северный Дагестан имеет большие запасы высоко-, средне- и низкопотенциальных геотермальных вод. Геотермальные электростанции на базе этих ресурсов могут производить более 500 тыс. МВт электроэнергии с добычей более 6-7 редкоземельных стратегических компонентов минералов, в том числе солей лития, магнезии жженной, поваренной соли и редкоземельных металлов. Эти металлы и соли необходимы для военно-промышленного комплекса, медицины, металлургии, электроники. На этой сырьевой базе могут получить развитие отдельные промышленные кластеры в республике.

Биоресурсы. Горный Дагестан – это 22 тыс. квадратных километров, на которых проживают около 900 тыс. человек в более чем 1400 населенных пунктах, где нет организованных очистных сооружений и перерабатывающих ТБО производств. Сбор и утилизация только 40-45 % навоза крупного и мелкого рогатого скота, помета птицы, а также отходов сельхозпроизводства и бытовых отходов, позволяют производить через биогазовые технологии органические удобрения, обеспечивающие до 400 тыс. га пашни, а также обеспечить газом более 100 тыс. семей.

Складывающаяся ситуация однозначно определяет перспективу децентрализованной малой энергетики на базе ВИЭ. Более того, широкомасштабное освоение водных ресурсов через технологии малой децентрализованной энергетики только со снятием обремененностей централизованной логистики энерготранспортной системы, позволит существенно оптимизировать и снизить тарифы на электрическую энергию, с непосредственной ее подачей потребителям от генерации. Излишки децентрализованной дешевой энергии ВИЭ с горных территорий перетоками могут быть транспортированы с минимальными потерями на равнинную территорию для промышленных потребителей, что обеспечит удешевление конечной промышленной продукции, соответственно ее конкурентоспособность и валовый рост, с существенным ростом доли промышленности в ВРП.

Снизится масштаб социальных проблем, сократятся миграционные процессы с горных территорий. Улучшится экологическая ситуация, синергетическим эффектом получит мощное развитие малый бизнес, фермерские хозяйства, экономический и социальный эффект которых в разы перекроет льготы, и преференции, предлагаемые проектом закона инвесторам и субъектам, осуществляющим проекты в области ВИЭ.

Важность этого направления в энергетической деятельности определяется тем, что развитие использования ВИЭ направлено прежде всего на удовлетворение непосредственных нужд человека в освещении, отоплении и горячей воде. Использование ВИЭ экономически целесообразно, особенно в горных территориях, где имеется соответствующий потенциал почти всех энергоресурсов, тем более где есть острая необходимость в них.

В сложившейся ситуации в мировом топливно-энергетическом комплексе, его влиянии на изменение климата весь цивилизованный мир нацелен на интеграцию и наращивание доли ВИЭ в экономике. В первую очередь в этом должно быть заинтересовано государство, с переводом объектов бюджетного финансирования на ВИЭ, созданием условии бизнесу, инвесторам, исполнителям.

Одной из важных причин неудовлетворительного использования в Дагестане ВИЭ является отсутствие соответствующей правовой и нормативной базы, четкой государственной политики и поддержки в этой сфере, сформированных в виде соответствующего законодательного акта. Во многих странах мира, как развитых, так и развивающихся, законодательство предусматривает льготы и субсидии на использование технологий на основе ВИЭ.

Проект Закона Республики Дагестан "О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии" предусматривает создание правовой базы по регулированию взаимоотношений, возникающих в процессе деятельности в сфере использования ВИЭ, в целях создания благоприятных предпосылок для мотивации, стимулирования и обеспечения инвестиционной привлекательности, приоритетного исполь-

зования этих источников энергии в интересах улучшения социальных, экологических условий жизни и экономии энергоресурсов.

Проект Закона содержит как общие положения государственного регулирования в данной сфере, так и ряд конкретных правовых норм по государственной поддержке использования ВИЭ.

В целом данный проект Закона взаимосвязан с пятью действующими Федеральными законами ("О недрах", "Об охране окружающей среды", "О стандартизации", "Об энергосбережении", "О государственном регулировании тарифов на электрическую и тепловую энергию в Российской Федерации"). Проект корреспондируется с указанными Федеральными законами и не требует внесения в них или в иные акты республиканского законодательства изменений и уточнений.

Принятие Закона Республики Дагестан "О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии" окажет эффективное содействие решению важных энергетических, социальных, экономических и экологических задач по расширению использования энергоресурсов ВИЭ вместо органических (невозобновляемых) видов топлива. В перспективе результатом принятия закона станет децентрализация производства и поставки электроэнергии на ресурсах ВИЭ, улучшение условий жизни населения в горах, рост предпринимательской активности в горных районах.

Проект Закона Республики Дагестан "О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии" публикуется в материалах V международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» для его обсуждения всеми заинтересованными лицами, внесения замечаний, предложений и исправлений в формулировки, прежде чем он пройдет слушания в Народном собрании Республики Дагестан.

Проект
Закона Республика Дагестан
"О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии"

Настоящий Закон Республики Дагестан регулирует отношения, связанные с осуществлением государственной политики в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в целях создания благоприятных предпосылок для приоритетного использования данных источников энергии в интересах улучшения социальных и экологических условий жизни населения и экономии невозобновляемых источников энергии.

Глава I. Общие положения

Статья 1. Основные понятия, используемые в настоящем Законе

В настоящем Законе используются следующие основные понятия:

нетрадиционные возобновляемые источники энергии - энергия солнца, ветра, тепла земли, природных градиентов температур, естественного движения водных потоков, геотермальных ресурсов, биомассы;

невозобновляемые источники энергии - газ, нефть, уголь, сланцы, торф;

энергосбережение - реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

установка по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии - комплекс технологического оборудования для добычи, приема (получения), преобразования, аккумулирования и использования энергии данных источников.

Статья 2. Цель настоящего Закона

Целью настоящего Закона Республики Дагестан является создание правовой основы для реализации государственной политики приоритетного экономически экологически эффективного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и замещения ими невозобновляемых источников энергии, призванной обеспечить:

улучшение социальных условий жизни населения;

сокращение затрат на энергообеспечение;

улучшение экологических условий жизни населения путем снижения вредного воздействия на окружающую природную среду, благодаря использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

сохранение потенциала невозобновляемых источников энергии для будущих поколений.

Статья 3. Законодательство Республики Дагестан об использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Законодательство Республики Дагестан об использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии состоит из настоящего Республиканского закона, других федеральных законов, иных нормативных правовых актов Республики Дагестан, а также законов и иных нормативных правовых актов, принимаемых в соответствии с предметами их ведения.

Статья 4. Предмет правового регулирования настоящего Закона Республики Дагестан

Настоящий Закон Республики Дагестан действует на всей территории Республики.

Предметом правового регулирования настоящего Республиканского закона являются отношения в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в том числе:

изучение потенциала нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

эффективное, приоритетное использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии, а также электрической и тепловой энергии, произведенной с использованием указанных источников;

создание и применение экономически эффективных технологий, производство и эксплуатация установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии и ускорение научно-технического прогресса в данной сфере;

организация лицензирования, стандартизации, сертификации, государственной регистрации, учета, надзора и контроля в данной сфере;

экономическое стимулирование использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Статья 5. Основные принципы государственной политики в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Государственная политика в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии основывается на следующих принципах:

приоритетность экономически эффективного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии на всей территории Республики Дагестан;

использование экологически чистых нетрадиционных возобновляемых источников энергии в целях удовлетворения энергетических потребностей и обеспечения устойчивого развития;

использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии в целях решения социальных и экологических задач Республики Дагестан;

энергосберегающая направленность использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

организационно-правовая поддержка и экономическое стимулирование деятельности в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии со стороны государства.

Глава II. Основы государственного регулирования в сфере нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Статья 6. Система государственного регулирования деятельности в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

В систему государственного регулирования деятельности в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии входят:

нормативное правовое регулирование, включающее в себя разработку законодательных и иных нормативных правовых актов в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, а также программ использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

государственное управление развитием использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, осуществляемое региональным органом исполнительной власти, специально уполномоченным Правительством Республики Дагестан;

осуществление лицензирования, государственного надзора и контроля в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

организация стандартизации, сертификации и государственной регистрации в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

осуществление межрегиональной деятельности в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Статья 7. Стандартизация в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Электрическая и тепловая энергия, произведенная децентрализовано с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, может быть передана в электрические и тепловые сети общего пользования при соответствии качества энергии требованиям, установленным государственными стандартами и иными обязательными правилами.

Статья 8. Лицензирование, государственный учет, надзор и контроль в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Лицензирование деятельности юридических и физических лиц в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии осуществляется в соответствии с законодательством Республики Дагестан.

Установки по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии подлежат государственному учету в соответствии с порядком, установленным Правительством Республики Дагестан.

Государственный надзор и контроль за установками по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии осуществляются уполномоченными на то органами исполнительной власти Республики Дагестан.

Разработка и использование геотермальных источников энергии осуществляются в соответствии с Федеральным законом "О недрах".

Установки по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии, некоммерческого назначения, имеющие мощность до десяти киловатт, государственному учету, надзору и контролю не подлежат, а лицензирование деятельности по эксплуатации указанных установок не проводится.

Статья 9. Государственное статистическое наблюдение за использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Государственное статистическое наблюдение за использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии организует и проводит уполномоченный на то региональный орган исполнительной власти в порядке, определенном Правительством Республики Дагестан.

Глава III. Экономические и организационно-правовые механизмы в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Статья 10. Отношения собственности в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Установки по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии мощностью до 5 мВт, а на гидроэнергоресурсах до 25 мВт, могут эксплуатироваться децентрализовано от общей энергосистемы с обеспечением локальных, автономных энергопотребителей, с передачей излишков энергии в общую сеть энерготранспортной системы.

Установки по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии могут находиться в государственной, частной, муниципальной и иных формах собственности.

Учитывая влияние децентрализованного использования установок НВИЭ на стабилизацию экологической, социальной, миграционной, экономической ситуации на горных территориях, временную по окупаемости и ценовую по стоимости, а также большую диспропорцию цен на оборудование и искусственным сооружениям НВИЭ и большой энергетики, в целях обеспечения инвестиционной привлекательности, мотивации и стимулирования инвесторов, как инвесторам, так и их исполнительным дочерним компаниям, производителям установок генерации ресурсов ВИЭ – объявить десятилетние налоговые каникулы, по налогам в республиканский бюджет.

Статья 11. Создание, приобретение и эксплуатация установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Установки по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии могут создаваться, приобретаться и эксплуатироваться любым юридическим и физическим лицом в соответствии с нормативными правовыми актами Республики Дагестан.

Статья 12. Финансирование программ и проектов использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Финансирование программ использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и проектов сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии может осуществляться за счет средств российских и иностранных инвесторов, средств федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации и местных бюджетов, средств, формируемых в соответствии с Федеральным законом "Об энергосбережении", а также за счет других не запрещенных законом источников в порядке, установленном законодательством Российской Федерации, законами и иными нормативными правовыми актами Республики Дагестан.

При финансировании программ использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и проектов сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии из федерального бюджета на условиях возвратности и платности процент за пользование предоставленными средствами устанавливается федеральным законом о федеральном бюджете на соответствующий год.

При выделении средств из республиканского бюджета в целях государственной поддержки новых высокоэффективных инвестиционных проектов в рамках региональной адресной инвестиционной программы на соответствующий год не менее трех процентов государственных инвестиций в топливно-энергетический комплекс Республики Дагестан направляется на финансирование программ использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и проектов сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Правительство Республики Дагестан предоставляет государственные гарантии Российской Федерации в целях привлечения средств на осуществление инвестиционных проектов в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

Статья 13. Тарифы на электрическую и тепловую энергию, производимую с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Тарифы на электрическую и тепловую энергию, производимую с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, устанавливаются преференции, льготы в соответствии с законодательством Республики Дагестан.

Статья 14. Льготы участникам работ в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Не входящие в региональные энергоснабжающие организации производители электрической и тепловой энергии, вырабатываемой с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии, поставляют ее в электрические и тепловые сети этих организаций на условиях и в порядке, которые определены частями второй и третьей статьи 14 Федерального закона "Об энергосбережении".

Участникам работ в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии предоставляются льготы в соответствии с законодательством Российской Федерации, Республики Дагестан.

Республика Дагестан вправе использовать часть средств федерального бюджета, предназначенных для компенсации расходов на твердое топливо, транспортных затрат на его завоз, на финансирование сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Объем финансирования сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии не может превышать объема сокращения затрат на завоз топлива в связи с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Деятельность юридических и физических лиц, направленная на использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии, признается природоохранной деятельностью.

Глава IV. Международное сотрудничество в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Статья 15. Международное сотрудничество в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Международное сотрудничество Республики Дагестан в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии осуществляется в соответствии с международными договорами Республики Дагестан, Российской Федерации и законодательством Российской Федерации.

Основными направлениями международного сотрудничества в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии являются:

взаимовыгодный обмен научными достижениями и технологиями совместного производства, использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии с иностранными и международными организациями;

участие Республики Дагестан в совместных международных проектах в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Если международным договором Российской Федерации установлены иные правила, чем предусмотренные настоящим Законом Республики Дагестан, то применяются правила международного договора с Российской Федерацией.

Глава V. Образование и подготовка кадров. Информационное обеспечение и пропаганда использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Статья 16. Образование и подготовка кадров

Имеющие государственную аккредитацию учреждения среднего профессионального, высшего профессионального и послевузовского профессионального образования, а также учреждения подготовки и переподготовки кадров в программах по обучению и подготовке кадров в области энергообеспечения предусматривают изучение эффективного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Статья 17. Информационное обеспечение использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии

Республиканский орган исполнительной власти, осуществляющий государственное управление в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии орган информационной политики, организует широкое информационное обеспечение использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии путем:

публичного обсуждения программ использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и проектов сооружения установок по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

координации работ по подготовке демонстрационных проектов в сфере децентрализованного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

организации выставок оборудования и технологий, применяемых при использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

предоставления потребителям энергетических ресурсов информации по вопросам использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии;

пропаганды использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и влияния на стабилизацию социального напряжения и экологической, экономической значимости НВИЭ.

разработки предложений по включению материалов об эффективном использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии в образовательные программы общего и профессионального образования.

Глава VI. Ответственность за нарушение положений настоящего федерального закона

Статья 18. Ответственность за нарушение положений настоящего Закона Республики Дагестан

Лица, виновные в нарушении положений настоящего Закона Республики Дагестан, несут ответственность в соответствии с законодательством Республики Дагестан.

Глава VII. Заключительные положения

Статья 19. Вступление в силу настоящего Закона Республики Дагестан

Настоящий Закон Республики Дагестан вступает в силу со дня его официального опубликования.

Нормативные правовые акты, действующие на территории Республики Дагестан, до приведения их в соответствие с Законом Республики Дагестан применяются в части, не противоречащей настоящему Закону Республики Дагестан.

ВрИО Главы Республики Дагестан В. А. Васильев

УДК 621.482

О ДОСТИЖЕНИЯХ И НЕУДАЧАХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Алишаев М.Г.

Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а, alishaev@rambler.ru

Даётся обзор материалов публикаций по успешной работе геотермальных станций, и отмечаются неудачи, связанные с освоением энергии горячей воды и пара на Курилах.

Введение. Земной шар и другие планеты Солнечной системы представляют собой сфероиды расплавленных породы, покрытые твёрдой корой, жидкой и газовой сферами. Гравитационная «сборка» астероидов в планету за миллиарды лет приводила к росту температуры пород из-за ударов, трения, химических реакций и сжатия. Постоянное внутреннее движение вещества планеты обуславливало всё новый разогрев, а тепловое излучение в космос обеспечивало охлаждение планеты до твёрдого состояния её коры.

Кора Земли почти сплошной сфероид, разбитый разломами на материковые плиты. Толщина коры изменчива, от 5 и более, в среднем 30 км. Через разломы происходит выход газов и разгрузка накопленной энергии мантийного вещества в виде вулканических извержений и землетрясений. Границы движущихся плит и есть наиболее вероятные места аномально высоких температур горных пород, где может накапливаться энергия и легче может быть добыта. Температура приповерхностных слоёв зависит в основном от внешних факторов – солнечного освещения и её атмосферы. Летом и в дневное время грунт до определённых глубин прогревается, а зимой и ночью охлаждается вслед за изменением температуры воздуха и с некоторым запаздыванием, растущим с глубиной. Влияние суточных колебаний температуры воздуха в земных условиях заканчивается на глубинах десятков сантиметров. Сезонные колебания захватывают более глубокие пласты грунта – до десятка и более метров. Незначительность теплового потока из недр Земли к поверхности на большей части связана с низкой теплопроводностью горных пород. В зонах тектонических разломов, повышенной сейсмической активности и вулканизма, где энергия земных недр находит выход, люди первыми начали её успешное использование. Огромное количество тепла на поверхность выносят извержения гейзеров и источники термальной воды. На территории России это Камчатка Курилы и Кавказ [1,2].

В принципе развитие геотермальной энергетики возможно практически везде, поскольку рост температуры с глубиной – явление повсеместное, и задача заключается в «добыче» тепла из недр, подобно тому, как оттуда добывается минеральное сырьё. В среднем температура с глубиной растёт на 2,5–3°С на каждые 100 м. Отношение разности температур между двумя точками, лежащими на разной глубине, к разности глубин между ними называют геотермическим градиентом. Обратная величина – геотермическая ступень, это интервал глубин, на котором температура повышается на 1°С. Чем выше градиент и соответственно ниже ступень, тем ближе тепло глубин Земли подходит к поверхности и тем более перспективен данный район для развития геотермальной энергетики. В разных районах, в зависимости от геологического строения и других региональных и местных условий, скорость роста температуры с глубиной может резко различаться. В масштабах Земли колебания величин геотермических градиентов и ступеней достигают 25 крат. Например, в штате Орегон (США) градиент составляет 150°С на 1 км, а в Южной Африке – 6°С на 1 км. В Кольской сверхглубокой скважине температура до глубины 3 км меняется с градиентом 10 °С/км, а далее геотер-

мический градиент становится в 2–2,5 раза больше. На глубине 7 км зафиксирована уже температура 120°С, на 10 км – 180°С, а на 12 км – 220°С. Другой пример – скважина, заложенная в Северном Каспии, где на глубине 500 м зарегистрирована температура 42°С, на 1,5 км – 70°С, на 2 км – 80°С, на 3 км – 108°С [3,4].

Воды с температурой до 150°С пригодны для отопления, теплиц и в бальнеологии, с температурой от 180°С и выше – и для выработки электроэнергии на геотермальных электростанциях.

В Исландии в настоящее время более половины всей потребляемой энергии берут из Земли. В том числе за счёт геотермальных источников обеспечивается 90% отопления и так же 30% выработки электроэнергии. Остальная часть электроэнергии в стране производится на ГЭС, то есть также с использованием возобновляемого источника энергии, благодаря чему Исландия выглядит неким мировым экологическим эталоном.

Таблица.

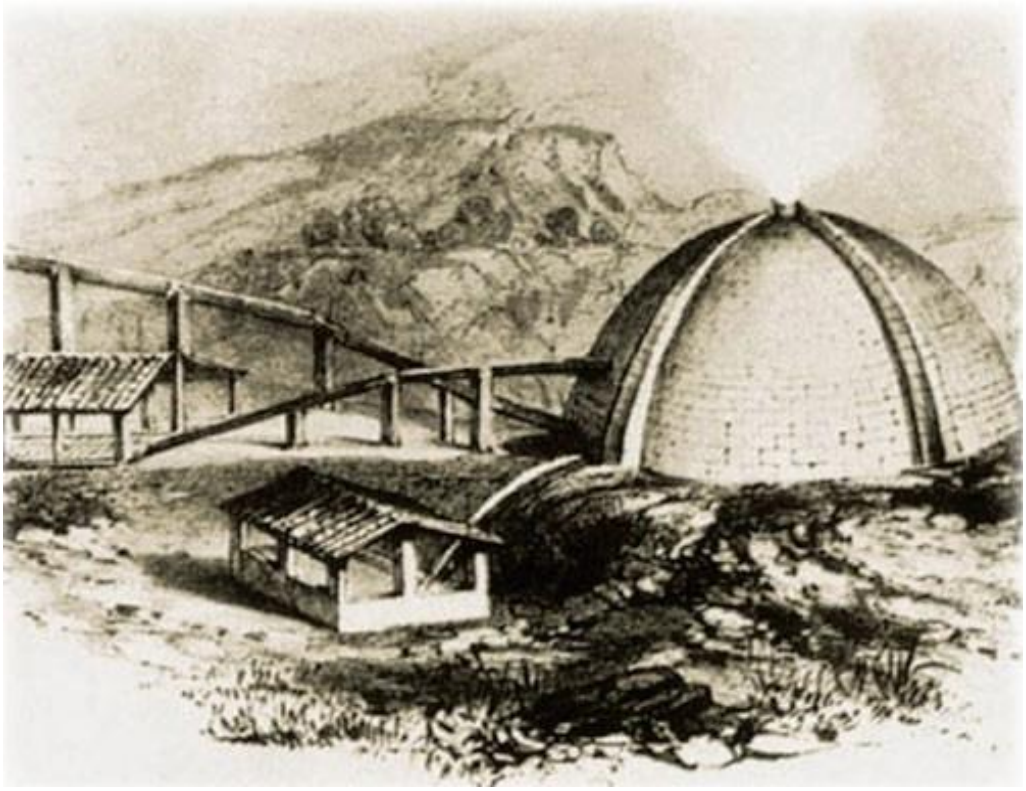
Установленные мощности геотермальных электростанций стран мира, МВт [4].

Страна	Годы						Доля в общем производстве электроэнергии, %
	1990	1995	2000	2005	2007	2010	
США	2774,6	2816,7	2228,0	2544,0	2687,0	3093,0	0,30
Филиппины	891,0	1227,0	1909,0	1931,0	1969,7	1904,0	27,00
Индонезия	144,8	309,8	589,5	797,0	992,0	1197,0	3,70
Мексика	700,0	753,0	755,0	953,0	953,0	958,0	3,00
Италия	545,0	631,7	785,0	790,0	810,5	843,0	1,50
Новая Зеландия	283,2	286,0	437,0	435,0	471,6	628,0	10,00
Исландия	44,6	50,0	170,0	322,0	421,2	575,0	30,00
Япония	214,6	413,7	546,9	535,0	535,2	536,0	0,10
Сальвадор	95,0	105,0	161,0	151,0	204,4	204,0	25,00
Кения	45,0	45,0	45,0	127,0	128,8	167,0	11,20
Коста-Рика	0,0	55,0	142,5	163,0	162,5	166,0	14,00
Никарагуа	35,0	70,0	70,0	77,0	87,4	88,0	10,00
Россия (Камчатка)	11,0	11,0	23,0	79,0	79,0	82,0	0,04
Турция	20,6	20,4	20,4	20,4	38,0	82,0	0,20
Папуа-Новая Гвинея	0,0	0,0	0,0	39,0	56,0	56,0	2,70
Гватемала	0,0	33,4	33,4	33,0	53,0	52,0	3,41
Португалия (Азорские острова)	3,0	5,0	16,0	16,0	23,0	29,0	0,26
Китай	19,2	28,8	29,2	28,0	27,8	24,0	0,003

Помимо Исландии высокая доля геотермальной энергетики в общем балансе производства электроэнергии обеспечивается в Новой Зеландии и островных государствах Юго-Восточной Азии (Филиппины и Индонезия), странах Центральной Америки и Восточной Африки, территория которых также характеризуется высокой сейсмической и вулканической активностью.

Из истории освоения. Использование геотермальной энергии имеет весьма давнюю историю. Один из первых известных примеров – Италия, местечко в провинции Тоскана, ныне называемое Лардерелло, где ещё в начале XIX века местные горячие термальные воды, изливавшиеся естественным путём или добываемые из неглубоких скважин, использовались в энергетических целях. Вода из подземных источников, богатая бором, употреблялась здесь для получения борной кислоты. Первоначально эту кислоту получали методом выпаривания,

а в качестве топлива брали обычные дрова из ближайших лесов. В 1827 году Франческо Лардерел создал систему, работающую на тепле самих вод. Одновременно энергию природного водяного пара начали использовать для работы буровых установок, а в начале XX века – и для отопления местных домов и теплиц. Там же, в Лардерелло, в 1904 году термальный водяной пар стал энергетическим источником для получения электричества **[3].** Примеру Италии в конце XIX–начале XX века последовали другие страны. Например, в 1892 году термальные воды впервые были использованы для местного отопления в США (Бойсе, штат Айдахо), в 1919-м – в Японии, в 1928-м – в Исландии.



Сбор термальной борной воды в Лардерелло

Первые электростанции, работающие на гидротермальной энергии, появилась в Калифорнии (США) в начале 1930-х годов, в Новой Зеландии в 1958 году, в Мексике в 1959 году. Вначале были освоены электростанции на сухом пару. Пар, поступающий из скважины, пропускается непосредственно через турбину, которая вращает генератор. Одна из самых крупных геотермальных электростанций в мире мощностью 1400 МВт, расположенная в районе Гейзеры в Северной Калифорнии, также использует сухой пар. Мощность одного генератора – 55 МВт [3]. Одна скважина обеспечивает мощность в среднем 7 МВт. Лопатки турбин изготовлены из стали с содержанием хрома 13%. Температура сухого пара около 240°С, пластовое давление 3,4 МПа. Выработка электроэнергии требует более высокой температуры, чем для отопления, выше 180°С.

Экологически чистая энергетика? Геотермальная энергетика считается экологически чистой, что в целом справедливо. Прежде всего, в ней используется возобновляемый и практически неисчерпаемый ресурс. Геотермальная энергетика не требует больших площадей, в отличие от крупных ГЭС, и не загрязняет атмосферу, в отличие от углеводородной энергетики. В среднем ГеоЭС занимает 400 м^2 в пересчёте на 1 ГВт вырабатываемой электроэнергии. Тот же показатель для угольной ТЭС, к примеру, составляет 3600 м^2. К экологическим преимуществам ГеоЭС относят также низкое водопотребление

– 20 литров пресной воды на 1 кВт, тогда как для ТЭС и АЭС требуется около 1000 литров **[4].**

Но отрицательные побочные эффекты всё же имеются. Среди них, прежде всего шум, тепловое загрязнение атмосферы и химическое загрязнение рек и почвы. Главный источник химического загрязнения среды термальная вода с высокой температурой и минерализацией, нередко содержащая токсичные соединения. ГеоЭС требует решения проблема утилизации отработанной воды и предотвращения выбросов опасных веществ. Термальная вода и также её пар зачастую содержат углекислый газ, сульфид серы, аммиак, метан, поваренную соль, бор, мышьяк, ртуть, фенолы. Кроме того, агрессивная химическая среда может вызывать коррозионные разрушения скважин и других конструкций станции. В то же время выбросы загрязняющих веществ на ГеоЭС в среднем ниже, чем на ТЭС. Выбросы углекислого газа на каждый киловатт-час выработанной электроэнергии составляют до 380 г на ГеоЭС, 1042 г – на угольных ТЭС и 453 г – на газовых ТЭС. Вопрос утилизации отработанной воды решается. При невысокой минерализации она может быть сброшена в поверхностные воды. Можно организовать её нагнетание обратно **в тот же** водоносный пласт в целях поддержания пластового давления, что и преимущественно применяется в настоящее время.

Добыча термальной воды из водоносных пластов (как и артезианской воды) может вызывать просадку и подвижки грунта, другие деформации геологических слоёв, микро землетрясения. Вероятность таких явлений, как правило, ничтожна, хотя отдельные случаи зафиксированы (например, на нефтепромыслах Баку замерена была просадка 6 см).

Следует подчеркнуть, что большая часть ГеоЭС расположена на сравнительно малонаселённых территориях, где экологические требования бывают менее жёсткими, чем в городских условиях. Кроме того, на данный момент количество ГеоЭС и их мощности сравнительно малы. При более масштабном развитии геотермальной энергетики экологические риски могут возрасти и перерасти по значимости в основное требование.

Почём энергия Земли? Инвестиционные затраты на строительство геотермальных систем варьируют в широком диапазоне – от 200 до 5000 долларов на 1 кВт мощности, то есть самые дешёвые варианты сопоставимы со стоимостью строительства ТЭС. Зависят они и от условий залегания термальных вод, их состава, температуры, выбора конструкции системы. Бурение на большую глубину, создание замкнутой системы с двумя скважинами, необходимость очистки воды могут многократно увеличивать стоимость. Пока геотермальная энергетика зависит во многом от везения. Инвестиции в создание циркуляционной системы оцениваются до $4000 на 1 кВт мощности, что превышает затраты на строительство атомной электростанции.

Очевидное экономическое преимущество ГеоЭС – бесплатный энергоноситель. Для сравнения – в структуре затрат работающей ТЭС или АЭС на топливо приходится 50–80% или даже больше, в зависимости от текущих цен на энергоносители. Отсюда ещё одно преимущество геотермальной системы: расходы при эксплуатации более стабильны и предсказуемы, поскольку не зависят от внешней конъюнктуры цен на энергоносители. Эксплуатационные затраты ГеоЭС оцениваются до 3 руб. на 1 кВт·ч произведённой мощности. В среднем себестоимость 1 кВт·ч геотермальной энергии сопоставима с таковой для ТЭС и на порядок выше себестоимости выработки электроэнергии на ГЭС.

Показатели экономической эффективности работы ГеоЭС зависят, и от того, возможно ли комбинированное использование ресурса. Так, химические элементы и соединения, извлечённые из термальной воды, могут дать дополнительный доход. В Лардерелло первичным там было именно извлечение бора, а использование геотермальной энергии первоначально носило побочный характер.

Российские геотермальные электростанции.

Паужетская ГеоЭС

Целью строительства в 1966 году Паужетской геотермальной электростанции, первой в России, стала необходимость обеспечения электроэнергией ряда жилых поселков и предприятий по переработке рыбы. Расположена станция на западном побережье Камчатки, вблизи села Паужетка, рядом с вулканом Камбальный. Установленная мощность на момент пуска электростанции в 1966 году составляла 5 МВт, в 2011 году – 12 МВт. В настоящее время реализуется введение бинарного энергоблока. Реализация данного проекта не только выведет электростанцию на новые мощности – до 17 МВт, но и решит экологические проблемы, связанные со сбросом отработанного термальной воды на грунт. На Паужетской ГеоЭС используется только отсепарированный геотермальный пар из пароводяной смеси, получаемой из геотермальных скважин. Большое количество геотермальной воды (около 80% общего расхода ПВС) с температурой 120°С сбрасывается в нерестовую реку Озерная, что приводит не только к потерям теплового потенциала геотермального теплоносителя, но и существенно ухудшает экологическое состояние реки. Расход сбрасываемой воды на Паужетской ГеоЭС достаточен для энергоустановки мощностью 2 МВт, стоимость оборудования 1000$/кВт. Температура сбрасываемой воды снизится до 55°С, тем самым значительно уменьшится тепловое загрязнение реки.

Верхне-Мутновская опытно-промышленная ГеоЭС

Электростанция расположена на юго-востоке Камчатского полуострова на отметке 780 метров над уровнем моря на склонах вулкана Мутновский. Станция была введена в эксплуатацию в 1999-м году. Она имеет три энергоблока по 4 МВт, то есть ее проектная мощность составляет 12 МВт.

Мутновская ГеоЭС.

Станция использует паро-термальные источники вулкана Мутновский и расположена на юго-востоке полуострова, в 130 км от Петропавловска на Камчатке. Она введена в эксплуатацию в апреле 2003 года. Установленная мощность – 50 МВт, планируемая 80 МВт. Обслуживание данной станции полностью автоматизировано. Благодаря использованию геотермальных электростанций на Камчатке значительно ослаблена зависимость этого региона от привозного топлива. Примерно 30% затрат энергии Камчатки покрываются именно геотермальными источниками электрической энергии.

Менделéевская ГеоТЭС – располагается на острове Кунашир около вулкана Менделеева. Установленная электрическая мощность станции составляет 3,6 МВт, станция осуществляла теплоснабжение и электроснабжение Южно-Курильска. Эксплуатирует ЗАО «Энергия Южно-Курильска». В настоящее время на она ремонте.

Строить начали 1993 году. Ввели в эксплуатацию первый комплекс мощности 1,8 МВт (модуль «Туман-2А») в 2002 году. Линии электропередачи ввели в 2003 году. ГеоЭС ввели на полную проектную мощность 3,6 МВт в 2006 году, за счет пуска второго модуля «Туман-2А». 2007 год – ввод III очереди теплоснабжения, обеспечившей потребности в тепле посёлка Южно-Курильска. На строительство станции потребовалось 14 лет.

Поддержка социально-экономического развития Курильских островов осуществлялась ранее Федеральной целевой программой «Социально-экономическое развитие Курильских островов Сахалинской области (1994–2005 годы)», утвержденной Постановлением Правительства РФ от 17 декабря 2001 г. N 872. В ноябре 2011 года начались работы по модернизации комплекса и увеличению мощности до 7,4 МВт.

Менделеевская ГеоЭС стала проблемным энергетическим объектом. Вышла из строя одна из четырех скважин. Потерю её мощности в 350 киловатт компенсировалось с помощью дизелей и подключения резервного топлива. Буксует вроде бы начатая масштабная модернизация ГеоЭС. Необходимые государственные субсидии в размере 500 млн

руб. определены в 2017 году областным руководством. Использование термальной энергии для электроснабжения населенных пунктов Кунашира позволило несколько лет снизить зависимость производственных, жилых и иных объектов от завоза морским путем угля и дизельного топлива, обеспечивало население недорогой электрической энергией.

Океанская ГеоТЭС.

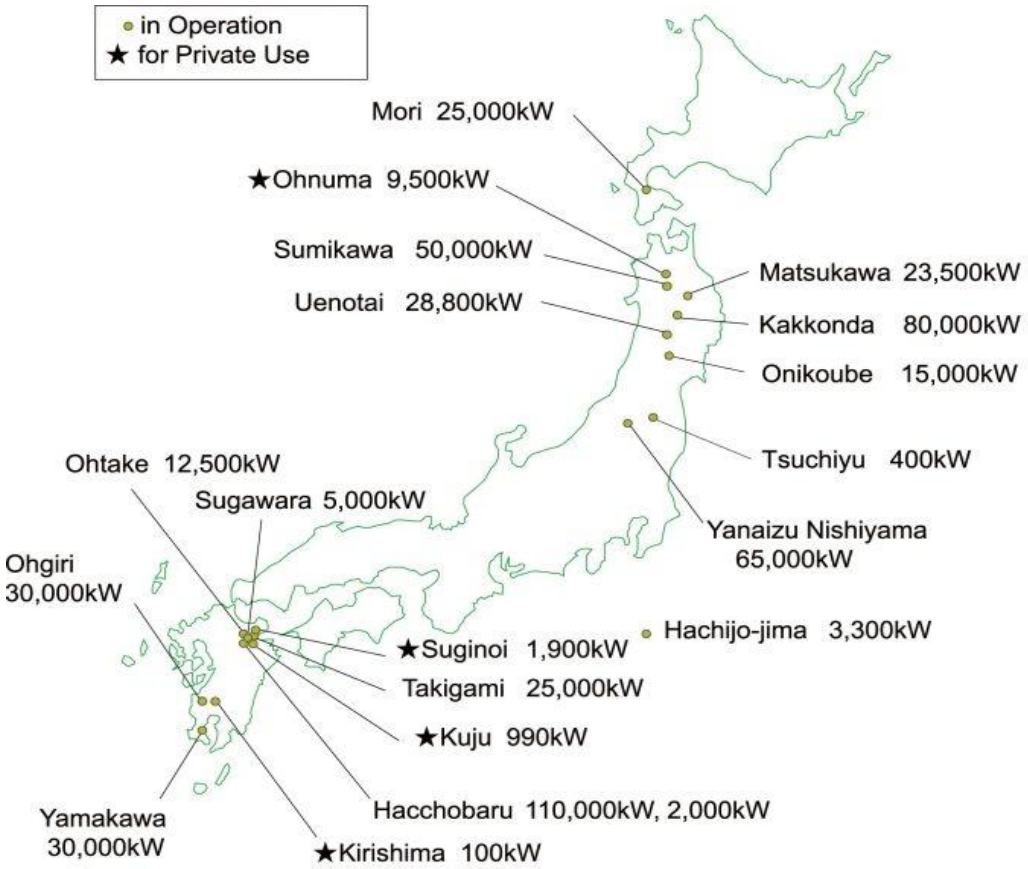
На острове Итуруп Курильской гряды построена и введена в действие геотермальная электростанция «Океанская». Начало строительства – 1993 год, ввод – 2006 год, мощность 2,5 МВт. Строили 13 лет. Сейчас не работает. Сахалинцев не на шутку взбудоражила новость о прекращении работы геотермальной электростанции "Океанская" на Итурупе. Построенная в 2007 году, ГеоЭС вдохнула жизнь в курильский остров. С ней связывали большие надежды. Работающие на привозном топливе дизельные генераторы раньше были на Итурупе единственным источником электроэнергии. "Океанская" же позволила получать ее из природных подземных трещинных коллекторов - станцию построили на месторождении горячей пароводяной смеси. Введение объекта в эксплуатацию экономила в год около 4000 тонн дизельного топлива, себестоимость электроэнергии снизилась в три раза, повысилось качество и надежность электроснабжения. Станцию с двумя модулями "Туман-2А" возвели у живописного подножия вулкана Баранского. В состав комплекса также вошли подстанции, кабельная линия до Курильска и подъездная автодорога [5].

Строили "Океанскую" дольше, чем она просуществовала. И, хотя турбины остановились еще в 2014-м, тогда мало кто обратил внимание на этот факт. К тому же в марте 2015 года власти региона официально заявили, что "проект модернизации ГеоЭС "Океанская" подготовлен, прошел государственную экспертизу". С тех пор о модернизации больше никто не упоминал, а вот недавнее известие, что операторам станции предложили "переквалифицироваться" в сторожей, вызвало серьезный общественный резонанс. В будущем на том же месте возведут новую станцию. «Мы сократили должности, которые там не нужны. Ну не работает станция, зачем ей начальник? Сейчас на объекте - четыре человека, они выполняют функции сторожей и откидывают снег», - рассказал "РГ" директор. «У нас нет доходов, чтобы содержать специалистов».

Так что же произошло с "Океанской"? Как объяснил начальник отдела ЖКХ администрации Курильского городского округа, «станция работала нестабильно с самого начала, причиной постоянных сбоев был некачественный пар. Возможно, у специалистов не было опыта эксплуатации данного типа оборудования. Там все сгнило. На лопатках ротора накопилась сера, да и не только она, фактически вся таблица Менделеева», подтвердили корреспонденту "РГ". Авария, "добившая" Океанскую ГеоЭС, случилась 27 февраля 2013 года. "В результате скачка напряжения вышел из строя один из двух турбогенераторов "Туман-2". Электроснабжение было переключено на четыре дизельные электростанции", - сообщала тогда прокуратура. По этому факту было возбуждено уголовное дело о повреждении имущества по неосторожности.

Глава администрации Курильского городского округа считает, что все возможное делалось в этих сложных условиях для поддержания ресурсов электростанции. Турбины "Туманы" - это морально и физически устаревшее оборудование, и не так просто было его использовать на Курилах, когда поблизости нет серьезной ремонтной базы, крупных машиностроительных заводов. Тем не менее, это делали в течение семи лет, - говорит он. Благодаря "Океанской" получен опыт в области геотермальной энергетики, который пригодится при строительстве новой станции бинарного типа. Ее будут возводить на том же месте, и поэтому не потребуется начинать все с нуля. Есть дорога к площадке, кабельная линия. Новым проектом предусмотрено улучшение инфраструктуры. В соседней с Курилами Японии термальная энергия используется более успешно [6].

Предложения предпринимателя (*Цумамист*) из Японии. Источник: Геоэнергетика.



Геотермальные станции в Японии, Источник: jogmec.go.jp

Предприниматель пишет: «... из-за технических неполадок Океанская ГеоЭС на острове Итуруп и Менделеевская ГеоЭС на острове Кунашир не работают. В настоящий момент японское и российское правительства намерены обсудить вопросы по совместной экономической деятельности на южных Курильских островах. В этой связи хочу предложить ... Первая фаза. Ремонт зданий Океанской ГеоЭС и Менделеевской ГеоЭС, демонтаж оборудования на Океанской ГеоЭС и ремонт скважин на Менделеевской ГеоЭС необходимо провести **вместе с японскими предприятиями**, поскольку компании, которые способны это сделать и выполнить сейчас, находятся на восточном Хоккайдо. Благодаря близости возможно легко и быстро мобилизовать буровое оборудование на остров Кунашир. Цель первой фазы – быстрое восстановление первоначальной мощности Океанской ГеоЭС (2,5 МВт) и Менделеевской ГеоЭС (3.6 МВт) которые важны для местных жителей.

Вторая фаза. Для благоприятного развития экономических отношений между Россией и Японией на южных Курильских островах необходимы бесперебойные поставки электроэнергии. Для развития рыбопромышленности, строительства курортных санаториев и новых жилых районов, той мощности электроэнергии, что есть сейчас, не будет достаточно. Поэтому необходимо строить новую ГеоЭС (мощность - около 30МВт) за короткий срок. Мне кажется, лучше построить рядом с Океанской ГеоЭС или Менделеевской ГеоЭС, чтобы сократить расходы на геологоразведку. Я думаю, японская сторона будет согласна поддержать этот пункт в рамках развития совместной экономической деятельности между Россией и Японией. На этом этапе мы можем говорить о доходности новой ГеоЭС (мощность - около 30МВт) как совместного предприятия обеих стран.

Третья фаза. Далее возможно строительство более мощных ГеоЭС (мощностью 80 МВт? 200 МВт) не только на южных Курильских островах, но и на северных и на Камчатке. Считаю, что необходимо использовать следующий тип новых ГеоЭС «Flash steam power stations», большей мощности. Таким образом, появится возможность провести кабели, кото-

рые соединят между собой Камчатский полуостров, северные и южные Курильские острова, города Нэмуро и Кущиро (на Хоккайдо). Это не только обеспечит энергией острова, но и создаст благоприятную возможность для продажи энергии Японии. Думаю, можно назвать этот проект «Второй Энергетический Мост».

При выполнении проекта мы не должны забывать об охране окружающей среды. У японских компаний есть богатый опыт в решении проблем выброса тяжелых металлов во время бурения скважин. Хочу заметить, что такие компании как Mitsubishi Heavy Industries, Toshiba и Fuji Electric занимают 60% мирового рынка в поставках турбин. Надеюсь, что этот проект будет способствовать развитию совместной экономической деятельности России и Японии на южных Курильских островах» [6,7]. Широкое сотрудничество России и Японии в области геотермальной энергетики могло бы помочь эффективному освоению этого вида энергии в районе Курил и Камчатки.

Планы NASA. Весьма рискованные и грандиозные проекты освоения энергии вулканических очагов магмы начаты в Австралии и Исландии. Агентство NASA в США предлагает начать освоение энергетических возможностей крупнейших «спящих» вулканов мира с целью продления их «сна» и добычи электричества.

К настоящему моменту в мире насчитывается 20 супервулканов, и извержение хотя бы одного из них может угрожать человечеству куда серьезнее, чем астероид, считают в агентстве NASA. Особое внимание специалисты NASA уделяют Йеллоустонскому вулкану, расположенному в штате Вайоминг. Размеры кратера вулкана составляют 55 км на 72 км. Его извержение может привести к «вулканической зиме» на Земном шаре. Предлагается «охлаждать вулкан», закачивая воду через скважины в очаги образования гейзеров для усиления их деятельности. Впоследствии с помощью образовавшегося пара планируется добывать электричество.

Если уровень давления достигнет критической точки, то значит, что извержение вулкана неизбежно. В NASA пришли к выводу о том, что извержение вулкана приведет к настоящей ядерной зиме на Земле, разрушив большинство источников питания. Наступит голод. Именно поэтому ученые NASA выдвинули рискованный план, который поможет избежать извержения. Более интенсивный отбор тепла может отсрочить этот момент.

Полагают, что если извлечь достаточное количество тепла, то температура в зоне вулкана снизится, и вероятность его извержения станет меньше. Автор Уилкокс считает, что необходимо снизить температуру и один из возможных вариантов - увеличение объема воды в зоне вулкана. По мере того как она будет превращаться в пар, вода с паром будет уносить тепло в атмосферу. Экологи бьют тревогу, они против проекта в связи с глобальным потеплением. Общественность будет выступать против этого плана, и без того ощущается нехватка пресной воды.

В NASA выдвинули еще один план. Полагают, что возможно пробурить скважину глубиной 10 км внутрь вулкана и закачивать туда воду под давлением. Циркулирующая вода с паром будет выходить при температуре около 350°C, и, таким образом, день за днем выводить тепло из вулкана. Стоимость такого проекта составит около $3,46 млрд. Если пробурить такую скважину, то можно построить геотермальную электростанцию, которая будет генерировать электроэнергию стоимостью около $0,10/кВт. Он также считает, что необходимо стимулировать компании, чтобы те бурили глубже и использовали более горячую воду, чем обычно. Это позволит вернуть первоначальные вложения и генерировать дешёвое электричество в течение достаточно длительного времени – десятков тысяч лет.

В итоге, помимо получения прибыли, это также поможет избежать извержения вулкана. Несомненно, бурение вглубь вулкана связано с множеством рисков. В частности, выражают опасения, не подтолкнет ли это к извержению самого вулкана, которого так опасаются в США. Вынашиваются планы для всех 20 крупных вулканов в мире. Они напоминают, что Йеллоустонский вулкан извергается каждые 600 тыс. лет и с момента последнего извержения прошло около 600 тыс. лет, поэтому нельзя сидеть, сложа руки [8].

Планы эти, на первый взгляд, кажутся фантастическими. Но эта та сказка, которая со временем превратится в быль.

Литература:
1. *Магомедов К.М.* Теоретические основы геотермии. М.: Наука, 2001. 277 с.
2. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
3. Геотермальная энергия (ресурсы, использование, разработка). М.: Мир, 1975. 354 с.
4. *Дегтярев Кирилл.* Тепло Земли. Наука и жизнь, №9, с. 27-31. 2013 г.
5. Прощай, "Океанская". Российская Газета (https://rg.ru/2016/02/25/reg-f...)
6. JOGMEC (http://www.jogmec.go.jp/geothe...)
7. JGA (Japan Geothermal Association) Homepage, (http://www.chinetsukyokai.com/...), (http://www.chinetsukyokai.com/...).
8. (http://www.vestifinance.ru/articles/89823?utm_source=finam).

ИСПЫТАНИЕ УКРУПНЕННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Рамазанов А.Ш.[1,2*], Алхасов А.Б.[1], Атаев Д.Р.[1], Каспарова М.А.[2]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а
e-mail:a_ramazanov_mail.ru
[2] ФГБОУ ВПО Дагестанский государственный университет;
г. Махачкала, Россия; *367021. ул. М.Гаджиева, 43а.*

Спроектирован и изготовлен экспериментальный образец укрупненной лабораторной установки по переработке высокоминерализованных геотермальных вод с получением солей лития и сопутствующих ему ценных компонентов. Разработаны лабораторный технологический регламент, программа и методики испытаний экспериментального образца укрупненной лабораторной установки по переработке редкометального гидроминерального сырья. В результате испытаний укрупненной лабораторной установки отработана технология получения карбоната лития, порошка магнезиального каустического и соли выварочной пищевой из высокоминерализованных геотермальных вод Республики Дагестан.

Геотермальные месторождения Республики Дагестан способны обеспечить получение до 10000 тепловой и 1000 МВт электрической энергии [1,2]. Особенностью минерализованных геотермальных вод (ГТВ) Дагестана является повышенное содержание в них лития и других ценных компонентов, что делает их комплексным сырьем для геотермальной энергетики и химической промышленности [3-8].

В настоящее время эти воды в больших количествах (несколько миллионов $м^3$ в год) попутно добываются с нефтью и сбрасываются на поля фильтрации (Ю-Сухокумское месторождение) или сливаются в Каспийское море (Берикейское месторождение), и из-за высокой минерализации, повышенного содержания неорганических и органических ингредиентов представляют реальную угрозу для окружающей среды. В связи с этим в современных экологических условиях утилизация этих вод после снятия тепловой энергии является вынужденной и актуальной проблемой, в процессе решения которой разрабатываются многие важные вопросы освоения природных вод как ценного гидроминерального сырья.

Наиболее подготовленными к промышленному комплексному освоению являются геотермальные рассолы Берикейского и Тарумовского месторождений и попутные высокоминерализованные воды Южносухокумской группы газонефтяных скважин Северного Дагестана. В ходе выполнения прикладных научных исследований по теме «Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов», шифр темы 2014-14-576-0118-002, № госрегистрации 115011270006. Соглашение от «22» августа 2014 г. № 14.604.21.0120 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы», всесторонне изучены эти месторождения, предложены экономически рентабельные и экологически эффективные методы и технологические решения их комплексного освоения [9]. Изготовлен экспериментальный образец укрупненной лабораторной установки по переработке высокоминерализованных геотермальных вод. На рис. 1 и 2 представлены узлы для проведения стадий водоподготовки, осаждения магния и лития из геотермальных вод.

Рис. 1. Узел водоподготовки: 1 - емкость для воды; 2 – перистальтический насос; 3 - реактор РЭ-0,07 Ф-4 с нагревом; 4 - нутч-фильтр НФП-0.15-500 ПП на колесах; 5 - вакуумный насос; 6 - реакционный аппарат объемом 75 дм^3; 7 – вакуумный ресивер-ловушка.

Рис. 2. Узел осаждения: 1 - перистальтический насос; 2 - емкость для воды; 3 – вакуумный насос; 4 – реакторы объемом 50 дм^3; 5- вакуумный ресивер-ловушка

Проверка показателей назначения экспериментального образца укрупненной лабораторной установки выполняли в соответствии с Лабораторным технологическим регламентом по переработке редкометальных геотермальных вод на укрупненной лабораторной установке [9].

Испытания проводили с использованием ГТВ Берикейского месторождения Республики Дагестан характеризующихся следующим содержанием компонентов, (мг/ дм^3): Li 40; Na^+ 24060; K^+ 590; Ca^{2+}1400; Mg^{2+} 270; Sr^{2+} 260; Rb^+ 3.6; Cs^+ 0.6; Fe 37; HCO_3 1350; Cl^- 41050; Br^- 170; I^- 15-20; H_3BO_3 330; H_2SiO_3 24; окисляемость 720; минерализация 69810; pH 6.7 [5]. Из представленных данных видно, что ГТВ по содержанию лития и других ценных химических компонентов относятся к категории промышленных, однако характеризуются наличием значительных количеств гидрокарбонатов, ионов железа, магния и кальция, растворенных органических веществ, с которыми связана высокая склонность этих вод к солеотложению и коррозионной активности. Кроме того эти компоненты мешают селективному извлечению лития из ГТВ. В связи с чем, в Лабораторном технологическом регламенте предусмотрена стадия водоподготовки ГТВ.

Целевыми продуктами предлагаемой технологии переработки геотермальных рассолов являются карбонат лития и хлорид натрия, попутно – магнезия жженная (рисунок 3.).

Водоподготовка. Для проведения операции водоподготовки в реактор с эрлифтовым перемешиванием закачивали 50 дм^3 ГТВ нагретого до температуры 55± 5^o с pH 6.7, вводили эквивалентное содержанию Fe^{2+} и HCO_3^- количество гидроксида кальция и сжатый воздух для окисления Fe^{2+} в течение 30 минут. При этом протекают процессы, которые схематично можно изобразить следующими уравнениями реакций:

$$4Fe^{2+} + O_2 + 8OH^- + 2H_2O = 4Fe(OH)_3\downarrow \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O \quad (2)$$

В результате водоподготовки образовался 113 г шлама с влажностью 49 %. Твердые фазы $Fe(OH)_3$ и $CaCO_3$ обладают высокими коагуляционными и сорбционными свойствами и способствуют очистке рассола не только от механических примесей, но и от растворенных органических веществ. Шлам можно использовать в качестве стройматериала. Очищенный рассол с pH 8.5 направляли на стадию осаждения магния.

Осаждение магния. Для получения литиевого концентрата, не загрязненного магнием, осаждение магния из 50 дм^3 ГТВ осуществляли в реакторе с мешалкой при температуре 55±5^o с использованием гидроксида кальция по нижеприведенной реакции, избыток $Ca(OH)_2$ составлял 10% от стехиометрии реакции 3:

$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 = Mg(OH)_2\downarrow + CaCl_2 \quad (3)$$

Продолжительность перемешивания раствора с известью составлял 60 мин. Образовавшийся в ходе взаимодействия извести с хлоридом магния осадок сгущали в самом реакторе, затем фильтровали на нутч-фильтре и промывали водой при Т : Ж = 1 : 5. Промытый осадок 82 г с влажностью 60 % высушивали при 100 ^{o}C в течение 60 минут. Выход $Mg(OH)_2$ составил 33 г с 50 дм^3 ГТВ (97.6 %). Продукт отвечает требованиям ГОСТ 1216-87 на «Порошки магнезитовые каустические» (ПМК-87).

Осаждение лития. Суспензией $Al(OH)_3$ и NaCl обрабатывали 50 дм^3 очищенного от магния рассола в реакторе с мешалкой при мольном соотношении LiCl : $Al(OH)_3$ в пульпе 1 : 4, pH 9.0 ± 0.5, температуре 30 ± 5 ^{0}C и продолжительности перемешивания 60 минут.

$$AlCl_3 + 3NaOH = Al(OH)_3\downarrow + 3NaCl \quad (4)$$

$$2Al(OH)_3 + LiCl + 2H_2O = LiCl \cdot 2Al(OH)_3 \cdot 2H_2O\downarrow \quad (5)$$

Степень извлечения лития из рассола в литийалюминиевый концентрат (ЛАК) составил 96.7 %. Полученный ЛАК отделяли от маточного раствора фильтрованием на нутч-фильтре и промывали пресной водой при Т : Ж = 1 : 5, затем повторно фильтровали на нутч-фильтре. Промывные воды направляли на стадию осаждения лития. Маточный раствор направляли на получение хлорида натрия.

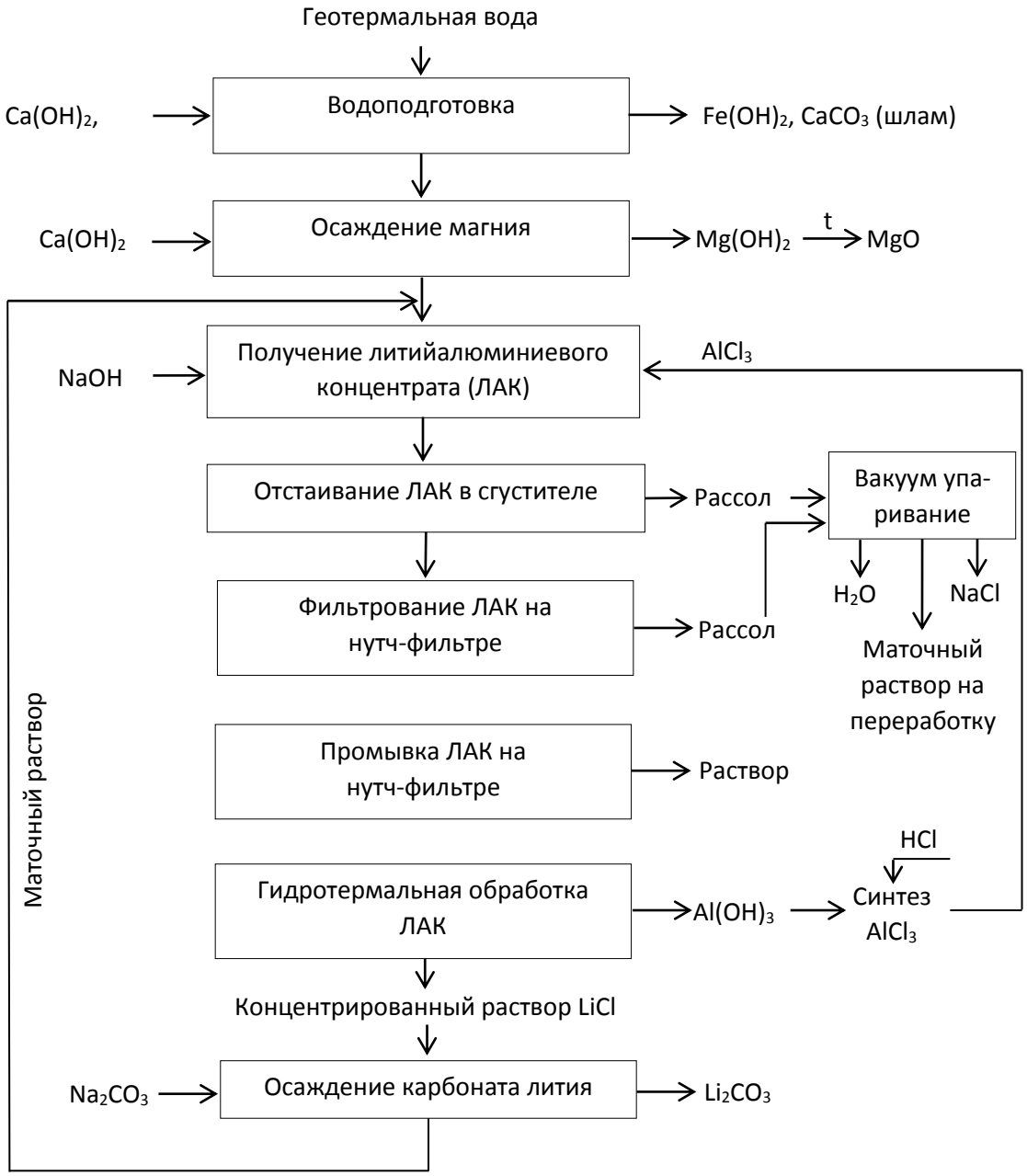


Рис. 1. Технологическая схема получения карбоната лития, магнезии жженной и хлорида натрия из геотермальных минерализованных вод

В ходе испытаний стадии водоподготовки, осаждения магния и лития из ГТВ выполнены по 20 раз целью наработки необходимого количества ЛАК для дальнейшей переработки на карбонат лития.

Гидротермальная обработка ЛАК. Для перевода лития из концентрата в жидкую фазу навеску промытого осадка ЛАК с влажностью 60 % в количестве 300 г (состав, г: LiCl - 13, $Al(OH)_3$ - 94, NaCl - 4, $CaCl_2$ - 0.3, H_2O - 181) загружали в экстрактор типа Сокслет и 10-кратно обрабатывали 300 $см^3$ воды при температуре 100 ^0C. Одним и тем же объемом воды обработали 5 навесок ЛАК, при этом получили 395 $см^3$ водного экстракта с содержанием, $г/дм^3$: LiCl 152, NaCl 33 и $CaCl_2$ 2. Степень извлечения лития из ЛАК в водный раствор составил 98 %.

Получение карбоната лития. Для очистки от примесей кальция 395 $см^3$ концентрированного раствора хлорида лития нагревали до 90 ^0C и при перемешивании подвергали обработке 9 $см^3$ 18 %-го раствора Na_2CO_3.

$CaCl_2 + Na_2CO_3 = CaCO_3\downarrow + 2NaCl$ (6)

Из 404 $см^3$ очищенного от примесей кальция литиевого концентрата содержащего 60 г LiCl получили карбонат лития путем дозирования в него насыщенного раствора карбоната натрия, содержащего Na_2CO_3 на 10 % больше стехиометрического количества необходимого для осаждения Li_2CO_3.

$2LiCl + Na_2CO_3 = Li_2CO_3\downarrow + 2NaCl$ (7)

Осадок Li_2CO_3 48.6 г (выход 93.1 %) отделяли от маточного раствора, промывали ступенчато тремя порциями насыщенного раствора Li_2CO_3 при Т:Ж=1:5, в порядке снижения концентрации натрия в каждой порции промывной воды, после чего Li_2CO_3 сушили при 100 ^{0}C. Промывные воды направляли на стадию осаждения лития. Часть влажного Li_2CO_3 использовали для приготовления насыщенного раствора Li_2CO_3. В высушенном продукте содержание основного вещества - Li_2CO_3 составляла не ниже 99.7 %.

Получение хлорида натрия. 10 $дм^3$ ГТВ после извлечения лития с содержанием, г/$дм^3$: NaCl 64, $CaCl_2$ 5; pH 9.0±0.5 направляли на получение хлорида натрия вакуум-упариванием. Процесс упаривания проводили при температуре 55±5 ^{0}C и вакууме 90 мм.рт.ст. При десятикратном упаривании рассола, т.е. до 1-го $дм^3$, высаливался NaCl до 450 г , выход 70 %. Влажную соль промывали трижды насыщенным раствором NaCl при Т:Ж=1:2, сушили при 100 ^{0}C. В высушенном продукте содержание основного вещества - NaCl составляла не ниже 99.0%.

Промывные воды объединяли с маточным рассолом. Дистиллированная вода может быть использована для нужд производства, а сконцентрированный маточный рассол для извлечения рубидия, цезия и других ценных компонентов.

Приготовление раствора хлорида алюминия. 268 г осадка гидроксида алюминия с влажностью 60%, полученного после выщелачивания хлорида лития из ЛАК гидротермальной обработкой в экстракторе типа Сокслет, растворяли в 368 $см^3$ 30%-ной соляной кислоты в герметичном кислотоупорном реакторе при температуре 100-110 ^{0}C. После 3-х часового перемешивания останавливали мешалку и отстаивали осадок.

$Al(OH)_3 + 3HCl = AlCl_3 + 3H_2O$ (8)

Осветленный раствор хлорида алюминия направляли на осаждение лития, а осадок не растворившегося гидроксида алюминия оставляли в мешалке, к нему добавляли свежую порцию $Al(OH)_3$ и HCl и нарабатывали следующую порцию раствора $AlCl_3$.

Приготовление известкового молока. Известь гасили в реакторе с якорной мешалкой перед опытами водоподготовки и осаждения магния. Для гашения извести использовали ГТВ, очищенную от магния. Весовое отношение Ж : Т = 2 : 1 (два объема воды на 1 вес извести). Приготовленное известковое молоко подвергали гидравлической сепарации для отделения недопала и силикатов.

При проведении испытаний в качестве реагентов для осуществления технологических операции использованы: известь для водоподготовки и осаждения магния; для осаждения лития - гидроксид натрия и хлорид алюминия, который синтезируется растворением гидроксида алюминия в соляной кислоте; карбонат натрия для получения карбоната лития (таблица 1).

Таблица.

Расход реагентов на переработку 1 $м^3$ Беркейского рассола

Реагент	Цена, руб./кг	Операция	Расход, кг	Стоимость, руб.
Известь (CaO), ГОСТ 9159	4.5	Водоподготовка Осаждение Mg^{2+}	0.68 0.70	3.1 3.2
Гидроксид алюминия ($Al(OH)_3$), ТУ-48-5-128-79*	75	Осаждение Li^+	0.06	4.5
Кислота соляная (HCl), ТУ-193-80	8	Осаждение Li^+	2.91	23.3
Натрий едкий (NaOH), ГОСТ- 2263-71	15	Осаждение Li^+	3.2	47.9
Сода кальцинированная (Na_2CO_3), ГОСТ 5100 - 85	18	Осаждение Li_2CO_3	0.33	5.9

***** Оборотный $Al(OH)_3$

Из данных представленных в таблице видно, что затраты на реагенты в основном связаны с расходом NaOH на синтез свежеосажденного активного $Al(OH)_3$ нейтрализацией $AlCl_3$. Замена NaOH (3.2 кг) на эквивалентное количество CaO (2.2 кг) приведет к снижению затрат на щелочь примерно в пять раз. Для снижения затрат на реагенты существует и другой вариант, т.е. можно организовать синтез католитной щелочи электролизом очищенного от магния и щелочноземельных металлов соответствующего объема рассола. При этом попутно будут получены Cl_2 и H_2 для синтеза необходимого количества кислоты соляной.

В заключение можно отметить, что в результате испытаний экспериментального образца укрупненной лабораторной установки по переработке высокоминерализованных геотермальных вод: отработана технология получения карбоната лития, порошка магнезитового каустического и соли пищевой из ГТВ Республики Дагестан; уточнены технологические режимы процессов и операций; наработана товарная продукция (карбонат лития – 190 г, порошок магнезиальный каустический – 450 г, соль поваренная пищевая – 450 г); определены выход продукции и их качество; определен расход реагентов; определено количество и химический состав технологических отходов; накоплен опыт работы и управления технологическим процессом.

Результаты испытаний легли в основу разработанного «Способа получения литийалюминиевого концентрата из литийсодержащих природных рассолов и его переработки на карбонат лития» [10]. Кроме того, полученные данные являются основой для разработки проекта Технического задания на проведение опытно-конструкторских работ «Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов».

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI60414X0120.

Литература:

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М., Физматлит, 2008. – 376 с.
2. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001. 260 с.
3. Сорбционное извлечение лития из геотермальных вод хлоридного типа / Рамазанов, А.Ш. Каспарова М.А., Сараева И.В. и др. // Вестник Дагестанского научного центра. 2010. № 37. – С.23-28.
4. Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А.Каспарова // Теплоэнергетика, 2015, № 6. С. 11-17. DOI: 10.1134/S0040363615060016.
5. Комплексная переработка минерализованных геотермальных вод / А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова, И.В. Сараева, А.Б. Алхасов, О.М. Рамазанов // Экология и промышленность России. 2016. Т.20, № 2. – С.14-17.
6. Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского геотермального месторождения / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А.Каспарова // Теплоэнергетика, 2016, № 6. С. 25-30. DOI: 10.1134/ S0040363616060011.
7. Комплексное освоение геотермальных ресурсов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, Р.М. Алиев, А.Ш. Рамазанов // Юг России: экология, развитие. 2016. Т.11, № 1, – С.149-158.
8. Решение экологических проблем при комплексном использовании геотермальных минерализованных вод Северного Дагестана / А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова, И.В. Сараева,

А.Б. Алхасов, О.М. Рамазанов, М.И. Ахмедов // Юг России: экология, развитие. 2016. Т.11, № 4. – С.129-138. DOI: 10.18470/1992-1098-2016-4-129-138.

9. Отчет о прикладных научных исследованиях по теме «Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов», шифр темы 2014-14-576-0118-002. № госрегистрации 115011270006.
10. Заявка № 2016151960. Способа получения литийалюминиевого концентрата из литийсодержащих природных рассолов и его переработки на карбонат лития / А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова, Д.Р. Атаев. Заявл. 27.12.2016.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ ДАГЕСТАНА: БИОРАЗНООБРАЗИЕ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БИОТЕХНОЛОГИИ

Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З.,
Абакарова А.А., Аливердиева Д.А., Магомедов М.-Р.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН
367000 Махачкала, ул. Гаджиева, 45. E-mail: islammagomedova@mail.ru

Изучение микробных сообществ геотермальных вод является актуальной научной и практической задачей. Проведеноисследование микробных сообществ геотермальных вод и соленых озер в регионах Дагестана. Впервые выделены и идентифицированы из геотермальных источников денитрифицирующие органотрофные непатогенные амилазо - и протеазопродуцирующие штаммы рода *Staphylococcus*, нокардиоморфные актиномицеты родов *Nocardia, Rhodococcus, Corynebacterium*, *Propionibacterium*; соленых озер – представители рода *Bacillus, Virgibacillus, Halomonas,* обладающие свойствами промышленных микроорганизмов. Результаты исследований позволяют расширить знания о фенотипической дифференциации микробных сообществ геотермальных источников Дагестана и представляют интерес для практического применения в биотехнологии. Комплексные теоретические и экспериментальные исследования механизмов влияния органических и минеральных веществ геотермальных вод на метаболизм дрожжей рода *Saccharomyces* послужили основанием для создания биотехнологий получения биохимически активных штаммов дрожжей и этанола. Обсуждается создание экологически безопасных и высокоэффективных технологий получения альтернативных источников энергии, таких как биоэтанол и биотопливо, которые позволят решать эколого-экономические и социальные проблемы Дагестана.

Одной из проблем, успешное решение которой будет иметь определяющее значение для дальнейшего развития мирового сообщества, является целесообразное использование возобновляемых ресурсов (Фортов, Попель, 2014). Доминирующим в ряде стран становится применение экологически безопасных геотермальных технологий (Алхасов, 2010). Основой использования и охраны подземных вод являются закономерности их формирования и геологической деятельности в связи с природными условиями и возрастающими во времени техногенными факторами. Изучение микробных сообществ, ассоциированных с подземными водами, общепризнанно является актуальной научной и практической проблемой (Tin et al., 2011). Разносторонний характер воздействий термальных вод на микробные сообщества представляет интерес для изучения экологии и биоразнообразия микроорганизмов. Представители некоторых бактерий характерны для антропогенных экосистем и природных источников в экстремальных условиях (Kumar et al., 2014; Romanovskaya et al., 2014). В настоящее время актуален поиск микроорганизмов, являющихся источниками термоустойчивых ферментов промышленного значения.

В геологическом отношении Дагестан уникален, так как располагается на стыке двух крупнейших геологотектонических структур (Кавказской геосинклинали и Русской платформы) (Залибеков З.Г., 2009; Идрисов И.А., 2013). Нефтегазоносные пласты являются природными пулами таких уникальных микроорганизмов, как углеводородокисляющие бактерии. Они широко распространены в аридных условиях, поскольку способны усваивать многие труднодоступные для большинства других микроорганизмов субстраты: углеводороды нефти, озокериты, смолы, фенольные соединения, гумусовые вещества, лигнин и его производные, воска и др. Исследование структуры микробных сообществ, ассоциированных с высокотемпературными и экологическими нишами, и их разнообразие представляет интерес для фундаментальной микробиологии. Однако Северный Кавказ, уникальная геотермальная провинция России, остается малоисследованным (Халилова и др., 2014).

Особое место занимает проблема использования геотермальных вод в промышленных биотехнологиях. Известно, что термальные воды Дагестана являются перспективным промышленным гидроминеральным сырьем с высоким содержанием редких металлов, используются для генерации тепловой, электрической энергии и т.д. (Алхасов, 2010; Курбанов, 2001; Рамазанов и др., 2010; Идрисов, 2013; Булаева, 2013). На основе многолетних исследований механизмов влияния органических и минеральных веществ геотермальных вод на метаболизм дрожжей создано научное направление «Геотермальные воды в биотехнологических процессах» (Абрамов и др., 1995; 1998; 2009; Халилова и др., 2016; Исламмагомедова Э.А. и др., 2016).

В работе использовались подземные воды различного состава. Это среднеминерализованные геотермальные воды Махачкалинского месторождения (скважины № 26 и № 36), низкоминерализованная вода Кизлярского месторождения (скважина № 7-Т) и высокоминерализованная вода Берикейского месторождения. Объектами исследования являлись: микрофлора геотермальных вод скважины № 7-Т Кизлярского месторождения, скважины № 36 Махачкалинского месторождения, соленого озера Берикейского месторождения; штаммы дрожжей *Saccharomyces,* хранящиеся во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ГНИИ генетики и в коллекции микроорганизмов Прикаспийского института биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН.

Изучение свойств бактерий, выделенных из геотермальной воды скважины Кизлярского месторождения № 7-Т, позволило идентифицировать виды, относящиеся к группам: нокардиоморфные актиномицеты, грамположительные неспорообразующие палочки неправильной формы и микобактерии (табл. 1). Бактерии рода *Corynebacterium* - ферментирующие, нелиполитические, разлагают углеводы. Изоляты нокардиоморфных актиномицетов родов *Nocardia, Rhodococcus* и *Micobacterium* способны разлагать химически инертные соединения при загрязнении природных объектов нефтепродуктами и могут быть использованы для биоремедиации земель. Известны исследования подобных культур нефтеокисляющих бактерий рода *Rhodococcus* и *Pseudomonas sp.,* выделенных из геотермального источника (Карпенко и др., 2006.). Штаммы *Rhodococcus,* благодаря их экологически важной способности метаболизировать в качестве единственных источников углеродного питания газообразные н-алканы, характеризуются локальным распределением в природе и занимают доминирующее положение в естественном биоценозе районов углеводородных скоплений, представляющего собой своеобразный природный катаболический экран защиты атмосферы от газообразных углеводородов. Известно, что доминантный вид *R. Rhodochrous* рекомендуется как биоиндикатор газовых углеводородных аномалий. Обнаружен типовой вид *Propionibacterium freudenreichis.*

Таблица 1.

Микроорганизмы, изолированные из геотермальных источников Прикаспийской низменности

Месторасположение геотермального источника	**Характеристика воды**			**Изолированные штаммы**
	состав	**pH**	**T^{0}C**	
Геотермальный источник Кизлярского месторождения № 7-Т Высота н.у.м.-6 м Широта, долгота 43^{0}50′49″с. ш. 46^{0}42′52″в. д. **Водоносный горизонт 2900 м**	**M $_{2,1}$HCO$_3$48 Cl46 SO$_4$7 Na 97**	**7,2**	**98^0 C**	***Nocardiaasteroidas, Nocardiatransvalensis,Rhodococcusrhodochrous, Rhodococcusmaris, Rhodococcusluteus,Rhodococcusterrae, Rhodococcusbrouchialis, Corynebacteriumbovis, Corynebacterium diphtheria,*** *Propionibacteriumfreudenreichi**s, Mycobacterium marinum***
Геотермальный источник Махачкалинского месторождения № 36 Высота н.у.м.-18 м Широта, долгота 42^{0}58′34″с. ш. 47^{0}30′08″в. д. Водоносный горизонт 1292-1047 м	**M $_{6,5}$Cl50 SO$_4$35 (HCO$_3$15) Na 97**	**7,5 - 8,0**	**56^0 C**	***Staphylococcus hominis***
Высокоминерализованная вода Берикейского месторождения Высота н.у.м.-18 м Широта, долгота 42^{0}13′25″с. ш. 48^{0}04′38″в. д.	**Минерализация 70 - 75 г/л**	**6,4 - 6,5**	**50-60^0 C**	***Bacillus cereus, Virgibacillussalaries, Virgibacillusmarismortui, Virgibacillusolivae, Halomonasventosae, Halomonasgomseomensis, Halomonaselongata***

У всех пропионовокислых бактерий обнаружены супероксиддисмутазная, каталазная и пероксидазная активности, которые являются основой прогноза возможных загрязнений атмосферы, причем среди актиномицетов широко распространена гетеротрофная фиксация CO_2. Выделенные из геотермальной воды Махачкалинского месторождения скв. № 36 солеустойчивые штаммы (10-15 % NaCl) слабо алкалофильны, обладают амилолитической и протеолитической активностью, относятся к роду *Staphylococcus*, филогенетической линии *Firmicutes* - *S. hominis* subsp. *Hominis* и *S. hominis* subsp. *novobiosepticus*. Представители *Staphylococcus* характерны для геотермальных источников Индии и Японии, вулканических почв Камчатки, засушливых пустынь Атакамы, биотопов Антарктики, Мертвого моря и др. (Dickinsonetal., 2016; Aszalósetal., 2016). Установлено, что культуры обнаружили высокий уровень сходства последовательностей (99,9 %) с *Staphylococcus hominisM53 JX312632* из го-

рячего геотермального источника Manirakan (штат Химачал, Индия) (Kumar et al., 2014). Основными источниками для изоляции галофильных и галотолерантных микроорганизмов являются соленые озера (Delgado-García, 2015). Из высокоминерализованного озера Берикейского месторождения изолированы галотолерантные бактерии *Bacillus cereus, Virgibacillus salaries, Virgibacillus marismortui, Virgibacillus olivae, Halomonas ventosae, Halomonas gomseomensis, Halomonas elongate,* выдерживающие высокую температуру и минерализацию воды.

Изучение биоразнообразия и структуры микробных сообществ, выделенных из геотермальных источников Дагестана, представляет научный интерес с точки зрения поиска новых штаммов, эффективных в биотехнологической практике. Так, *Staphylococcus hominis,* являющийся доминирующим видом бактерий в источнике геотермальной воды Махачкалинского месторождения, обладает способностью к продуцированию амилазы и протеазы. В настоящее время амилаза может быть применена для гидролиза растительных и животных субстратов в пищевой и текстильной промышленности, топливном производстве; протеаза – в пищевой, химической, фармацевтической, кожевенной промышленности. Выделенные из щелочного геотермального источника Кизлярского месторождения нокардиоморфные актиномицеты и бактерии из соленого озера Берикейского месторождения обладают свойствами промышленных микроорганизмов и могут быть использованы в технологических схемах очистки воды и почвы, для получения биологически активных веществ.

Применение геотермальных вод и альтернативного сырья растительного происхождения - биомассы микроводорослей с высоким содержанием липидов в настоящее время является актуальным для создания энергоэффективной технологии получения биотоплива. Обнаружено, что морская и геотермальная воды в составе среды культивирования микроводорослей *Nannochloropsis salina,* в сочетании с дополнительно внесенной минеральной композицией, способствуют физиологической активности и сокращению длительности процесса роста популяции, что отразилось на динамике накопления биомассы и синтезе липидов (Магомедов и др., 2013). Конструирование ресурсосберегающей технологии производства высоколипидных микроорганизмов с применением морских, артезианских, геотермальных ресурсов представляет научный и практический интерес.

Актуальной задачей является использование экологически безопасных технологий с использованием геотермальных вод. Комплексные теоретические и экспериментальные исследования механизмов влияния органических и минеральных веществ геотермальных вод на метаболизм дрожжей рода *Saccharomyces* послужили основанием для создания биотехнологий различного назначения (табл. 2). На основе использования многофункциональных компонентов термальной воды разработаны ресурсосберегающие технологии получения биохимически активных и высокопродуктивных прессованных и сушеных хлебопекарных дрожжей; технология получения хлебобулочных изделий, расширяющих ассортимент диетической продукции; технология биосинтеза этанола, направленная на более эффективное применение отходов производства сахарной промышленности и позволяющая увеличить на 25% выход спирта улучшенного качества с низким содержанием примесных соединений; технология получения технического спирта (Абрамов и др., 1995; 1998; 2009). В настоящее время технический этанол в качестве оксигената является одним из перспективных компонентов моторного топлива (Jianming et al., 2011). Применение разработанной технологии получения спирта с использованием термальных ресурсов открывает возможности для создания высокоэффективных предприятий по производству топливного этанола в Дагестане. В целях обеспечения экологической безопасности исследованы сточные воды производства хлебопекарных дрожжей, основанном на использовании геотермальных вод.

Таблица 2.

Инновационные проекты лаборатории биохимии и биотехнологии на основе использования геотермальных вод Дагестана

Патенты РФ на изобретение	**Краткое описание изобретения**	**Состав геотермальной воды, источник**
А.с. СССР №1730140 Питательная среда для выращивания дрожжей (1992г)	Использование геотермальной воды в качестве нового дешевого источника минерального питания дрожжей позволяет снизить себестоимость продукции	$M_{6.5}\underline{Cl50\ SO_4 35\ (HCO_3 15)}$ Na 97 $T56^0$ pH 7.4 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 36
Патент РФ №2035865 Способ производства хлеба из пшеничной муки (1995г)	Применение геотермальной воды ускоряет процесс тестоведения и улучшает качественные показатели хлеба	$M_{6.5}\underline{Cl50\ SO_4 35\ (HCO_3 15)}$ Na 97 $T56^0$ pH 7.4 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 36
Патент РФ №2084519 Способ получения питательной среды для выращивания хлебопекарных дрожжей (1997г)	Использование геотермальной воды позволяет создать сбалансированную питательную среду для выращивания дрожжей	$M_{6.5}\underline{Cl50\ SO_4 35\ (HCO_3 15)}$ Na 97 $T56^0$ pH 7.4 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 36
Патент РФ №2151795 Способ получения сушеных дрожжей (2000г)	Использование среды, где в качестве минерального и органического питания применяется геотермальная вода, позволяет получить активные сушеные дрожжи	$M_{5.2}\underline{SO_4 46Cl\ 29\ HCO_3 25}$ Na 98 $T54^0$pH 7.7 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 26
Патент РФ №2188232 Штамм дрожжей *Saccharomyces oviformis Y-2635* для производства хлебопекарных дрожжей (2002г)	Штамм *S. oviformis Y-2635*, полученный при культивировании на мелассной среде с геотермальной водой, характеризуется высокой продуктивностью	$M_{5.2}\underline{SO_4 46Cl\ 29\ HCO_3 25}$ Na 98 $T54^0$pH 7.7 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 26
Патент РФ №2329302 Способ сбраживания мелассного сусла (2008г)	Сбраживание мелассного сырья с применением геотермальной воды способствует повышению синтеза этанола и снижению образования побочных метаболитов	$M_{5.2}\underline{SO_4 46Cl\ 29\ HCO_3 25}$ Na 98 $T54^0$pH 7.7 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 26
Патент РФ №2495117 Наливка «Солнечный Дагестан» (2013г)	Создание яблочно – виноградной наливки с использованием спирта, полученного на основе геотермальной воды, позволяет расширить ассортимент элитной продукции	$M_{5.2}\underline{SO_4 46Cl\ 29\ HCO_3 25}$ Na 98 $T54^0$pH 7.7 геотермальный источник Махачкалинского место-рождения № 26

Патент РФ №2492229 Штамм дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, используемый для получения спирта (2013г)	Штамм, сбраживающий концентрированное мелассное сусло с геотермальной водой, позволяет интенсифицировать процесс получения спирта	$M_{2.1}\underline{HCO_3 48\ Cl 46\ SO_4 7}$ Na 97 $T98^0$ pH 7.15 геотермальный источник Кизлярского месторождения № 7-Т
Патент РФ №2495936 Способ получения этанола (2013г)	Способ получения этанола с использованием геотермальной воды в составе среды выращивания дрожжей обеспечивает более полное сбраживание углеводов, повышение содержания технического спирта и снижение количества примесных соединений	$M_{2.1}\underline{HCO_3 48\ Cl 46\ SO_4 7}$ Na 97 $T98^0$ pH 7.15 геотермальный источник Кизлярского месторождения № 7-Т

Установлено, что при соответствующей обработке сточные воды можно использовать в безотходном производстве для получения кормовых добавок в животноводстве (Абрамов и др., 1998). Использование геотермальной воды в качестве нового дополнительного источника питания дрожжей позволит снизить затраты на приобретение вспомогательных материалов, исключить блок дорогостоящего оборудования, увеличить выход конечной продукции. Потребителями продуктов новых технологий могут являться пищевая, косметическая, медицинская отрасли промышленности. Применение экологически безопасных технологий получения таких альтернативных источников энергии, как биоэтанол, биогаз, биотопливо, открывает возможности для создания высокоэффективных предприятий, и позволяет решать эколого-экономические и социальные проблемы как в Дагестане, так и в других регионах России, где имеются геотермальные ресурсы.

Литература:

1. *Абрамов Ш.А., Котенко С.Ц., Эфендиева Д.А., Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Дунова С.М.* Новая питательная среда для выращивания дрожжей // Прикладная биохимия и микробиология. 1995. Т. 31. № 2. С. 232-233.
2. *Абрамов Ш.А., Аливердиева Д.А.* 1998. О сточных водах производства дрожжей при использовании геотермальных источников // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 2. С. 11-13.
3. *Абрамов Ш.А., Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Котенко С.Ц., Магадова С.А.* Биотехнология активного синтеза этанола в сбраживаемой среде на основе использования геотермальной воды нефенольного класса // Вестник Дагестанского научного центра. 2009. № 34. С.21-28.
4. *Алхасов А.Б.* Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии // Известия Российской Академии наук. Энергетика. 2010. № 1. С. 59-72.
5. *Булаева Н.И.* Комплексный мониторинг геотермальных ресурсов Дагестана и разработка информационного обеспечения исследований // Мониторинг. Наука и технологии. 2013. № 3. С. 19-29.
6. *Залибеков З.Г.* Аридные земли мира и их динамика в условиях современного климатического потепления // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 1 (46). С.5-13.
7. *Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А, Котенко С.Ц.* Использование геотермальных вод Дагестана в научных исследованиях и биотехнологических процессах // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 2 (67). С. 63-71.
8. *Идрисов И.А.* О структуре рельефа юго-запада Прикаспийской низменности // Аридные экосистемы. *2013.* Т. 19. №1 (54). С. 36-43.

9. *Карпенко Е.В., Вильданова-Марцишин Р.И., Щеглова Н.С., Пирог Т.П., Волошина И.Н.* Перспективы использования бактерий рода *Rhodococcus* и микробных поверхностно-активных веществ для деградации нефтяных загрязнений // Прикладная биохимия и микробиология. 2006. Т. 42. № 2. С. 175-179.
10. *Курбанов М.К.*. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука. 2001. 260 с.
11. *Магомедов М.-Р.Д., Власова О.К., Гасанова А.Ш.* Геотермальные воды и микроводоросли *Nannochloropsis salina* // Первый международный форум «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности». Москва. 2013. С. 397-398.
12. *Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А., Сараева И.В., Атаев Д.Р., Ахмедов М.И., Камалутдинова И.А.* Сорбционное извлечение лития из геотермальных вод хлоридного типа // Вестник Дагестанского научного центра. 2010. № 37. С. 23-28.
13. *Халилова Э.А., Нуратинов Р.А., Котенко С.Ц., Исламмагомедова Э.А.* Углеводородо-окисляющие микроорганизмы геотермального источника и их значение в оценке биоразнообразия микробных сообществ // Аридные экосистемы. 2014. № 1 (58). С. 51-58.
14. *Халилова Э.А, Турова Т.П., Котенко С.Ц., Исламмагомедова Э.А., Аливердиева Д.А.* Амилазо – и протеазопродуцирующие бактерии *Staphylococcus* в геотермальном источнике Махачкалинского месторождения (Дагестан) // Микробиология. 2016.Т. 85. № 2. С. 219-222.
15. *Aszalós J.M., Krett G., Anda D., Márialigeti K., Nagy B., Borsodi A.K.* Diversity of extremophilic bacteria in the sediment of high-altitude lakes located in the mountain desert of Ojos del Salado volcano, Dry-Andes // Extremophiles. 2016. V. 20. № 5.P. 603–620.
16. *Delgado-GarcíaM.* Isolation and Screening of Halophilic Bacteria for Production of Hydrolytic Enzymes // Halophilic. Biodiversity and Sustainable Exploitation. 2015. V. 6. P. 379-401.
17. *DickinsonI., Goodall-Copestake*W., Thorne *M.A.*,Schlitt *T.*, Ávila-Jiménez*M.L.*, Pearce *D.A.* Extremophiles in an Antarctic Marine Ecosystem // *Microorganisms.*2016. V. *4* (1). P. 8-18.
18. *Jianming Y., Shoubao Y., Pingchao W.* Method for using corn stalk fiber carrier to prepare immobilized yeast cells employed in kitchen waste fermentation for ethanol fuel production / Patent CN № 102199631. 2011.
19. *Kumar M., Nath Yadav A., Rameshwar T., Prasanna R., Kumar A., Saxena A.K.* Deciphering the diversity of culturablethermotolerant bacteria from Manikaran hot springs // Annalis of Microbiology. 2014. V. 64. № 2.P. 741-751. ISSN 1590-4261.
20. *Romanovskaya V., Gladka G., Tashyrev* O. Autecology of microorganisms of coastal ecosystems of the dead sea // Ecological Engineering and Environment Protection. 2014. № 1. P. 44-49.
21. *Stackebrandt E., Goebel B.M.* Taxonomic note: A place for DNA-DNA reassociation and 16S rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology // Int. J. Syst. Bacteriol. 1994. V. 44. № 4. P. 846-849.
22. *Tin S., Bizzoco R.W., Kelley S.T.* Role of the terrestrial subsurface in shaping geothermal spring microbial communities // Environmental Microbiology Reports. 2011. 3 (4). P. 491–499.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Алхасов А.Б.[1,2], Зайченко В.М.[2]

[1]ФБГУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а, alibek_alhasov@mail.ru
[2]Объединенный институт высоких температур РАН

Аннотация. Ррассмотрены приоритетные направления развития новых методов распределенной энергетики на основе биоэнергетики применительно к условиям России. Созданы научные основы безотходной технологии термической конверсии биомассы с получением высококалорийного энергетического газа и созданы установки, реализующие данную технологию. Выполнен комплекс исследований по созданию нового направления торрефикации, обеспечивающий сокращение затрат на хранение и перевозку пеллетизированного топлива и повышение его теплотехнических характеристик. Для бесперебойного энергоснабжения потребителей наиболее перспективными являются технологические системы, использующие два и более вида ВИЭ. Предложена технология переработки органических отходов с использованием тепла термальных вод. Такая технология позволяет эффективно утилизировать биомассу и использовать термальные воды с температурой 70…100 ºС для получения электроэнергии. Высокая эффективность освоения гидрогеотермальных ресурсов достигается при их комплексном использовании в ЭБК. Рассмотрена возможность создания ЭБК на Речнинском геотермальном месторождении.

Использование местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является в настоящее время приоритетным направлением модернизации существующей системы энергообеспечения. Этот подход активно развивается во многих странах мира, является актуальным и для нашей страны. Обеспечивать энергоснабжение потребителей, находящихся на значительном расстоянии от места добычи ископаемых топлив экономически не выгодно, из-за значительных транспортных расходов на их доставку до места назначения. Сравнение технико-экономических характеристик различных методов и технологий получения энергии показывает [1], что строительство и реконструкция крупных системообразующих электростанций на твердом и газовом топливах окупаются, примерно, за 50 лет. При существующих тарифах эксплуатация данных станций оказывается убыточной. Чтобы обеспечить приемлемые значения основных критериев эффективности инвестиций в реконструкцию и сооружение энергообъектов используется, так называемый ДПМ (договор поставки мощности), что является по сути дела бюджетным датированием энергетической отрасли. За счет бюджетных дотаций тарифы на отпуск электроэнергии новых электростанций устанавливаются в 2…2,5 раза выше рыночных. При этих условиях срок окупаемости затрат на сооружение и реконструкцию станций обеспечивается на уровне 15..18 лет, то есть не более половины расчетного периода эксплуатации энергетического оборудования (обычно для крупных электростанций – это 40 лет).

Создание автономных электростанций непосредственно для энергоснабжения отдельных потребителей с экономической точки зрения оказывается более выгодным. Установки с применением газопоршневых двигателей и различных ВИЭ обеспечивают получение электроэнергии, себестоимость которой меньше, чем предлагаемые потребителям тарифы в энергосистеме. Сроки окупаемости инвестиций в автономные энергообъекты на основе ВИЭ оказываются ниже, а индексы доходности выше, чем при сооружении традиционных электростанций большой мощности. Удельные капитальные вложения в создание автономных энергообъектов имеют, как правило, аналогичные или даже меньшие значения.

Таким образом, распределенное энергоснабжение, составной частью которого является возобновляемая энергетика, обеспечивает более выгодное с экономической точки зрения получение электроэнергии по отношению к централизованной энергосистеме, работающей на

ископаемых топливах. При этом использование ВИЭ позволяет в значительной степени сократить экологическую нагрузку на окружающую природную среду.

Актуальной задачей сегодняшнего дня является организация местного, локального энергоснабжения. Местное энергоснабжение подразумевает производство энергии без привозного органического топлива, в том числе, использование ВИЭ и энергетическую утилизацию различного вида отходов. Энергетическая утилизация отходов, к которым относятся древесные и сельскохозяйственные отходы, твердые бытовые отходы и отходы жизнедеятельности позволит решить значительные экологические, экономические и социальные проблемы многих регионов России. За рубежом основное внимание при организации распределенного энергоснабжения отводится ветро-солнечным установкам. Наоборот, для нашей страны развитие биоэнергетики может играть определяющую роль в создании системы распределенного энергоснабжения.

Далее рассмотрены приоритетные направления развития новых методов распределенной энергетики применительно к условиям России.

1. Разработка автономных энергетических комплексов для производства электрической и тепловой энергии с использованием местных видов топлива (торф, древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности различных видов)

В России сосредоточено около 47% мировых запасов торфа и 23% древесины. Ежегодный прирост торфа в России оценивается в 270–280 млн. тонн. От этого возобновляемого ресурса в энергетике страны используется доли процента. Для получения электрической энергии из местных топливно-энергетических ресурсов необходимо на первой стадии получить энергетический газ, который может использоваться в когенерационных газопоршневых и газотурбинных установках для производства тепловой и электрической энергии. Устаревшие технологии газификации и пиролиза для этих целей не могут быть использованы. При пиролизе продуктами реакции являются газообразное топливо, жидкие и твердые продукты. Утилизация жидкой фазы, образующейся при пиролизе, представляет достаточно сложную и затратную задачу. В силу этих причин технологии пиролиза не получили практического применения. В процессе газификации газообразные продукты реакции на 50–60% состоят из водорода и окиси углерода, остальное – азот. Использование газа с низкой теплотой сгорания в современных энергетических агрегатах, рассчитанных на высокие тепловые нагрузки, неэффективно. При этом продукты газификации содержат определённое количество жидкой фазы, что не позволяет использовать газообразные продукты в газопоршневых и газотурбинных установках.

Для энергетического использования продуктов переработки биомассы необходимо получение газа не содержащего жидкой фазы, при этом с достаточным уровнем теплосодержания, обеспечивающий возможность его использования в современном энергетическом оборудовании.

В настоящее время работы по созданию технологий термической конверсии биомассы с получением энергетического газа с повышенными теплотехническими характеристиками проводятся во многих исследовательских центрах. Научные основы такой технологии созданы в Объединенном институте высоких температур РАН. Данная технология позволяет получить высококалорийный энергетический газ из биомассы. Количество выделяющихся газов – около 1,4 $нм^3$ на кг исходного продукта, а теплота сгорания получаемого газа – около 3000 ккал/$нм^3$. По составу получаемая газовая смесь на 92–96% состоит из окиси углерода и водорода.

Данная технология позволяет осуществить эффективную безотходную переработку местных топливно-энергетических ресурсов: торфа, древесных и сельскохозяйственных отходов с получением высококалорийного энергетического газа, который непосредственно может быть эффективно использован для производства электрической и тепловой энергии, в том числе в мини-ТЭЦ на базе газопоршневого двигателя.

К настоящему времени в ОИВТ РАН созданы установки, реализующие данную технологию, мощностью 10–50 кВт. Необходима опытно-промышленная отработка данной технологии, создание типоразмерного ряда установок данного назначения, например 20, 50, 100, 200 и 300 кВт, отработка конструкции данных установок и переход к организации промышленного производства установок данного назначения.

Разработка и создание технологий получения из местных топливно-энергетических ресурсов (биомассы) газового топлива и создание на этой базе объектов распределенной генерации является одной из приоритетных задач, решаемых в настоящее время во многих промышленно развитых странах. Потенциальный рынок установок, осуществляющих процесс конверсии биомассы в электрическую энергию,оценивается в настоящее время в Европе $ 4 – 8 млрд. в год. Мы опережаем существующий зарубежный уровень разработок по данной тематике.

Одним из важнейших применений разрабатываемой технологии является замена угля и жидких топлив на продукты конверсии биомассы в системе теплоснабжения. Тарифы во многих случаях не покрывают затраты на получение тепловой энергии при использовании угля в качестве топлива, который доставляется за тысячи километров. Значительной нагрузкой для бюджета является использование для теплоснабжения жидких топлив: солярки, мазута, печного жидкого топлива. При этом многие котельные, использующие привозной уголь и жидкие топлива, находятся в непосредственной близости от торфяных месторождений, либо других возможных источников биомассы, включая древесные и сельскохозяйственные отходы.

Для демонстрации возможности частичной замены дизельного топлива синтез-газом, получаемым из древесных отходов, модуль термохимической конверсии по технологии ОИВТ РАН был установлен в котельной ООО «Энергонезависимость» (г. Нижний Новгород).

В ходе испытаний была продемонстрирована возможность устойчивой работы типового жидкотопливного котла мощностью 100 кВт при замене 70-75 % жидкого топлива на газовое топливо, получаемой по разрабатываемой технологии при переработке местных топливно-энергетических ресурсов [2].

Отдельным направлением использования разрабатываемых подходов при реализации технологий энергетической утилизации отходов жизнедеятельности является переработка иловых осадков сточных вод. Предварительные исследования показали перспективность использования разрабатываемой технологии термической переработки для энергетической утилизации иловых осадков сточных вод с получением энергетического газа с повышенными теплотехническими характеристиками.

2. Торрефикация с целью улучшения потребительских свойств гранулированных топлив из биомассы

Торрефикация является относительно новым и перспективным способом улучшения характеристик органического сырья растительного происхождения перед его использованием в качестве твердого топлива. Торрефикация (от английского слова torrefy, означающего “обжигать, сушить”) представляет собой процесс предварительной термической обработки биомассы при температурах до 300°C. При торрефикации происходит уменьшение веса обрабатываемого материала, возрастает его теплота сгорания, что является главным в плане улучшения потребительских свойств топлива, и, в значительной степени уменьшается способность к поглощению атмосферной влаги. В настоящее время считается, что основным препятствием к широкому использованию в энергетике гранулированных топлив из биомассы (древесных и сельскохозяйственных отходов) является отсутствие промышленных технологий торрефикации, обеспечивающих сокращение затрат на хранение и перевозку пеллетизированного топлива и повышение его теплотехнических характеристик. Оценки показыва-

ют, что предварительная термическая обработка позволяет экономить до 30% затрат на хранение и транспортировку только за счет того, что обработанная гранулированная биомасса имеет более высокую плотность. В зависимости от условий, при которых проводится торрефикация, теплота сгорания торрефицированных гранул из древесных отходов увеличивается на 25–30%.

В ОИВТ РАН выполнен комплекс исследований по созданию нового метода торрефикации, обеспечивающего значительные финансово-экономические преференции при энергетическом использовании торрефицированного пеллетизированного топлива из различных видов биомассы. Разрабатываемая методология прошла апробацию на серии экспериментальных установок и стендов. Изготовлена и испытана крупномасштабная экспериментальная установка по торрефикации производительностью 100–120 кг сырья в час. Следующим шагом должно явиться внесение изменений в техническую документацию по результатам выполненного комплекса работ и сооружение установки большей производительности. После отработки данной конструкции может быть осуществлена разработка технической документации для промышленного производства установок данного назначения.

Отдельным направлением промышленной реализации процесса торрефикации является переработка пометно-подстилочной массы (ППМ) птицеводческих хозяйств. В силу высокой токсичности данного вида отходов по сравнению с другими видами отходов жизнедеятельности, разработка технологии переработки ППМ является наиболее востребованной. В основном это относится к европейским странам и Израилю. В нашей стране, по очевидно заниженным данным, ежегодное производство ППМ оценивается в 10–12 млн. тонн. Некоторые птицефабрики из-за значительного загрязнения окружающих территорий в России были закрыты, в частности, в Московской области. Торрефикация с последующим использованием получаемого топлива для региональной энергетики является возможным методом обеззараживания и энергетической утилизации отходов данного вида.

Очевидно, что в случае создания оборудования для торрефикации различных видов гранулированной биомассы, установки, реализующие разрабатываемую технологию, будут пользоваться большим спросом на внутреннем и внешнем рынке.

3. Комбинированные геотермально-биоэнергетические технологии

Наиболее перспективным регионом для масштабного освоения геотермальной энергии является Северокавказский, где в пределах Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ) площадью более 200 тыс. км^2 в осадочных отложениях залегают гидрогеотермальные ресурсы разного энергетического потенциала (30 – 200 ^{o}C и более) и разной минерализации (от 1 – 3 до 200 г/ дм^3). Суммарные прогнозные гидрогеотермальные ресурсы ВПАБ оцениваются до 5 млн. м^3/сут, используется их незначительная часть на различные теплоэнергетические цели [3].

Для бесперебойного энергоснабжения потребителей наиболее перспективными являются технологические системы, использующие два и более вида возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Северокавказский регион, и в частности республика Дагестан, располагают значительными ресурсами практических всех видов ВИЭ.

Одним из значительных и перспективных возобновляемых энерогоресурсов является биомасса, которая не находит применения в республике, из общего экономического потенциала биомассы в 558,8 тыс. ту.т./год на долю отходов животноводства приходится 335,5 тыс. ту.т./год [4].

Необходимо отметить, что в последнее время Дагестан вышел на первое место среди российских регионов по численности голов крупного рогатого скота, их численность за первое полугодие 2017 года достигло 1,118 миллиона. Всего на 1 июля в России насчитывалось 19,7 миллиона голов крупного рогатого скота, доля Дагестана в общероссийском показателе составила более 5,5%. Дагестан является лидером и по количеству голов мелкого рогатого

скота, их количество по всем формам хозяйствования превышает 5 миллионов [5]. Ежегодно от такого количества крупного и мелкого рогатога скота в республике будет скапливаться до 7 млн. т навоза. В настоящее время ресурсы биомассы практически не востребованы. Переработка их в биореакторных установках с получением биогаза позволит существенным образом улучшить эколого-экономическую ситуацию в республике. Выпуск оборудования для переработки биомассы можно наладить на простаивающих заводах республики, загруженных в прошлом на заказы оборонно-промышленного комплекса.

Весьма привлекательными являются технологии переработки отходов, основанные полностью на ВИЭ, где тепло и электроэнергия, используемые при переработке, получены от возобновляемых энергоресурсов. Одним из них является, разработанная в Институте проблем геотермии ДНЦ РАН (ИПГ ДНЦ РАН), технология переработки органических отходов с использованием геотермальной энергии (рис. 1). В предложенной технологии термальная вода из добычных скважин поступает в геотермальный центральный тепловой пункт (ГЦТП), из которого часть воды подводится в блок конверсии биомассы для поддержания в биореакторах (метантенках) необходимого температурного режима, остальная высокотемпературная вода направляется в блок комбинированной геотермально-парогазовой электростанции (ГПЭ). В блоке ГПЭ термальная вода используется только для нагрева низкокипящего рабочего тела. Далее отработанная вода из блоков конверсии биомассы и ГПЭ поступает на насосную станцию для закачки по нагнетательным скважинам в материнский пласт.В конверсионном блоке из биомассы получают обеззараженные удобрения высокого качества и биогаз. После осушки биогаз поступает в блок ГТУ, где вырабатывается электроэнергия. Отработанные в цикле ГТУ выхлопные газы направляются в ГПЭ, где за счет термальной воды осуществляется нагрев низкокипящего рабочего тела в цикле Ренкина до температуры насыщения, а дальнейшее испарение и перегрев тела осуществляется за счет утилизации тепла отработанных газов.

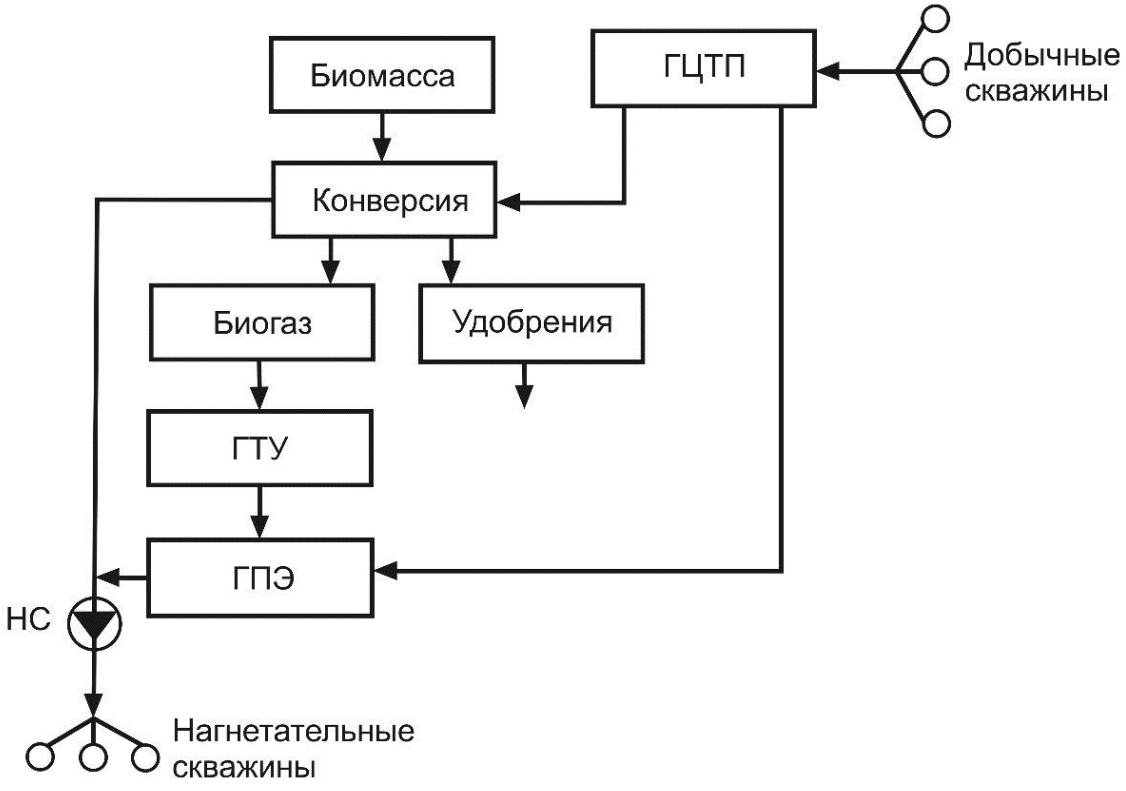


Рис. 1. Комбинированная схема утилизации биомассы и геотермальной энергии

Применение такой технологии позволяет решить ряд проблем: санитарно-экологическую – ликвидация и обеззараживание отходов; энергетическую – получение качественного топлива – биогаза и, следовательно, тепловой и электрической энергии; агрохимическую – получение высокоэффективных органических удобрений; социальную – улучшение условий труда и быта населения, увеличение урожайности сельхозкультур при сокращении применения химических удобрений, ядохимикатов и средств защиты растений.

Пределом, ниже которого нецелесообразно использовать геотермальный теплоноситель для получения электроэнергии, считается его температура ниже 100 ^{o}C. Комбинированная система по утилизации биомассы и геотермальной энергии позволяет эффективно использовать для получения электроэнергии термальные воды с более низкой (70 – 100 ^{o}C) температурой.

4. Использование гидрогеотермальных ресурсов в энергобиологических комплексах.

Высокая экономическая эффективность гидрогеотермальных ресурсов достигается при комплексном их освоении с использованием теплового потенциала на энергетические нужды, а самой воды на различные водохозяйственные цели [6]. Наиболее перспективными объектами для такого их освоения являются энгергобиологические комплексы (ЭБК). В России накоплен значительный опыт практического использования в ЭБК сбросного тепла атомных и тепловых электростанций.

В ИПГ ДНЦ РАН совместно ОАО «Геотермнефтегаз» проведены комплексные исследования по разработке различных технологий использования гидрогеотермальных ресурсов в ЭБК [7]. Разработана принципиальная схема комплексного использования термальных вод Речнинского геотермального месторождения (Кизлярский район РД) в проекте ЭБК. В схеме предусматривается организация в ЭБК нескольких взаимосвязанных производств: по выращиванию ранних овощей, культивированию микроводоросли хлорелли, выращиванию молоди и товарных осетровых. Проект также включает теплоэнергетический блок, где осуществляется производство тепла и электроэнергии для собственных нужд ЭБК.

В предлагаемой схеме термальная вода с температурой 104 ^{o}C и массовым расходом 192 т/ч из скважин 2т и 3т поступает в дегазатор, где происходит отделение растворенных газов. Далее вода последовательно направляется на обогрев жилого комплекса, теплицы, птицефабрики и грунта, где происходит максимально эффективное использование теплового потенциала скважин. Отработанная вода после обогрева грунта поступает на насосную станцию для закачки в скважины 5т и 6т.

Термальная вода с температурой 53 ^{o}C и расходом 46 т/ч из скважин 1т и 4т также направляется в дегазатор и далее в смеситель, куда из артезианских скважин 1а – 5а поступает низкопотенциальная вода с температурой 25 ^{o}C и расходом 263 т/ч, предварительно обогащенная кислородом воздуха в аэраторе. Вода из смесителя поступает в рыбохозяйственный, выращивания микроводорослей, производства хлебопекарных дрожжей и физиотерапевтический блоки. Отработанная вода сбрасывается в реку.

Газы, отделенные из термальной воды после их осушки, используются в газотурбинной установке (ГТУ) мощностью 0,5 МВт. ГТУ полностью обеспечивает потребности ЭБК в электроэнергии.

Окончательно технологическая схема ЭБК на основе термальных вод выбирается технико-экономическим обоснованием различных вариантов с разнородными блоками. Технологии, которые будут реализовываться в ЭБК, зависят от многих факторов, основными из которых являются количество (водоресурсный и тепловой потенциалы) и качество (температура, минерализация, химсостав, наличие растворенных газов, токсичных и вредных компонентов) термальной воды, наличия пресных вод, условий для сброса отработанных вод и свободных земель для строительства.

Заключение

В статье представлены результаты исследований по созданию новых технологий распределенной энергетики. Основное внимание уделено вопросам, связанным с разработкой новых методов биоэнергетики и использованию гидротермальной энергии.

Доведение полученных результатов до уровня, необходимого для создания промышленного оборудования, позволит России занять приоритетные позиции в разработке и создании оборудования для распределенной энергетики.

Литература:

1. Зайченко В.М., Чернявский А.А Сравнение характеристик распределенных и централизованных систем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2-8.
2. Зайченко. В. М., Лавренов В, Синельщиков В. Политопливные теплогенерирующие системы на местных возобновляемых ресурсах // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2016. №6 (39). С. 60-62.
3. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит. 2008. 376 с.
4. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под ред. *П.П. Безруких* – М.:ИАЦ Энергия. 2007.
5.https://news.rambler.ru/economics/37736551/?utm_content=news&utm_medium=read_more&utm_source=copylink
6. Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Алхасова Д.А., Каймаразов А.Г., Рамазанов М.М. Освоение низкопотенциального геотермального тепла / Под ред. академика В.Е. Фортова. М.: Физматлит. 2012. 280 с.
7. Алиев Р.М., Алхасов А.Б., Исрапилов М.И., Бадавов Г.Б. Геотермальные проекты Республики Дагестан, как объект привлечения инвестиций // Труды Межд. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Т.1. Махачкала. 2005. С. 118-130.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Алхасов А.Б.

ФБГУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а, alibek_alhasov@mail.ru

Аннотация. Предложена технология комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов с использованием теплового и водоресурсного потенциалов на различные цели. Тепло термальной воды используется в системе низкотемпературного отопления и для нагрева воды в системе горячего водоснабжения. Охлажденная в теплообменниках вода поступает на блок химводоочистки, где доводится до кондиций питьевой воды, и далее в систему хозяйственно-питьевого водоснабжения. Комбинированная геотермально-парогазовая система позволяет успешно использовать геотермальные ресурсы среднего энергетического потенциала (80-100 ^{O}C) для получения электроэнергии. Перспективными для освоения таких ресурсов являются энергокомплексы с каскадно-последовательным использованием термальной воды, в частности ЭБК. Проведена оценка возможности использования простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях для добычи термальной воды в энергосистемах по выработке электроэнергии, общая полезная мощность ГеоЭС на перспективных площадях составляет более 300 МВт. Наиболее перспективными для комплексной переработки являются высокотемпературные геотермальных рассолы. Утилизация тепловой энергии рассолов осуществляется в бинарной ГеоЭС. Отработанный рассол с низкой температурой из ГеоЭС поступает на химзавод, где извлекаются основные химические компоненты – карбонат лития, магнезия жженная, карбонат кальция и поваренная соль. Далее отработанная вода используется на различные водохозяйственные цели. Электроэнергия, вырабатываемая в бинарной ГеоЭС, используется для извлечения химических компонентов. Комплексное освоение высокотемпературных рассолов ВПАБ позволит полностью обеспечить потребности России в карбонате лития и поваренной соли.

В пределах Северокавказского региона простирается Восточно-Предкавказский артезианский бассейн (ВПАБ) площадью более 200 тыс. км^2, представляющий собой огромную чащу, заполненную мезозойско-кайнозойской осадочной толщей. В вертикальном разрезе большей части бассейна выделяются три термоводоносных яруса со значительными гидротермальными ресурсами, изолированные друг от друга глинистыми породами.

В верхнем ярусе температура воды в зависимости от глубины залегания колеблется от 25 до 60 ^{o}C, минерализация варьирует в пределах 0,5 – 1,5 г/л. Скважины фонтанируют с избыточным давлением 0,1 – 0,35 МПа.

В среднем ярусе коллекторы содержат мощную водонапорную систему термальных вод с минерализацией 5 – 35 г/л, температурой 70 – 130 ^{o}C и дебитами скважин 500 – 5000 м^3/сут при избыточных давлениях 0,3 – 1,5 МПа.

В нижнем ярусе в породах мелового, юрского и триасового периодов залегают высокоминерализованные термы хлоридно-натриевого и кальциевого состава с минерализацией 60 – 210 г/л и температурами 130 – 220 ^{o}C и выше. Газовый фактор в этих водах доходит до 10 м^3/м^3 и более. Термальные воды являются промышленным гидроминеральным сырьем с высоким содержанием лития, рубидия, цезия, йода, брома, бора, калия, магния и стронция. Потенциальные гидротермальные ресурсы ВПАБ оцениваются до 5,0 млн. м^3/сут. [1].

ВПАБ охватывает практически все субъекты густонаселенного (до 10 млн. чел.) Северокавказского федерального округа, до 5% населения используют геотермальные ресурсы для теплоснабжения в коммунально-бытовом секторе, сельском хозяйстве и промышленности, доля геотермальной энергии в общем балансе энергопотребления региона составляет менее 0,2 %. Низкий уровень использования огромных гидрогеотермальных ресурсов связан с многими факторами, одним из которых является отсутствие энергоэффективных и экономически оправданных технологий их освоения.

Низкопотенциальные воды (НПВ) верхнего яруса перспективны для отопления, хозяйственно-питьевого и горячего водоснабжения, а также использования на различные технологические нужды. Для утилизации тепла таких вод наиболее перспективны теплонасосные технологии теплоснабжения. Высокая экономическая эффективность НПВ достигается при их комплексном освоении с использованием теплового потенциала на энергетические нужды, а самой воды на различные водохозяйственные цели.

В пределах ВПАБ количество скважин на добычу НПВ достигает до 10000. Только в равнинном и предгорном Дагестане в режиме самоизлива эксплуатируются более 3500 скважин, которые выносят на поверхность до 700 тыс. м^3/сут воды. С пользой используется до 10% воды, остальная вода сбрасывается на поверхности, что вызывает заболачивание огромных территорий, прилегающих к добычным скважинам, и засолению почв и грунтов, приводящее к выходу из сельскохозяйственного оборота больших площадей плодородных земель. Кроме того, такая неконтролируемая добыча приводит к постепенному истощению запасов НПВ, происходит снижение устьевых давлений в скважинах и их дебитов. НПВ практически не используются для нужд теплоэнергетики. Основная причина состоит в том, что температура таких вод при их прямом использовании недостаточна для теплоснабжения и горячего водоснабжения.

Стратегия освоения НПВ должна предусматривать оптимальные технологические решения их добычи, использования, охраны и воспроизводства. В ИПГ ДНЦ РАН в течение многих лет ведутся исследования по изучению НПВ, разработан ряд технологий по комплексному их освоению, на рис. 1 приведена одна из них.

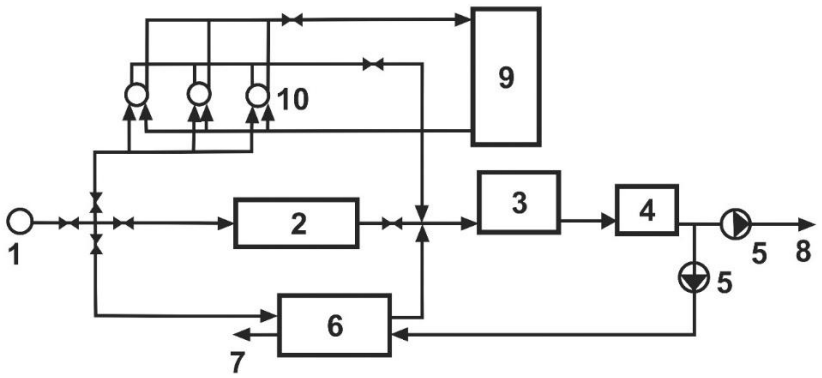


Рис. 1. Схема комплексного освоения низкопотенциальных термальных вод

1 – геотермальная скважина; 2 – потребитель тепла; 3 – блок химводоочистки; 4 – резервуар чистой воды; 5 – насос; 6 – теплообменник; 7 – на горячее водоснабжение; 8 – на холодное водоснабжение; 9 – система низкотемпературного отопления с тепловым насосом; 10 – теплоаккумулирующие скважины.

В предложенной технологической схеме тепловой потенциал воды используется в системе низкотемпературного отопления и для нагрева воды в системе горячего водоснабжения. Охлажденная в теплообменниках вода поступает на блок химводоочистки, где доводится до кондиций питьевой воды, и далее на потребление. В межотопительный период часть термальной воды из скважины, которая использовалась в системе отопления, поступает в вертикальные скважины-теплообменники глубиной 100-300 м для восстановления теплового поля вокруг них, а охлажденная в скважинах вода поступает на химводоочистку. В отопительный период, тепло регенерированное в горной породе используется в отдельной системе отопления с тепловым насосом. Предлагаемая технология позволяет перевести скважины на режим круглогодичной эксплуатации, полностью использовать их водоресурсный потенциал на водохозяйственные цели и максимальным образом утилизировать тепловой потенциал.

Широкая реализация разработанных технологий комплексного освоения НПВ позволит резко увеличить объемы добычи и количество потребителей, а также улучшить экологическую и экономическую ситуацию в регионе и социальные условия значительной части населения. Для использования НПВ после теплопотребления на нужды коммунального водоснабжения необходимо довести их качество до кондиций «вода питьевая» на различных блоках химической водоочистки, конструктивно-технологические особенности которых формируются в зависимости от качества исходной воды. При выполнении многолетних исследований по изучению НПВ региона и выполнении экспедиционных работ обследовано более 250 скважин в равнинной части Северного Дагестана [2]. Проведена типизация НПВ и установлены загрязнители, наиболее токсичными из которых являются соединения мышьяка. Детально изучен состав органических компонентов НПВ, наиболее опасными из которых являются летучие фенолы и гумусовые кислоты. Оконтурены территории с аномально высокими содержаниями мышьяка в артезианских водах, вплоть до северной и западной административных границ республики, мышьяк установлен в составе артезианских вод более чем 200 скважин, и для большинства обследованных НПВ отмечены концентрации, заметно превышающие (от 2 до 10 раз) значение ПДК для мышьяка. Из проведенных исследований следует, что для густонасенленного Северокавказского региона остро стоит проблема снабжения качественной питьевой водой, где в большинстве населенных пунктах единственным источником водоснабжения являются подземные артезианские воды, содержащие различные загрязнители.

Разработаны технологии очистки НПВ от мышьяка и органических загрязнителей. Предлагаемые технологии позволяют эффективно очищать мышьяксодержащие артезианские воды с доведением их качества до кондиции питьевой воды, а именно: содержание мышьяка снизить с 200-300 мкг/дм^3 до следовых количеств, а содержание Fe^{3+}–катионов – до 0,1-0,15 мг/дм^3; достигнуть снижения цветности артезианских вод, с доведением этого показателя качества до регламентируемого значения 20°, а показателя окисляемости перманга-

натной до 1,5 – 2,0 мг O_2/дм^3 при нормативе не более 5 мг O_2/дм^3 , а также значительного снижения фенольного индекса; многократно снизить показатель общей жесткости, главным образом за счет снижения жесткости по кальцию.

В пределах ВПАБ имеются значительные ресурсы среднепотенциальных термальных вод (80…100 ^oC), которые используются крайне неэффективно. На геотермальных месторождениях скважины, добывающие такие воды, эксплуатируются только в холодное время года для отопления различных объектов. Эффективное освоение среднепотенциальных ресурсов возможно при их комплексном каскадно-последовательном использовании на энергетические и водохозяйственные цели. Перспективными объектами для освоения геотермальных ресурсов являются энерго-биологические комплексы (ЭБК), где происходит максимально эффективное использование теплового и водоресурсного потенциалов геотермальных скважин [3].

Эффективное освоение среднепотенциальных вод также осуществимо в комбинированных геотермально-парогазовых энергоустановках (ГПЭ), имеющих преимущества и возобновляемых источников и ископаемых топлив [4,5]. В ГПЭ (Рис. 2) выхлопные газы газотурбинной электростанции (ГТЭС) используются для испарения и перегрева рабочего агента, циркулирующего в контуре бинарной ГеоЭС. Нагрев рабочего агента в ГеоЭС до температуры испарения осуществляется за счет термальной воды.

Перспективными месторождениями для строительства комбинированных ГПЭ является Тернаирское, Кизлярское, Речнинское. Южносухокумское, Терекли-Мектебское и Червленно-Бурунское месторождения в республике Дагестан, где имеются готовые к эксплуатации геотермальные скважины, многие из которых в настоящее время простаивают по различным причинам. По оценочным расчетам на этих месторождениях можно построить комбинированные ГПЭ общей мощностью до 130 МВт, что решит значительные энергетические, экономические, экологические и социальные проблемы республики.

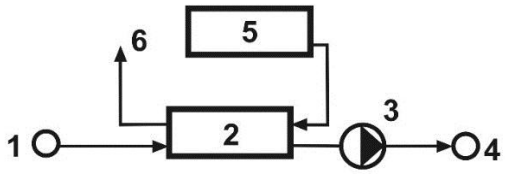


Рис. 2. Комбинированная геотермально-парогазовая электростанция

1 – добычная геотермальная скважина; 2 – ГеоЭС; 3- нагнетательная насосная станция; 4 – нагнетательная скважина; 5 – ГТЭС; 6 - сброс отработанных выхлопных газов.

Наиболее перспективным использованием геотермальной энергии является преобразование ее в электрическую энергию, где достигается непрерывная эксплуатация геотермальных скважин. Гидрогеотермальные ресурсы региона с температурой выше 100 ^oC пригодны для производства электроэнергии. Характерными особенностями ресурсов является высокая минерализация, повышенное газосодержание, склонность к солеотложению при изменении термобарических условий и высокая коррозионная агрессивность к конструкционным материалам. Электроэнергия с их использованием вырабатывается в бинарных ГеоЭС на низкокипящих рабочих агентах с реализацией во вторичном контуре термодинамического цикла Ренкина.

Гидрогеотермальные ресурсы ВПАБ оцениваются до 10000 МВт тепловой и 1000 МВт электрической мощности. Для их масштабного освоения необходимо строить высокодебитные скважины большого диаметра с привлечением огромных капвложений, что не реально в современных экономических условиях.

В ближайшей перспективе наиболее оптимальным является освоение части этих ресурсов с использованием существующих скважин на выработанных газонефтяных месторождениях. Только в Северном Дагестане имеется более 1000 простаивающих скважин, пробуренных на глубины от 2000 до 5000 м. Большинство из этих скважин могут быть успешно использованы для добычи термальной воды в системах по выработке электроэнергии в бинарных ГеоЭС.

Проведены оценочные расчеты для ряда перспективных площадей с простаивающими скважинами, использование которых позволит получить общую полезную мощность ГеоЭС более 300 МВт [6,7].

Наиболее перспективными для освоения являются высокотемпературные минерализованные геотермальные рассолы, залегающие в мезозойских отложениях глубокого залегания. В регионе насчитывается более 90 площадей с редкометальными промышленными водами и готовыми к эксплуатации скважинами (более 2000) на выработанных нефтегазовых месторождениях. Рассмотрены возможности комплексного освоения таких ресурсов с разработкой различных технологических решений. Одна из схем, предложенная для Тарумовского геотермального месторождения, приведена на рис.3, где тепловой потенциал высокотемпературной воды используется для получения электроэнергии в бинарной ГеоЭС. Отработанный рассол с низкой температурой из ГеоЭС поступает на химзавод, где извлекаются основные химические компоненты (карбонат лития, магнезия жженная, карбонат кальция и поваренная соль), далее вода используется на различные водохозяйственные цели.

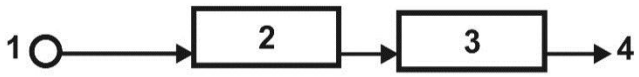


Рис. 3. Схема комплексного освоения высопараметрических геотермальных ресурсов

1 – геотермальная скважина; 2 – ГеоЭС; 3 – завод по извлечению химкомпонентов; 4 – использование опресненной воды на водохозяйственные цели.

Технология полного извлечения всех химкомпонентов из геотермальных рассолов подробно приведена в работе [8]. Необходимо отметить, что комплексное освоение высокотемпературных рассолов только одного Тарумовского месторождения позволит решить проблему импортозамещения, полностью обеспечивая потребности России по карбонату лития и поваренной соли [9].

В заключение отметим, что энергетические технологии на основе геотермальных ресурсов должны стать важным составляющим стратегического развития Северокавказского региона.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
2. Освоение низкопотенциального геотермального тепла/ *А.Б. Алхасов, М.Г. Алишаев, Д.А. Алхасова, А.Г. Каймаразов, М. М. Рамазанов//* М.: Физматлит. 2012. 280 с.
3. Геотермальные проекты Республики Дагестан, как объект привлечения инвестиций/ *Р.М.Алиев, А.Б. Алхасов, М.И. Исрапилов, Г.Б. Бадавов Г.Б.* // Труды Межд. Конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Т.1. Махачкала. 2005. С. 118-130.
4. *Алхасова Д.А., Алхасов Б.А.* Использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии // Материалы 2 Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2010. с. 233 – 238.
5. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.* Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов // Известия РАН. Энергетика, № 5, 2014, с. 144-157.
6. *Алхасов А.Б.* Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии// Известия РАН. Энергетика, № 1, 2010. с.59 – 72.
7. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.* Электроэнергетическое освоение геотермальных ресурсов осадочных бассейнов // Теплоэнергетика, № 2, 2011. с. 59 – 66.
8. Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов / *А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А.Каспарова* // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 11 – 17.
9. Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского геотермального месторождения/ *А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А.Каспарова* // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 25 – 30.

Секция 1. РОЛЬ ВИЭ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ

О СОЗДАНИИ ПОЛИГОНА НОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Алхасов А.Б.[1], Зайченко В.М.[2], Чернявский А.А.[3]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39,а; e-mail: ran_ipg@mail.ru;
[2]ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, 125412, Ижорская ул., д.13, стр.2;e-mail:webadmin@ihed.ras.ru
[3]НИИиПИ Институт «Ростовтеплоэлектропроект», Ростов-на-Дону, Россия, 344002, пр-тБуденновский, 2;e-mail: rotep@energoug.ru

Целью настоящей работы является обоснование целесообразности создания полигона новых энергетических технологий на базе существующего полигона возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН в Махачкале. Предлагается в состав полигона, помимо солнечных, ветровых и других энергетических установок с использованием ВИЭ, включить системы с новейшими технологиями аккумулирования электрической и тепловой энергии, системы с применением электрохимических генераторов на топливных элементахдля высокоэффективного прямого преобразования химической энергии водорода в электрическую и тепловую энергию.

Двадцать первый век ознаменовался значительным переосмыслением стратегических принципов развития энергетики. Основные причины, заставляющие искать новые направления развития энергетики, следующие.

- *Исчерпание ископаемых ресурсов.* Ископаемые ресурсы, которые в настоящее время составляют основу энергетики, являются невозобновляемыми. По оценкам специалистов, при нынешних темпах расходования ископаемых ресурсов, разведанные запасы нефти на земле будут исчерпаны через 20 – 25 лет, природного газа – через 50 – 60 лет, ядерного топлива – через 60 – 70 лет, угля – через 150 – 200 лет. В России ископаемые топливные ресурсы характеризуются примерно такими же запасами.
- *Экологические проблемы*, связанные с деятельностью энергетического комплекса. Объекты тепловой энергетики загрязняют окружающую среду продуктами сгорания, вредными элементами, содержащимися в топливе, а также выбросами тепла, что приводит к нарушению природной циркуляции в атмосфере и увеличивает риски экологических катастроф. На долю ТЭК приходится более 23 % выбросов вредных веществ и парниковых газов (CO_2). Объекты атомной энергетики, основанной на технологии расщепления ядер атомов, сопровождаются большими выделениями ионизирующих излучений, еще большими выбросами тепла и чреваты определенной вероятностью радиационных аварий с выбросами смертельно-опасных долгоживущих радионуклидов в окружающую природную среду. Большие гидроэлектростанции требуют создания искусственных водохранилищ, занимающих большие площади, изымаемые из сельхозоборота, и связаны с существенными проблемами для рыбного хозяйства.
- *Постоянный рост стоимости энергии.* Рост стоимости энергии, производимой из органического и ядерного топлива, обусловлен сокращением легкодоступных их запасов, истощением эффективных месторождений, удлинением транспортных путей, увеличением затрат на ликвидацию вредных выбросов, введением дополнительных затрат на компенсацию рисков недопоставки топлива и энергии в срок.

• *Снижение энергетической безопасности при использовании традиционных энергетических технологий.* Кроме увеличивающегося ценового риска недопоставки энергии потребителям, существуют и все большую роль играют риски, связанные с транспортировкой топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Залежи ископаемых ресурсов находятся в немногих районах, но необходимы везде, где живут и работают люди, т.е. производство ресурсов происходит централизованно, а потребление децентрализовано. Транспорт энергии и ее носителей из мест производства или добычи к местам потребления по длинным и разветвленным линиям (электрическим, железнодорожным, автомобильным, водным путям) иногда приводит к экологическим и энергетическим катастрофам и социальным бедствиям.

В связи с этими причинами в настоящее время во всем мире наблюдается стремительный рост использования новых энергетических технологий, обеспечивающих повышение эффективности производства энергии, а также экологический и социальный эффект. К числу новых энергетических технологий относятиспользование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), водородные технологии для генерации и аккумулирования энергии, новые электрохимические технологии аккумулирования электрической энергии, комбинированные способы получения электрической и тепловой энергии.

Отметим, что в настоящее время доля ВИЭ в производстве электрической и тепловой энергии в мире составляет (без учета крупных ГЭС) около 7%. При этом мощность ветроэлектрических станций (ВЭС) в мире составляет более 130 млн. кВт (ежегодный прирост 30-35%), солнечных фотоэлектрических систем – около 70 млн. кВт (прирост 40-55%), солнечных систем теплоснабжения – более 100 млн. кВт (прирост 20%), приповерхностных теплонасосных систем – около 100 млн. кВт (прирост 15-20%), малых ГЭС – около 90 млн. кВт (прирост 10%) и т.п[1].

Наиболее быстро использование ВИЭ развивается в Германии, Испании, Японии, США. В Германии поставлена задача к 2050 году обеспечить 80 % энергопотребления за счет ВИЭ. В Японии после аварий на АЭС «Фукусима» в марте 2011 года максимальное использование ВИЭ и водородных технологий рассматривается как генеральное направление развития энергетики. К таким же решениям пришли и во многих европейских странах: отказ от развития атомной энергетики здесь также сопровождается планированием предпочтительного использования ВИЭ и водородных технологий.

Если в 2004 году вводы новых мощностей в мире на основе ВИЭ составляли 10 % от всего количества вводимых энергогенерирующих установок, то в 2010 году на долю вводимых ВИЭ пришлось уже 34 %, а в 2011 году – 44 % новых мощностей. В 2012 году ввод мощностей с использованием ВИЭ уже превысил ввод на основе традиционных энергетических технологий [2].

Доминирующим фактором для инвестиций в возобновляемую энергетику является экстремальное падение цен на оборудование с применением ВИЭ. За последние несколько лет фотоэлектрические модули подешевели втрое, ветроэлектрическое оборудование – на 20…30 %. Сегодня поставщиками из Китая и Тайваня на мировой рынок фотоэнергетики представлены модули с ценами гораздо ниже европейских при вполне удовлетворительных технических параметрах. И все это происходит на фоне непрерывного ощутимого роста удельных затрат в сооружение традиционных энергетических мощностей.

В России имеет место значительное отставание развития технологий на базе ВИЭ от мировых темпов развития. Поставлена цель довести долю использования ВИЭ в производстве энергии к 2020 году до 4,5 % [3]. В абсолютном значении – это более 11 тыс. МВт. Поэтому достижение этой цели является для России непростой задачей.

В связи с достаточно быстрым ростом тарифов на электрическую и тепловую энергию, а также с существенным ростом требуемых удельных капитальных вложений в создание традиционных электростанций и, наоборот, с тенденцией постоянного удешевления оборудова-

ния возобновляемой энергетики, по предварительной оценке уже после 2020…2025гг. возобновляемая энергетика станет вполне конкурентоспособной с традиционной. А в автономных системах на территориях, удаленных от централизованного энергоснабжения, использование ВИЭ является экономически целесообразным уже сегодня.

Активно развиваются в мире и водородные технологии. В этой области основные исследования ведутся в следующих направлениях.

- *Снижение затрат на получение водорода***.** Исследуются возможности повышения эффективности электролизных технологий, биотехнологий, термохимических методов окисления металлов водой, методов разложения воды прямым нагревом до температур 1400…3000 ^{O}C и др.
- *Разработка эффективных методов хранения и транспортировкиводорода:* в сосудах в газообразном или сжиженном виде, в губчатых интерметаллических соединениях, в подземных выработках и пр.
- *Разработка рациональных методов использования водорода*: при прямом сжигании в топках энергетических котлов; при использовании в качестве топлива в двигателях внутреннего и внешнего сгорания; при беспламенном окислении в каталитических теплогенераторах; при прямом преобразовании химической энергии водорода в электричество и тепло с помощью электрохимических генераторов на топливных элементах. Последнее направление представляет особый интерес, поскольку определяет новые, перспективные пути развития экологически чистой энергетики без использования ископаемых топлив.

В настоящее время в России отсутствуют полигоны, на которых в реальных натурных природных условиях можно было бы проводить крупно-масштабные экспериментальные исследования разрабатываемых технологий для быстроразвивающейся новой энергетики. В этом аспекте неоценимый вклад в развитие теоретических и прикладных исследований в области новых энергетических технологий в Российской Федерации может внести создание ***Полигона новых энергетических технологий.*** Такой полигон с минимальными затратами может быть создан на базе существующего полигона ОИВТ РАН в Махачкале. Этот полигон, размещенный на берегу Каспийского моря, имеет достаточную территорию, обладает весьма высокими потенциалами солнечной и ветровой энергии, низкопотенциальной энергии морской воды, волновой энергии в прибрежной зоне моря, возможностями использования больших объемов морской воды для организации крупномасштабного производства водорода при разработке новых водородных технологий. Все это позволяет проводить экспериментальные исследования как технологий с ВИЭ, так и водородных технологий, а также комбинированное использование этих технологий, сулящее создание новой высокоэффективной энергетики.

Основными целями создания такого Полигона явятся:

- обеспечение возможности выполнения экспериментальных исследований систем в натурных условиях юга РФ для реализации результатов теоретических исследований Института проблем геотермии (ИПГ) ДНЦ и ОИВТ РАН и сотрудничающих с ними научных организаций и производственных предприятий;
- отработка эффективных технических решений с использованием новых энергетических технологий для последующего их тиражирования в системах энергообеспечения потребителей в Российской Федерации;
- использование создаваемых экспериментальных установок в качестве демонстрационных для пропагандирования новых путей развития энергетики;
- использование нового полигона в качестве учебного центра для практической работы с разнообразным действующим новым энергетическим оборудованием для студентов и аспирантов учебных и научно-исследовательских заведений Российской Федерации;

• попутное обеспечение возможности энергоснабжения электрической и тепловой энергией ближайших потребителей энергии за счет постоянно действующих энергетических установок Полигона.

При этом впервые в России будет создана комбинация опытных установок, позволяющая выполнить крупномасштабные экспериментальные исследования, результаты которых дадут возможность обосновать новую парадигму перспектив развития энергетики в стране с отказом уже в ближайшие годы от строительства новых тепловых и атомных электростанций и переходом на массовое и эффективное использование новых энергетических технологий.

Созданию предлагаемого полигона будут способствовать:

✓ наличие штата высококвалифицированных сотрудников в ОИВТ РАН и ИПГ ДНЦ РАН;

✓ наличие обширных научно-производственных связей ИПГ с учреждениями Российской академии наук, с российскими и зарубежными научно исследовательскими и промышленными организациями и предприятиями;

✓ наличие удовлетворительных климато-актинометрических условий в районе размещения полигона.

o Создание Полигона позволит ответить на ряд вопросов о возможности использования новых энергетических технологийпрежде всего на удаленных территориях Республики Дагестан, а также на остальных территориях юга европейской части Российской Федерации, которые характеризуется[4]:

o наличием и постепенным возрастанием дефицита по электрической энергии;

o высоким уровнем инвестиционных издержек на присоединение к инженерным коммуникациям;

o высокими нагрузками на транспортную и энергетическую инфраструктуры во многих районах;

o высокой степенью дифференциации муниципальных образованийпо уровню экономического развития;

o низким объемом производства высокотехнологичной продукции.

Рассмотренные аспекты сооружения полигона новых энергетических технологий именно на юге РФ тем более актуальны, поскольку на перспективу в ближайшие годы здесь прогнозируется значительный рост объема промышленной продукции и объема оказываемых услуг на базе масштабного и динамичного внедрения инноваций, рост численности населения, создание десятков тысяч новых рабочих мест[4].

Можно также отметить, что социально-экономические проблемы на юге России достаточно хорошо коррелируются и для Российской Федерации в целом. Поэтому и результаты исследований новых энергетических технологий на полигоне в Махачкале будут применимы, с некоторыми корректировками, и для планирования развития энергетики в стране в целом.

Дагестан известен как пионер в освоении глубинного тепла земли еще в СССР, обладает богатыми промышленными ресурсами геотермальных вод и пароводяных смесей. Условия для их использования самые благоприятные. Здесь широко распространены локальные термоаномальные зоны с необычайно высокими пластовыми давлениями и температурами.

В ИПГ ДНЦ РАН уже много лет ведутся научные исследования практически по всему спектру использования возобновляемых источников энергии.Это является объективно обоснованным и вытекает из наличия на территории Дагестана больших запасов экологически чистой возобновляемой энергии. Выявление технологических и инновационных прорывов в этой области является высоковероятным.

Республика Дагестан характеризуются следующими основными ресурсными показателями возобновляемых источников энергии[5].

Таблица 1.

Ресурсный потенциал ВИЭ в Республике Дагестан

Вид ВИЭ	Валовой потенциал, млн. тут	Технический потенциал, млн. тут	Экономический потенциал, млн. тут
Геотермальная энергия	**10,0** 3,0 млн. м^3/сутки 50 млн. Гкал	**2,34** 513 тыс.м^3/сутки 11,7 млн. Гкал	**0,40** 86,2 тыс.м^3/сутки 2 млн. Гкал
Малые ГЭС	**1,768** 5200 млн. кВтч	**0,578** 1700 млн. кВтч	**0,306** 900 млн. кВтч
Энергия ветра	**7182,84** 21126 млрд. кВтч	**17,957** 52 815 млн. кВтч	**0,0898** 264,1 млн. кВтч
Солнечная энергия	**8 600** 252 941 млн. кВтч 38 700 млн. Гкал	**52,8** 10 588 млн. кВтч 246 млн. Гкал	**0,0877** 1,7647 млн. кВтч 0,4355 млн. Гкал
Энергия биомассы	**1,517**	**1,348**	**0,559**
Низкопотенциальное тепло	**2,199**	**1,026**	**0,440**
Итого, млн. т у.т.	**15 798,324**	**76,05**	**1,8825**
Выработка электроэнергии	21 384 млрд. кВтч	65 103 млн. кВтч	1 165 млн. кВтч
Выработка теплоэнергии	38 750 млн. Гкал	257 млн. Гкал	2,4 млн. Гкал

Представленные значения ресурсных показателей свидетельствуют о том, что в районе создаваемого полигона можно с большой эффективностью использовать энергию солнца, ветра, перепадов температуры для генерирования электрической и тепловой энергии без использования органического и ядерного топлив. В соответствии с этим на Полигоне новых энергетических технологий рекомендуются к сооружению следующие экспериментальные и опытно-промышленные установки генерации и аккумулирования электрической энергии.

- Солнечная фотоэлектрическая установка пиковой электрической мощностью 1000 кВт. Для ее наземного размещения потребуется площадь 0,5…0,6 га.Такая площадь имеется на территории существующего полигона ОИВТ РАН. В качестве фотоэлектрических преобразователей можно использовать солнечные модули, серийно выпускаемые российскими предприятиями ООО «ХЕВЕЛ», Ново-чебоксарск, Чувашия, ООО «SunWays», Зеленодольск Московской области и др.
- Ветроэлектрическая установка номинальной мощностью 600 кВт. Такая установка может состоять, например, из десяти отечественных ветроэлектрических агрегатов типа «КОНДОР» номинальной мощностью по 60 кВт, установленных на расстояниях 100…120 м друг от друга.
- Система водородного аккумулирования электрической энергии, состоящая из электролизеровсуммарной производительностью по водороду до 50 Нм^3/ч, водородных компрессоров, создающих давление 3…5 МПа, группы водородных ресиверов емкостью по 10…20м^3, газопоршневой установки номинальной мощностью 400 кВт – 4 х 100 кВт (3рабочих и 1 резервный агрегаты, модернизированные по методике ОИВТ РАН для работы на водороде), системы автоматического микропроцессорного контроля и управления установкой. Все указанное оборудование может быть российской поставки.
- Установка хранения водорода в губчатых интерметаллических соединениях емкостью 100 нм^3.

- Установка аккумулирования электрической энергии с использованием новых типов электрохимических аккумуляторов: воздушно-цинковых, редокс-ванадиевых (с проточным электролитом) и т.п. Объем запасаемой энергии должен составлять не менее 3…5 МВтч.
- Установка с электрохимическими генераторами на базе водородных топливных элементов мощностью 100…200 кВт.
- Установка беспламенного окисления водорода с каталитическими теплогенераторами суммарной мощностью 200 кВт для обеспечения тепловой энергией собственных нужд полигона (отопление производственных помещений и гостиницы полигона, горячее водоснабжение для технологических и хозбытовых нужд).
- Солнечная установка горячего водоснабжения мощностью 200 кВт для обеспечения экономии водорода, потребляемого в качестве топлива каталитическими теплогенераторами. На установке могут использоваться плоские и трубчатые солнечные коллекторы отечественного или зарубежного производства, размещаемые на земле и крышах соответствующих зданий.
- Теплонасосная станция установленной тепловой мощностью 200…300 кВт с использованием теплонасосных установок класса «вода – вода», «грунт – вода», «воздух – вода», «воздух – воздух». Эта станция предназначается для частичного покрытия отопительных нагрузок полигона и ближайших коммунальных потребителей.
- Система аккумулирования тепловой энергии емкостью до 2 Гкал с использованием незамерзающих, нетоксичных и негорючих теплоносителей.
- Автономные солнечные светодиодные светильники наружного освещения территории полигона.

Целесообразно в состав полигона включить также опытный цех или участок для изготовления специальных технологических узлов, малых экспериментальных установок, позволяющих производить исследование работоспособности концептуально новых конструкций, разрабатываемых ОИВТ РАН и ИПГ ДНЦ и их компаньонами.

На территории полигона целесообразно также создание учебно-лабораторного корпуса, в котором на хозрасчетной основе смогут проходить практику студенты и аспиранты Российской Федерации.

Представленный выше набор установок для получения и аккумулирования электрической итепловойэнергии позволит осуществить гарантированное энергоснабжение потребителей первой категории самого полигона и ближайшего окружения – коммунальной сферы или промышленных предприятий.

По предварительной оценке полигон новых энергетических технологий сможет функционировать на основе самоокупаемости: все инвестиции, вкладываемые в создание Полигона будут возвращены инвестору в течение 10…12 лет, после чего инвестор в течение многих лет сможет еще и получать многомиллионные ежегодные прибыли.

Проектирование реконструкции полигона ВИЭ для превращения его в полигон новых энергетических технологий может выполнить Институт «Ростовтеплоэлектропроект», Ростов-на-Дону, имеющий более чем 30-летний опыт разработки и внедрения энергетических установок с использованием ВИЭ и применением водорода. Варианты возможной компоновки основных сооружений нового полигона показаны на рис.1 и рис.2.

Создание Полигона новых энергетических технологий обеспечит возможность решать многие энергетические и научно-технические проблемы не только для Республики Дагестан и для юга России, но и, одновременно, с определенным приближением, для всей Российской Федерации.

Рис. 1. Общий вид одного из возможных вариантов полигона.

Слева – лабораторный корпус, справа – главный технологический корпус Полигона, в центре – корпус с оборудованием для аккумулирования электрической энергии, справа, за главным корпусом – поля солнечных фотоэлектрических модулей.

Рис. 2. Экспериментальный участок для испытаний нового оборудования

Литература:

1. Зайченко В.М., Чернявский А.А. Автономные системы энергоснабжения. М.: «НЕДРА», 2015. 286 с.
2. GlobaleTrendsbeimweltweitenInwestmentinerneuerbareEnergien//Galvanotechnic. – 2012. – V.103. – No 10. – p. 2266-2269. Нем.
3. Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года. Решение Правительства РФ от 09.01.2009 № 1Р.

4. Н.П.Котова, Ю.С.Колесников, В.Н.Овчинникова. Экономика юга России: особенности функционирования и перспективы развития // Проблемы прогнозирования, 2015. – с.96-104.
5. Справочник по ресурсам ВИЭ России и местным видам топлива (Показатели по территориям). М.: «ИАЦ Энергтя», 2007. 272 с.

ПОТЕНЦИАЛ ВИЭ В АРКТИКЕ: НОВЫЕ ЗАДАЧИ[1]

Бушуев В.В.[1], Зайченко В.М.[1], Моргунова М.О.[1], Соловьев Д.А.[1,3], Чернявский А.А.[2]

[1]Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)
[2]Филиал «ЭНЕКС» ОАО «Ростовтеплоэлектропроект»
[3] e-mail: solovev@guies.ru Тел.: (495) 484-19-55

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные возможности использования возобновляемых энергетических ресурсов Арктической зоны России. Приведены примеры успешного применения ВИЭ в целях организации эффективного и экологически безопасного энергоснабжения различных групп потребителей.
Ключевые слова: Арктика, энергетические установки, ВИЭ, ресурсы, малая и распределенная энергетика, децентрализованные системы энергоснабжения

Арктика богата полезными ископаемыми, прежде всего нефтью и газом. В арктической зоне находится 13% мировых запасов нефти, 30% природного газа, 20% газоконденсата [1]. При этом 16% этих богатств находится на сухопутной территории арктических государств и 84% - на шельфе Северного Ледовитого океана, где значительная часть принадлежит России.

По оценке Минприроды России, начальные извлекаемые суммарные ресурсы арктической зоны составляют 258 млрд т условного топлива. В то же время в Арктике пока остаются неразведанными более 90% шельфа и порядка 53% территории суши. На территории арктической зоны России расположено 385 месторождений углеводородного сырья. Добыча нефти в Арктике в 2015 году составила 82,5 млн т (15,5% от общероссийской добычи нефти), газа – 516,2 млрд м3 (81,2%)[2]. По данным Минэнерго РФ, в ближайшей перспективе планируется ввести в разработку несколько месторождений, расположенных на суше Арктической зоны. Это Лодочное, Сузунское, Русское, Тагульское, Западно-Мессояхское и Восточно-Мессояхское нефтяные месторождения, а также Кынско-Часельский нефтяной участок и Южно-Тамбейское газовое месторождение [2]. Самый крупный новый проект, реализуемый в настоящее время на территории Арктической зоны, – это «Ямал СПГ» [3].

Очевидно, что для освоения таких объемов трудноизвлекаемых ресурсов в сложных климатических условиях требуются эффективные решения по энергоснабжению, причем не только объектов на самих месторождениях, но и сопутствующей инфраструктуры, в том числе населенных пунктов. В этой связи в арктической зоне хорошей альтернативой традиционным источникам энергии является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые могут быть более эффективны и имеют существенный потенциал роста [4].

Главная цель строительства и эксплуатации объектов ВИЭ на крайнем севере и в Арктике – экономия ресурсов при энергоснабжении потребителей [5]. Отдаленность и труднодоступность населенных пунктов, неразвитая инфраструктура, сложная логистика ведут к серьезному удорожанию топлива для дизельных станций. Так, около 60% себестоимости вырабатываемой электроэнергии приходится на топливную составляющую. Установка в отдаленных энергоучастках объектов ВИЭ приводит к сокращению затрат, что делает реализацию этих проектов экономически эффективной [6].

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00640\17

Потенциал развития ВИЭ в Арктике просто огромен и равен почти 15-кратному потреблению всей страны [7]. В основном это солнечная и ветровая энергия. На сегодня общий объем мощности объектов ВИЭ в арктической зоне составляет порядка 1 гигаватта.

Для развития солнечной энергетики в России в последние годы созданы необходимые условия: ряд отечественных предприятий освоил в достаточно больших объемах серийный выпуск весьма эффективных и недорогих фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), работающих в широком диапазоне температур окружающего воздуха. Причем чем ниже эта температура, тем эффективнее работают ФЭП, что хорошо соответствует условиям Арктики. Вместе с тем полугодовой период полярной ночи ведет к необходимости решать вопросы долговременного аккумулирования больших количеств электроэнергии. И сегодня эти вопросы активно решаются и в мире, и в России. Появились такие электрохимические аккумуляторы как редокс-ванадиевые, цинк-воздушные и т.п., имеющие срок службы до 30 лет, малую удельную массу на 1 кВт·ч запасаемой энергии, саморазряд не более 1-2% в год, большое количество допустимых циклов заряда-разряда и допускающие почти полный разряд при работе без потери энергетической емкости. Такие аккумуляторы позволяют осуществить круглогодичное энергообеспечение потребителей мощностью до 10-100 кВт. Для бóльших мощностей разрабатываются технологии водородного аккумулирования. В России эти вопросы решаются совместно институтами ОИВТ РАН (Москва) и «Ростовтеплоэлектропроект» (Ростов-на-Дону) [8].

Ветроэнергетика обладает меньшим потенциалом. В России освоено производство ветроэлектрических установок (ВЭУ) небольшой мощности – 0,5 – 30 кВт. Производство же больших ВЭУ – мегаваттного класса – в ближайшей перспективе на просматривается. Зарубежное ветроэлектрическое оборудование такого класса пока оказывается недоступным из-за санкций. По этой же причине не решаются вопросы создания совместных с зарубежными компаниями предприятий по производству крупных ВЭУ. При этом для условий Арктики необходимы разработки ВЭУ, работающих надежно при весьма низких отрицательных температурах, при обледенениях, при больших скоростях ураганных ветров. Несмотря на это, потенциал ветровой энергии, особенно на арктическом побережье, весьма высок. Среднегодовые скорости ветра здесь доходят до 7 – 9 м/с [9; 10]. При этом коэффициент использования установленной мощности ВЭУ превышает 40%[11; 12].

Весьма эффективным может стать комбинированное использование энергии солнца и ветра [13]. Летом эффективно работают ФЭП, зимой – ВЭУ. И при этом оказывается возможным использовать системы аккумулирования электроэнергии с минимально-возможной емкостью и стоимостью [14]. Такие комбинированные системы могут обеспечить надежное гарантированное энергоснабжение для потребителей первой и особой первой категорий, например, для военного оборудования, для радиолокационных станций, для систем передачи информации, для больниц, школ и т.п.

С успехом может быть использована и энергия биомассы в арктической зоне: отходы лесоперербатывающих и деревообрабатывающих предприятий, отходы сельскохозяйственных предприятий, биологические отходы различных производств и хозяйственно-бытовые отходы. Новые высокоэффективные технологии конверсии таких отходов в электрическую и тепловую энергию без вредных выбросов в окружающую среду, предложены ОИВТ РАН [14].

Существует возможность использования энергии течений и волн, приливов и отливов, разности температур океанской воды в разных слоях, энергии низкопотенциальных источников с применением тепловых насосов для повышения температур теплоносителей и др. [15; 17]. Многие из этих направлений недостаточно разработаны. Однако требуется проводить дополнительные исследования для определения перспективности использования этих видов ВИЭ в Арктике.

Поскольку поселения и промышленные предприятия в арктическом регионе децентрализованы и находятся на значительных расстояниях друг от друга, невозможно создать систему централизованного энергоснабжения потребителей. Более целесообразным считается создание в Арктике автономных распределенных систем энергообеспечения на базе ВИЭ, приближенных к потребителям и призванным заместить существующие дизельгенераторные установки (ДГУ) требующие ежегодного завоза дорогостоящего дизельного топлива. На топливоснабжение Арктических территорий ежегодно расходуется более 110 млрд руб. [16]. При этом «северный» завоз топлива практически удваивает его стоимость. Себестоимость генерируемой на ДГУ электроэнергии доходит до 40-100 руб./кВт·ч. Поэтому, несмотря на требуемые инвестиции на внедрение систем с ВИЭ, все затраты будут окупаться в короткие сроки при высокой финансово-коммерческой эффективности как для инвесторов, так и для территориального и федерального бюджетов.

Создание даже малых солнечно-ветровых установок для поселений с численностью населения 10-100 человек может существенно улучшить условия жизни. Вышеупомянутые системы могут применяться для энергообеспечения временных стоянок оленеводов, охотников, рыболовов, бригад геологоразведки, туристов. Малые солнечно-ветровые установки в мобильном (модульном) исполнении могут перемещаться вместе с поселениями.

Технологии ВИЭ ориентированы не только на малых потребителей, но и могут обеспечить большие мощности для энергоснабжения таких потребителей как предприятия нефтегазодобычи, нефтепереработки, лесопереработки, морские и речные порты, аэродромы, научно-исследовательские центры, погранзаставы.

Примеры внедрения ВИЭ в Арктике уже имеются. Так, в 2014 году в поселке Пялица Мурманской области введена комбинированная солнечно-ветродизельная установка 4 ВЭУ по 5 кВт, ФЭП мощностью 15 кВт и две дублирующих ДГУ по 30 кВт [18]. В результате 14 жителей поселка получили круглосуточное электроснабжение, тогда как ранее электроснабжение обеспечивалось с помощью ДГУ по 8 – 10 часов в сутки. На работу ДГУ расходовалось 90 т дизельного топлива в год, тогда как с использованием комбинированной установки при круглосуточном электроснабжении расходуется не более 12 т в год.

В 2015 году в Мурманской области были смонтированы три малых солнечно-ветровых установки в поселках Чаваньга, Тетрино и Чапома [18]. Общая численность населения этих поселков – 190 человек, тогда как летом количество людей возрастает в несколько раз. Из общей требуемой мощности 515 кВт за счет ВИЭ сегодня обеспечивается 34% - 175 кВт (рис. 1). Стоимость проекта – 104 млн. руб. Финансирование осуществлено за счет местного бюджета – 5%, областного – 80% и федерального – 15%.

Есть опыт и более крупных экспериментов с ВИЭ [19]. Так на Новой Земле в национальном парке «Русская Арктика» действует солнечно-ветровая установка в несколько сотен киловатт (рис. 2), а в пос. Тикси действует установка мощностью около 8 МВт.

Сегодня работы по внедрению систем с ВИЭ в Арктике носят несистематизированный характер. Поэтому необходима разработка общей научно-обоснованной схемы размещения энергетических установок с использованием ВИЭ и систем малой энергетики, чтобы эти работы приобрели целенаправленность, были обеспечены надежным финансированием и давали максимальную эффективность. Помимо этого, следующие основные задачи, на наш взгляд, требуют первоочередного решения для арктических территорий:

- проведение научных исследований в области создания и адаптации специального оборудования для широкого внедрения ВИЭ в арктических условиях;
- проведение научных исследований по созданию эффективных систем долговременного аккумулирования больших объемов электрической энергии;
- поддержка и развитие приоритетных отечественных разработок в области обращения отходов, таких, например, как высокотемпературная конверсия органических отходов в электрическую и тепловую энергию;

Рис.1. Солнечная часть энергоустановки в пос. Тетрино Мурманской области. Источник: [18].

Рис.2. Солнечная и ветровая установки в национальном парке «Русская Арктика». Источник: [19].

- создание и освоение серийного производства автономных мобильных комплексов энергоснабжения на базе ВИЭ для перемещаемых стоянок;
- разработка и освоение производства систем надежного гарантированного круглогодичного энергообеспечения с использованием ВИЭ без применения ДГУ для потребителей первой и особой первой категорий;
- разработка федеральной и региональных программ внедрения новых систем энергоснабжения Арктики.

Реализация предлагаемых мероприятий даст значительный экономический эффект, а вложенные в них инвестиции окупятся весьма быстро, как показывают расчеты. Использование ВИЭ также позволит исключить нарушение экологического равновесия в таком уникальном природном регионе как Арктика.

Литература:

1. Еремин Н.А., Кондратюк А.Т., Еремин А.Н. Ресурсная база нефти и газа арктического шельфа России // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. 2009. №1
2. Забелло Е. Альтернативная энергия Арктики | PRO-ARCTIC [Электронный ресурс]. URL: http://pro-arctic.ru/16/12/2016/resources/24569#read (дата обращения: 02.08.2017).
3. Цзюньсон Ч. Проект «Ямал СПГ» откроет новую главу российско-китайского сотрудничества в сфере энергетики | Политика | ИноСМИ - Все, что достойно перевода [Электронный ресурс]. URL: http://inosmi.ru/politic/20170616/239601801.html (дата обращения: 02.08.2017).
4. IEA. World Energy Outlook 2016 // Int. Energy Agency Paris, Fr. 2016. С. 28.
5. Новости – Якутскэнерго [Электронный ресурс]. URL: https://yakutskenergo.ru/About_company/press-center/news-in-detail.php?ELEMENT_ID=13646977 (дата обращения: 02.08.2017).
6. «РАО ЭС Востока» строит три новые солнечные станции в отдаленных поселках Якутии [Электронный ресурс]. URL: https://yakutskenergo.ru/About_company/press-center/news-in-detail.php?ELEMENT_ID=12827567 (дата обращения: 02.08.2017).
7. Габдерахманова Т.С. и др. Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в арктической зоне РФ // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 19–20. С. 41–53.
8. Антропов А.П., Батенин В.М., Зайченко В.М. Новые технологии распределенной энергетики // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 1. С. 111.
9. Андреенко Т.И., Габдерахманова Т.С., Данилова О.В. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 160 С.
10. Попель О.С. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие. Москва: Изд-во МФТИ, 2010. 56 С.
11. Shilova L.A. и др. The use of renewable energy sources for the introduction of construction projects in the Arctic regions // Int. J. Appl. Eng. Res. 2015. Т. 10. № 20. С. 40788–40790.
12. Попель О.С. О перспективах и нишах использования возобновляемых энергоресурсов в арктической зоне Российской Федерации // КРУГЛЫЙ СТОЛ: ЭНЕРГЕТИКА ЗАПОЛЯРЬЯ Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина 18 - 19 февраля 2016 г. , 2016. С. 16.
13. Morgunova M.O., Solovjov D.A. Decentralized power supply based on local and renewable energy sources: a case of Russian Arctic. Moscow: International Geographical Union Regional Conference: GEOGRAPHY, CULTURE AND SOCIETY FOR OUR FUTURE EARTH, 17-21 August 2015, Moscow, Russia, IGU 2015 Book of Abstract: IGU 2015 – 3029, 2015. С. 103.
14. Зайченко В.М., Чернявский А.А. Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.
15. Соловьев А.А. и др. Установка для преобразования низкопотенциального геотермального // 2017.
16. Никифоров О. Альтернатива энергетике в Арктике / НГ-Энергия / Независимая газета [Электронный ресурс]. URL: http://www.ng.ru/energy/2017-05-19/100_arctica190517.html (дата обращения: 02.08.2017).
17. Соловьев Д.А., Шилова Л.А., Павловский К.П. Проект сооружения полярной термальной электростанции на территории ахипелага Шпицберген. Москва: Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник материалов Международной научной конференции (12–13 ноября 2014 г., Москва) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т., 2015. С. 581–584.
18. Киреева А. Три удаленных поселка Мурманской области запитают от «зеленой» энергии - Bellona.ru [Электронный ресурс]. URL: http://bellona.ru/2014/10/08/tri-udalennyh-poselka-murmanskoj-obl/ (дата обращения: 02.08.2017).

19. На Новой Земле ведутся исследования по использованию ВИЭ в условиях Арктики [Электронный ресурс]. URL: http://elektroas.ru/na-novoj-zemle-vedutsya-issledovaniya-po-ispolzovaniyu-vie-v-usloviyax-arktiki (дата обращения: 02.08.2017).

О СОЗДАНИИ ЦЕНТРА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН

Алхасов А.Б.[1], Чернявский А.А.[2], Бадавов Г.Б.[1], Алиев Р.М.[3], Ниналалов С.А.[1]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: lotos155@yandex.ru;
[2]НИИПИ Институт "Ростовтеплоэлектропроект";
Ростов-на-Дону, Россия; 344002, Будённовский пр-т, д.2.
[3]ФГБОУ ВПО Дагестанский государственный технический университет;
Махачкала, Россия, 367015, пр-т И.Шамиля, 70а;

Рассматриваются вопросы долгосрочного научно-технологического мониторинга и прогнозирования динамики вероятных изменений валовых, технических и экономических значений потенциалов возобновляемых источников энергии на территории Республики Дагестан для обеспечения основных потребностей энергетики и ускорения развития экономики Республики на период до 2040 года.

Дагестан – самый южный субъект Российской Федерации, входит в состав Северо-Кавказского федерального округа. Численность населения 3042 тыс. чел., из них городского – 1372 тыс. чел. (45%), сельского – 1670 тыс. чел (55%). В составе Дагестана 42 муниципальных района и 10 городских округов [1].

Дагестан – депрессивный и глубоко дотационный регион. По общему уровню развития республика занимает 60 место среди 85 субъектов Российской Федерации. В 2015 г. его валовой региональный продукт составил 538 млрд. руб. Безвозмездные поступления из федерального бюджета составляют 69% республиканского бюджета. В 2015 г. доля собственных доходов (28,4 млрд. руб.) в суммарном объеме доходов бюджета (90,5 млрд. руб.) составила 31% [2].

Для Дагестана характерна низкая обеспеченность запасами классических видов органического топлива (уголь, нефть, газ): ввозится до 100% твердого топлива и до 93% природного газа [3], что ложится тяжелым бременем на бюджет республики. Из года в год снижаются показатели добычи углеводородов. В 2015 г. добыча нефти составила 175,6 млн. тонн (27,7% к 1990 году), природного газа - 246 млн. куб. метров (28% к 1990 году). Сегодня доля местных энергоресурсов в энергобалансе составляет 36%, против 65% - в 1990 г. [4].

Основным видом используемого топлива является природный газ. Уровень газификации составляет 96,8% - один из самых высоких на Юге России.

В целом структура топливно-энергетического баланса республики характеризуется высокой долей природного газа (49,3%) и гидроэнергии (16,2%), небольшой долей нефтепродуктов (5,3%), твердого и жидкого топлива (0,6%) и незначительной долей возобновляемых источников энергии (0,27%).

Топливно-энергетические ресурсы в Дагестане представлены в основном нефтью, природным газом, гидро- и геотермальной энергией. Поскольку нефть вывозится, то потребность в продуктах нефтепереработки удовлетворяется за счет ввоза из других регионов и частично за счет местного производства.

Так в 2015 г. в Дагестане было произведено 10,5 тыс. т прямогонного бензина (4,2% от потребности), 12,7 тыс. т дизтоплива (37,4% от потребности), 3,4 тыс. т. керосина (26,8% от потребности) и 35,1 тыс. т мазута, что даже превысило потребность (табл. 1).

В 2015 г. суммарный объем производства энергоресурсов в Дагестане составил 3957 тыс. т у.т. при валовом потреблении 8810 тыс. т у.т. Отсюда и низкая энергообеспеченность, которая с 1990 г. снизилась до 36%, или более чем в два раза. Наиболее приемлемый выход из этой ситуации – это использование возобновляемых источников энергии, потенциал которых многократно превышает годовые потребности экономики в топливе и электроэнергии (табл. 2) [5, 6].

Таблица 1.

Рынок топливно-энергетических ресурсов Дагестана

Наименование ТЭР	Годы					
	2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**
Нефть, тыс. тонн	194,3	208,8	193,8	184,9	165,1	175,6
Газ, млн. куб. м	325,6	340,1	326,2	288,1	281,1	246,0
Прямогонный бензин, тыс. тонн	30,6	28,3	22,5	34,7	39,9	10,5
Дизельное топливо, тыс. тонн	27,0	25,0	17,7	40,7	43,4	12,7
Мазут топочный, тыс. тонн	50,2	53,1	37,4	60,2	60,3	35,1
Керосин, тыс. тонн	27,7	27,1	19,9	17,9	19,4	3,4
Электроэнергия, млн. кВтч	5541,1	4329,4	3911,5	5262,4	4073,3	4251,7
Тепловая энергия, тыс. Гкал	1497,9	1458,8	1573,6	1590,0	1752,1	1799,5

С этой целью Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН планирует создание в своем составе Центра научно-технологического мониторинга и прогнозирования **(ЦНТМиП)** динамики изменений валовых, технических и экономических потенциалов ВИЭ и разработки на этой базе предложений по развитию экологически чистой энергетики, которая будет содействовать экономическому росту Республики Дагестан.

В Институте проблем геотермии ДНЦ РАН уже много лет ведутся научные исследования практически **по всему спектру использования ВИЭ. Это является объективной предпосылкой к созданию рассматриваемого Центра и научно-технологического мониторинга ВИЭ. В**ыявление технологических и инновационных прорывов в этой области является высоковероятным.

В настоящее время в институте работает 127 человек, в т.ч. 72 научных сотрудника, среди которых 13 докторов и 30 кандидатов наук. Институт проводит исследования в области энергетики, теоретической и практической геотермии, теплотехники, механики, теплофизики, термодинамики и гидрогеологии.

В структуре Института два отдела и восемь лабораторий. В *отдел энергетики и геотермомеханики* входят лаборатории энергетики, геотермомеханики, физико-химии термальных вод и комплексного освоения ВИЭ. *Отдел физико-технических основ геотермии* включает лаборатории теплофизики, математического моделирования и мониторинга, информационных технологий в энергетике, и геотермальных энергетических ресурсов.

Дагестан известен как пионер в освоении глубинного тепла земли в СССР, обладает богатыми промышленными ресурсами геотермальных вод и даже пароводяных смесей. Условия для их использования самые благоприятные. Здесь широко распространены локальные термоаномальные зоны с необычайно высокими пластовыми давлениями и температурами.

Однако сегодняшнее состояние геотермального производства в республике можно признать удовлетворительным только в сравнении с остальными регионами РФ, сравнение с развитым миром Дагестан не выдерживает. Основной проблемой является сильное технологическое отставание отрасли, отсутствие социального заказа и государственной поддержки развития в системном его понимании.

Таблица 2.

Ресурсный потенциал ВИЭ в Республике Дагестан

Вид ВИЭ	Валовой потенциал, млн. т у.т.		Технический потенциал, млн. т у.т.		Экономический потенциал, млн. т у.т.	
	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г.	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г.	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г.	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г.	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г.	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г.
Геотермальная энергия	**10,0** 3,0 млн. м^3/сутки 50 млн. Гкал	**10,0** 3,0 млн. м^3/сутки 50 млн. Гкал	**2,34** 513 тыс. м^3/сутки 11,7 млн. Гкал	**2,34** 513 тыс. м^3/сутки 11,7 млн. Гкал	**0,40** 86,2 тыс. м^3/сутки 2 млн. Гкал	**0,40** 86,2 тыс. м^3/сутки 2 млн. Гкал
Малые ГЭС	**1,768** 5,2 млрд. кВтч	**5,593** 16,45 млрд. кВтч	**0,578** 1,7 млрд. кВтч	**1,453** 4,27 млрд. кВтч	**0,306** 0,9 млрд. кВтч	**0,768** 2,25 млрд. кВтч
Энергия ветра	**7 182,84** 21 126 млрд. кВтч	**590,76** 1737,53 млрд. кВтч	**17,957** 52,815 млрд. кВтч	**140,6** 413,5 млрд. кВтч	**0,0898** 0,264 млрд. кВтч	**0,703** 2,06 млрд.кВтч
Солнечная энергия	**8 600** 1770 млрд. кВтч 39990 млн. Гкал	**8376,88** н/д н/д	**52,8** 10,588 млрд. кВтч 246 млн. Гкал	**630,6** 525,5 млрд. кВтч 2259 млн. Гкал	**0,0877** 0,0017 млрд. кВтч 0,4355 млн. Гкал	**1,046** 0,02 млрд. кВтч 3,05 млн. Гкал
Биомасса, всего, в т.ч.: *- отходы растениеводства* *- отходы животноводства* *- потенциал ТБО и ОСВ* *- потенциал отходов ЛПК* *- низкопотенциальное тепло*	**3,689** н/д *0,222* *0,950* *0,218* *0,100* *2,199*	**1,716** н/д *0,319* *1,067* *0,281* *0,049* *н/д*	**2,347** н/д *0,222* *0,950* *0,149* *0* *1,026*	**1,66** 3,772 млрд. кВтч 7,750 млн. Гкал *0,319* *1,067* 0,268 *0,006* *н/д*	**0,972** н/д *0,095* *0,343* *0,093* *0,001* *0,440*	**0,687** 0,14 млрд. кВтч 3,19 млн. Гкал *н/д* *н/д* *н/д* *н/д* *н/д*
Итого	**15 798 млн. т у.т.**	**8985 млн. т у.т.**	**76 млн. т у.т.**	**776 млн. т у.т.**	**1,85 млн. т у.т.**	**3,6 млн. т у.т.**
	22 901 млрд. кВтч	1753 млрд. кВтч	65,1 млрд. кВтч	780 млрд. кВтч	1,16 млрд. кВтч	4,47 млрд. кВтч
	40 040 млн. Гкал	50 млн. Гкал	257,7 млн. Гкал	2278 млн. Гкал	2,43 млн. Гкал	8,24 млн. Гкал

Гидроэнергетические ресурсы республики располагают потенциалом в 55,2 млрд. кВтч, что на порядок превышает годовые потребности экономики. 15 крупных и малых ГЭС ежегодно вырабатывают 5 млрд. кВтч экологически чистой энергии. Их доля в электробалансе составляет 98,6% [7].

В группу ВИЭ входят малые ГЭС мощностью до 25 МВт – Агульская, Амсарская, Ахтынская, Гергебильская, Курушская, Гунибская (рис.1) и др., имеют мощности от 0,5 до 17,8 МВт. Суммарная мощность всех малых ГЭС Дагестана составляет 50,3 МВт. Имеются большие возможности по сооружению новых высокоэффективных малых ГЭС.

Большие возможности имеются в области *использования солнечной энергии,* которые уже начали реализовываться. В г. Каспийске завершается строительство первой крупной фотоэлектрической станции мощностью 5 МВт. Первая очередь этой станции уже введена в эксплуатацию и действует в режиме мощности 1 МВт (рис.2). Запланировано строительство еще двух солнечных станций общей мощностью 45 МВт в Хунзахском районе Дагестана.

Рис. 1. Одна из малых ГЭС Дагестана – Гунибская ГЭС мощностью 15 МВт

Рис. 2. Каспийская фотоэлектрическая СЭС

Использование солнечной энергии в Дагестане предоставляет широкие возможности и для создания систем теплоснабжения. Горячее водоснабжение и, во многих случаях, даже отопление (рис.3) окупаются в течение 3…5 лет при снижении стоимости получаемой тепловой энергии в несколько раз в сравнении с тарифами, предлагаемыми в централизованных системах теплоснабжения, или со стоимостью тепла, получаемого в автономных водогрейных котельных, работающих на привозном топливе.

По оценкам институтов ОИВТ РАН и "Ростовтеплоэлектропроект", выполненным в 2014 г., валовый потенциал солнечной энергии для Дагестана составляет 693 млрд. кВтч/год, технический потенциал – 65 млрд. кВтч/год, экономический – 34 млрд. кВтч/год.

Однако несколько позже в Атласе, подготовленном специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова, Института энергетики НИУ ВШЭ и Объединенного института высоких температур РАН эти данные претерпели существенные изменения [6]. Валовый потенциал солнечной энергии теперь оценивается в 8376 млн. т у.т., технический – 525 млрд. кВтч/год, а экономический – 0,02 млрд. кВтч/год (см. табл. 2).

Годовой приход солнечной радиации на поверхность, наклоненную к горизонтали под углом, равным широте местности, может составлять до 2000…2500 кВтч/м^2. Потенциал солнечной энергии превышает потенциалы всех других ВИЭ на территории Дагестана. Доля Дагестана в потенциале солнечной энергии Северного Кавказа – 27,3%.

Рис. 3. Высокогорная солнечная станция отопления. Высота над уровнем моря – 1200 м

Энергия ветра на территории Республики Дагестан по оценкам, учитывающим современные технические возможности, обладает валовым потенциалом 251 млрд. кВтч/год, техническим потенциалом – 20…25 млрд. кВтч/год, экономическим – 2…3 млрд. кВтч/год [5, 6]. Наиболее сильные ветры наблюдаются на побережье Каспийского моря. Мощность ветроэлектрических станций, при использовании ветроагрегатов по 3…5 МВт (рис.4), может составлять сотни мегаватт.

Геотермальная энергия обладает в Дагестане валовым потенциалом 50,0 млн. Гкал/год. Технический потенциал геотермальной энергии составляет 11,7 млн. Гкал/год, экономический – 2,0 млн. Гкал/год [5, 6]. Наиболее крупные месторождения термальных вод – Махачкала-Тернаирское, Избербашское, Кизлярское, Манас. В настоящее время геотермальная энергия используется для получения тепла на отопление и горячее водоснабжение жилых домов в гг. Кизляр, Махачкала и Избербаш. Планируется сооружение нескольких автономных ГеоЭС мощностью по 10 МВт и более для получения дешевой электроэнергии. Важной особенностью ГеоЭС является возможность обеспечения стабильной выработки электрической и тепловой энергии независимо от времени года, от изменения погодных условий и пр. в течение многих лет – до выработки запасов геотермальных вод месторождений. Поэтому в составе комплексов генерирующих мощностей со смешанным использованием ВИЭ геотермальные электростанции могут играть роль базовых источников электрической энергии в системе энергоснабжения.

Прочие возобновляемые источники энергии в Республике Дагестан – биомасса, низкопотенциальное тепло природного и техногенного происхождения, волны и др. – обладают также достаточно высоким экономическим потенциалом – 1,8 млрд. кВтч/год.

Одним из главных элементов разрабатываемого Центра научно-технологического прогнозирования станет выбор прорывных направлений развития энергетики Дагестана методами Дельфи и Форсайта (SWOT-анализ, бенчмаркинг, библиометрия, и др.).

Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН, на базе которого создается ЦНТМиП, имеет значительный опыт в области проведения научных исследований по про-

гнозированию и определению приоритетов развития науки и технологий на Северном Кавказе [8…21]. Институтом разработаны эффективные технологические схемы освоения энергии низко-, средне- и высокопотенциальных геотермальных вод, создана теория геотермальных циркуляционных систем, исследованы процессы тепломассопереноса в системах отбора геотермального тепла, разработаны модели ТЭБ республики с учетом использования ВИЭ. Институт также принял участие в подготовке Европейского справочника *"Best Practice Handbook"* по наилучшим технологиям разработки нетрадиционных геотермальных ресурсов (главы 3 и 4).

Партнерами Института геотермии в создании ЦНТМиП являются:

• Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва;

• Энергетический институт (ЭНИН) им. Г.М. Кржижановского, г. Москва;

• Институт "Ростовтеплоэлектропроект", г. Ростов-на-Дону;

• ООО "Геоэкопром", г. Махачкала.

Планируемая методология исследований, контуры научного и технологического будущего, сценарии развития.

1. Разработка методик определения валовых, технических и экономических потенциалов ВИЭ на низменных территориях, в предгорных и горных районах.

2. Разработка сценариев развития ВИЭ в Республике Дагестан с учетом прогнозов экономического развития Республики.

3. Разработка научных принципов постепенного замещения традиционных энергетических мощностей электростанциями и установками, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, с учетом обеспечения устойчивости региональных энергетических систем [22-25].

Используемый инструментарий научно-технологического прогнозирования.

1. Создание сети климато-актинометрических метеостанций на территории Республики Дагестан для научного прогнозирования возможностей использования ВИЭ.

2. Разработка и внедрение методов дистанционной передачи, сбора и обработки данных метеостанций с подготовкой информационно-аналитической справочной базы данных по потенциалам ВИЭ на территории Республики Дагестан.

Прогноз научно-технологического развития выбранной области научных знаний (основные положения прогноза).

1. Оценка сезонных, годовых и многолетних изменений значений потенциалов ВИЭ в Республике Дагестан на базе известных и вновь получаемых данных по результатам климато-актинометрических наблюдений и измерений.

2. Прогнозирование длиннопериодных колебаний климатических и актинометрических параметров в различных районах Республики Дагестан.

3. Прогнозный анализ оптимизации развития энергетики Республики Дагестан с преимущественным использованием ВИЭ.

4. Разработка рекомендаций по оптимизации внедрения ВИЭ в основных районах Республики Дагестан на период до 2040 года.

5. Прогнозные оценки воздействия ВИЭ на экономику и экологическую обстановку в Республике Дагестан на период до 2040 года.

Ожидаемые результаты деятельности центра научно-технологического мониторинга и прогнозирования развития ВИЭ на 2018… 2020 годы.

2018 год

Анализ возможностей использования в Республике Дагестан потенциалов основных видов возобновляемых источников энергии: солнечной, ветровой, гидравлической, геотермальной, биомассы и низкопотенциального тепла.

2019 год

1. Разработка схемы размещения крупных энергетических объектов, функционирующих на базе возобновляемых источников энергии, на территории Республики Дагестан.

2. Разработка предложений для энергообеспечения удаленных потребителей энергии с использованием возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан.

3. Анализ финансово-коммерческой эффективности использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан.

2020 год

1. Создание учебно-демонстрационных комплексов по использованию ВИЭ в энергетике, промышленности и сельском хозяйстве для обеспечения возможностей организации учебно-производственной практики студентов и аспирантов, обучения специалистов проектированию, монтажу и эксплуатации.

2. Разработка программы освоения возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан на период до 2040 года.

Потенциальные заказчики результатов деятельности ЦНТМиП:

- Министерство транспорта, энергетики и связи РД, г. Махачкала,
- Министерство экономики и территор.развития РД, г. Махачкала,
- Министерство сельского хозяйства и продовольствия РД, г. Махачкала,
- Министерство строительства, архитектуры и ЖКХ РД, г. Махачкала,
- Министерство образования и науки РД, г. Махачкала,
- Дагестанский филиал ПАО "РусГидро", г. Махачкала,
- АО "Дагестанская сетевая компания" ПАО "МРСК Северного Кавказа",
- ООО "Альянс-ВИЭ", г. Ростов-на-Дону.

Команда создаваемого ЦНТМиП: д.т.н., проф. Алхасов А.Б. (рук. Центра), д.т.н., проф. Абдулагатов И.М., к.х.н. Рамазанов О.М., к.ф.-м.н. Ниналалов С.А., д.т.н., проф. Алишаев, к.т.н. Алхасова Д.А., д.т.н., проф. Алиев Р.М., д.т.н., проф. Вердиев М.Г., д.ф.-м.н. Аливердиев А.А., с.н.с. Бадавов Г.Б. (координатор), к.т.н. Чернявский А.А. (консультант).

Литература:

1. *Федеральная* служба государственной статистики. http://www.gks.ru.
2. *Рейтинг* социально-экономического положения субъектов РФ. Итоги 2015. Группа РИА рейтинг. Москва, 2016. http://www.riarating.ru.
3. *Дагестан* в цифрах – 2016 г. Крат. стат. сб. / Дагестанстат. Махачкала. 2016.
4. *Ввоз,* вывоз товаров и продукции производственно-технического назначения по Республике Дагестан за 2015 год. Стат. бюллетень/Дагестанстат. Махачкала. 2016.
5. *Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Чернявский А.А.* Возможности использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 21-24 сентября 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2015. С. 78-90.
6. *Атлас* ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т.И. Андреенко, Т.С. Габдерахманова, О.В. Данилова и др. - РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2015. 160 с.
7. *Муслимов В.М.* Водноэнергетические ресурсы Дагестана. Махачкала. Дагестанское книжное издательство, 1964. 105 с.
8. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. – М.: Физматлит, 2010. – 256 с.
9. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.: Физматлит, 2008. – 376 с.
10. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Алхасова Д.А., Каймаразов А.Г., Рамазанов М.М.* Освоение низкопотенциального геотермального тепла / Под ред. академика В.Е. Фортова. – М.: Физматлит, 2012. – 280 с.

11. *Алхасов А.Б.* Технологии освоения геотермальных ресурсов пластового типа // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 21-24 сентября 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2015. С. 135-145.
12. *Алхасова Д.А.* Разработка технологий освоения геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 21-24 сентября 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2015. С. 322-326.
13. *Abdulagatov I.M., Akhmedova-Azizova L.A., Aliev R.M., Badavov G.B.* Measurements of the Density, Speed of Sound, Viscosity and Derived Thermodynamic Properties of Geothermal Fluids. J. Chem. Eng. Data, 61, 2016, 234–246. DOI: 10.1021/acs.jced.5b00507
14. *Abdulagatov I.M., Akhmedova-Azizova L.A., Aliev R.M., Badavov G.B.* Measurements of the density, speed of sound, viscosity and derived thermodynamic properties of geothermal fluids from south Russia Geothermal Field. Part II. Applied Geochemistry 69 (2016) 28-41. DOI.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.003
15. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алиев Р.М., Рамазанов А.Ш.* Комплексное освоение геотермальных ресурсов // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11, N1. С. 149-158. DOI: 10.18470/1992-1098-2016-1-149-158.
16. *Abdulagatov I.M., Akhmedova-Azizova L.A., Aliev R.M., Badavov G.B.* Measurements of the density, speed of sound, viscosity and derived thermodynamic properties of geothermal fluids from south Russia Geothermal Field // Материалы III Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы". 6-8 октября 2014 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2014. С. 35-59.
17. *Rasul M. Aliyev, Victor A. Vasilyev, Gasan B. Badavov, Adolf A. Cherniavskyi.* Prospects for Large-Scale use of Geothermal Energy In the Republic of Dagestan / Proceedings, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014.
18. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А.* Электроэнергетическое освоение геотермальных ресурсов Северокавказского региона // Теплоэнергетика. 2011. № 2. С. 59-66.
19. *Алхасова Д.А.* Разработка технологий эффективного освоения тепла сухих горных пород различного потенциала // Материалы III Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. 6-8 октября 2014 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2014. С. 107-112.
20. *Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Байрамов А.М.* Технико-технологические особенности строительства геотермальных скважин // GEOENERGY. Материалы Международной научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ, Махачкала: АЛЕФ, 2015. С. 14-22.
21. *Алиев Р.М., Васильев В.А., Исрапилов М.И., Бадавов Г.Б.* Перспективы крупномасштабного использования геотермальной энергии в Республике Дагестан // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 5. С. 125-131.
22. *Антропов А.П., Зайченко В.М., Качалов В.В., Чернявский А.А.* Электроснабжение удаленных потребителей на базе возобновляемых источников энергии с водородным аккумулированием // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 21-24 сентября 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2015. С. 159-165.

23. *Чернявский А.А.* Использование солнечной энергии в Российской Федерации. Состояние и перспективы // Энергетик. 2013. № 6. С. 93-96.
24. *Чернявский А.А.* Проект Всероссийского центра солнечной энергетики в Кисловодске // Энергетик. 2014. № 3. С. 22-25.
25. *Зайченко В.М., Чернявский А.А.* Автономные системы энергоснабжения. – М.: ООО "Издательский дом Недра", 2015. – 285 с.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Керимов И.А. [1], Дебиев М.В. [2], Гацаева Л.С. [3]

[1]Академия наук Чеченской Республики
[2]ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова
[3]КНИИ РАН

Аннотация. Проведен анализ состояния и перспективы освоения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) Чеченской Республики. Проанализированы характерные особенности возобновляемых источников энергии. Дана оценка ветровому, геотермальному потенциалам и солнечной радиации исследуемого региона. Рассмотрены вопросы использования энергии биомассы, а также применения детандер-генераторных агрегатов (ДГА) **в системах газоснабжения Чеченской Республики. Изучены пути о**своения и эффективного использования ВИЭ, т.к. повышение энергетической и экологической безопасности региона является одной из важнейших задач развития экономики республики.
Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровая энергия, солнечная энергия, биоэнергетика, детандер-генераторные агрегаты, геотермальная энергия, ресурсы, расчетная мощность.

Энергетическая безопасность любого региона в эпоху научно-технического прогресса является основой для его динамичного развития. На фоне роста цен на энергоносители и увеличивающегося дефицита УВ сырья, обострения экологических проблем в мире возрастает интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). К ним относятся солнечная, ветровая, геотермальная энергия, тепловой морской градиент, энергия преобразования биомассы и т.д. Самыми перспективными из них на сегодняшний день являются энергия Солнца, ветра, биоэнергия, геотермальная энергия, а также использование детандер-генераторных установок [1, 12].

В последние годы во всем мире интерес к ВИЭ возрос после ряда крупных политических и экологических кризисов, в результате чего начались активные исследования по выявлению экологически безопасных источников энергии и технологий для их трансформации [22].

Современная российская энергетика – это около 600 электростанций с удельной мощностью более 5 МВт и их общая установленная мощность составляет 218 ГВт. По типу генерации электростанции имеют следующую структуру (рис.1) [7].

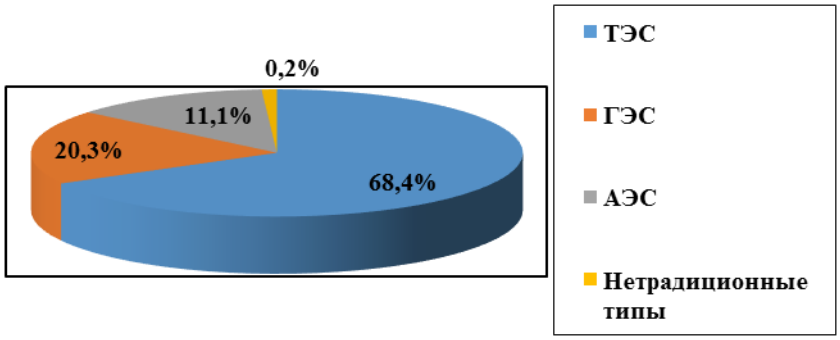


Рис. 1. Структура действующих электростанций РФ по типам генерации

ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

Общая мощность всех российских ветряных мельниц к 2010 году составляла всего 17-18 МВт (или 0,008% от генерирующей мощности РФ (220 ГВт)) [12]. При этом технический потенциал ветроэнергетики в России по экспертным данным составляет более 6 млрд. кВтч/год, а экономический потенциал – приблизительно 31 млрд. кВтч/год. В нашей стране есть все условия для развития этого сегмента энергетики: самая протяженная береговая линия, обилие плоских безлесных районов, большие акватории внутренних водоемов – самые благоприятные места для размещения ветропарков. Строительство современных ветроэлектростанций экономически целесообразно при средней скорости ветра 5 м/с [2, 4, 15].

Чеченская Республика относится к региону со средним уровнем ветровой энергии и характеризуется неравномерным распределением скорости ветра и его интенсивностью по территории в разные времена года. Наиболее интенсивным видом местных ветров являются ветры горной долины, возникающие из-за контрастности температуры воздуха отдельных частей долин или бассейнов и склонов. Ветер горной долины характеризуется суточным изменением направления. Летом циркуляция ветра наиболее выражена и достигает максимальной мощности.

Рис. 2. Потенциальные ресурсы ветровой энергетики на территории СКФО

На распределение повторения спокойствия также влияет большое разнообразие форм рельефа. Наибольшая частота спокойствия (44-58%) наблюдается в закрытых бассейнах и под склонами гор, а в предгорных и горных районах она достигает 30% .

Скорость ветра в течение года колеблется в довольно широких пределах – от 0,8 до 6,0 м/с. Самые сильные ветры наблюдаются на высотных участках, в открытых рельефных формах, где орографические факторы способствуют увеличению барических градиентов и ведут к сближению воздушных течений. Среднегодовая скорость ветрана данных участках достигает 5-6 м/с, а несколько ниже на открытых равнинах и в широких долинах она составляет 3-4 м/сек., в предгорьях – до 3 м/сек., в закрытых бассейнах и в низинных южных районах не превышают 1-2 м/сек [10, 11].

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Солнечная энергия продолжает обладать наибольшим потенциалом в области возобновляемых технологий [2, 5]. Из-за протяженности территории с севера на юг в различных регионах России уровни солнечной радиации заметно варьируются: в отдаленных северных районах солнечная радиация достигает до 810 кВтч/м^{2}в год, а в южных она превышает 1400

кВт·ч/м^2. При этом также наблюдаются значительные сезонные колебания: например, солнечная радиация в январе на широте 55° составляет 1,69 кВтч/м^2 в сутки, а в июле – 11,41 кВтч/м^2[8, 10, 15]. Использование этой энергии решает проблему энергообеспечения значительной части населения России (около 10 млн. чел.). Если даже использовать энергию для 1 млн. чел., а это 2 кВтч/сут на каждого человека, необходимо установление более 500 МВт максимальной мощности фотогальванических систем. Потенциальным потребителем солнечной энергии является сельское хозяйство. С развитием рынка телекоммуникационных систем, автономных систем для поддержания навигации, систем для санаторно-курортного бизнеса, коттеджей, уличных фонарей и др., общий спрос в России на солнечные батареи может составить более 1 ГВт/год [14, 17, 18].

Положение территории Чеченской Республике между 42° и 46° северной широты обуславливаетзначительное усиление солнечной радиации (рис. 3). Величина радиационного баланса в равнинных и предгорных районах составляет 50-55 ккал/см^2 в год, уменьшаясь с высотой: на высоте 2500 м она не превышает 30-35 ккал/см^2, а на высоте более 3000 м в среднем составляет 3-4 ккал/см^2, на равнинной территории положительна в течение почти всего года. По мере увеличения высоты местности расходная часть баланса в зимние месяцы начинает превышать доходную.

Большое разнообразие физико-географических условий на территории Чеченской Республики обусловливает и значительное разнообразие в распределении продолжительности солнечного сияния. Период солнечного сияния составляет в среднем 330 дней в году, и солнечная радиация достигает 0,33 кВт/м^2 и более на плоскости, а в горных районах– 0,46 кВт/м^2. Редки количество дней без солнца: в долинно-предгорных районах – 34-40 дней, в

высокогорье– 10-12 дней. Максимальное число дней без солнца (61 д.) приходится на равнинную территорию. Количество дней «без солнца» больше наблюдается зимой (6-12 дней). С начала июня и по конец сентябрь в течение десятилетия без солнечных лучей проходит только 1-5 дней. В течение всего года в целом облачность снижает вероятность поступления прямого солнечного излучения на 20 ÷ 25% от потенциала [12, 19].

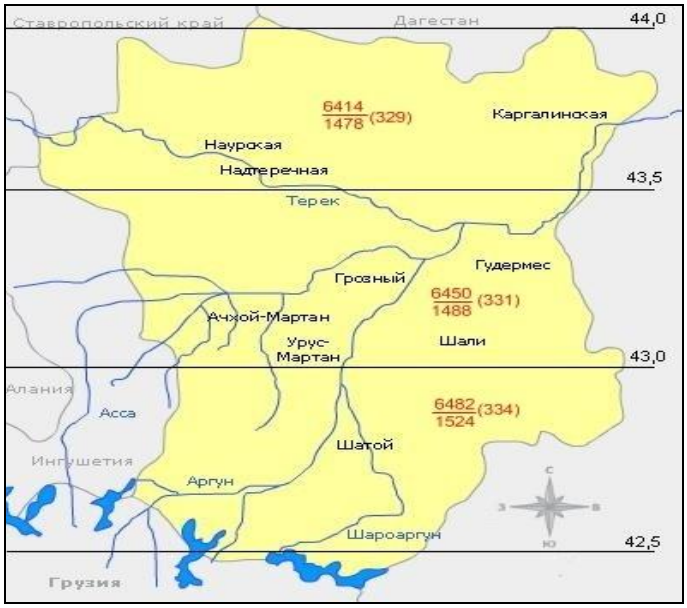


Рис. 3. Солнечная энергия на территорию Чеченской Республики.
(числитель – полная; знаменатель – рассеянная)

Максимальная интенсивность суммарной радиации на всей территории республики характерна для мая-июля. Для предгорных районов интенсивность общей радиации изменяется от 280 до 300 мДж /м^2, а в высокогорной зоне она колеблется от 360 до 400 мДж /м^2.

БИОЭНЕРГЕТИКА

Биомасса – биологический материал, полученный из живых или недавно живых организмов. Спектр использования биомассы – от отопления до выработки электроэнергии и транспортного топлива. Использование энергии биомассы имеет много уникальных качеств, обеспечивающих ее экологические преимущества. В последнее время технологии переработки биологического сырья применяются в целях безопасной утилизации органических отходов, уменьшения загрязнения окружающей среды, а также выработки электрической энергии и топлива. В перспективе это может способствовать смягчению многих проблем: изменению климата, уменьшению количества кислотных дождей, эрозии почвы, загрязнению водных объектов, созданию условий для существования диких животных и поддержанию здоровых условий существования лесов [20, 21].

Ежегодный объем органических отходов на территории России составляет 500 млн. т., переработка которых позволяет получать до 150 млн. т.у.т. в год. В среднем при разложении 1 тонны твердых бытовых отходов может быть образовано 100-200 $м^3$ биогаза. В зависимости от содержания метана минимальная теплота сгорания биогаза полигона составляет 18-24 МДж /$м^3$ (это около половины теплоты сгорания природного газа). Кроме того, современные технологии для производства биогаза из отходов окупаютсяот 2 до 5 лет [13].

Вопрос об исследовании отходов ТБО в Чеченской Республике не поднимался и для его решения необходимо провести технические исследования (определение состояния полигонов ТБО, их мощности и качественного состава биогаза) [9].

Мировой опыт свидетельствует, что уровень рентабельности производства биогаза значительно возрастает, когда перерабатываются отходы из городов с населением более 100 тыс. человек, причем подготовка производства осуществляется на стадии заполнения полигонов. Такое производство в республике может быть развернуто в крупных населенных пунктах: Грозный, Гудермес, Аргун, Шали, Урус-Мартан и др.

Например, предварительная оценка утилизации биогаза на полигоне ТБО г.Грозный:

• Объем сбора биогаза – 13-15 ,0 тыс. $м^3$/сут. (5,0 млн. м ^{3}/год);

• Снижение эмиссий ПГ: около 40 тыс. т CO_2-экв/год;

• Расчетная мощность двигатель-генератора, который может быть установлен для производства электроэнергии на биогазе – 1000 кВт;

• Тариф продажи электроэнергии – 1,74 руб./кВт.ч;

• Ставка дисконтирования – 10%;

• Стоимость ЕСВ – 8 евро/т CO_2-экв.

ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ АГРЕГАТЫ (ДГА)

Использование расширительных генераторных установок (ДГВ) для выработки электроэнергии в системах газоснабжения в результате технологического падения давления газа является эффективным методом энергосбережения [16, 17, 24].

С существующей системой газоснабжения в России давление транспортируемого природного газа снижается на газораспределительных станциях (ГРС) и в газорегуляторных пунктах (ГРП) и осуществляется дросселированием.

Транспортировка природного газа от пункта добычи до пункта потребления осуществляется по трубопроводам под высоким давлением (4-7,5 МПа). Давление газа перед устройствами горелки составляет 0,12-0,3 МПа. Технологическое снижение давления потока газа осуществляется обычно в два этапа. В первом случае давление газа снижается от 4,0-7,5 МПа до 1,2-1,5 МПа на газораспределительных станциях (ГРС), где газ одорируется и после чего направляется через производственные трубопроводы ко второму этапу – к газорегулирующим станциям, где давление уменьшается от 0,6-1,2 до 0,1-0,3 МПа. На входе ГРС и ГРП температура газа зависит от времени года и составляет от -10 до +10 °С в центральной полосе России.

В ходе снижения давления на станциях энтальпия транспортируемого природного газа не меняется, и происходят потери только энергетического потенциала потока газа, связанного с его высоким давлением окружающей среды. Энергетический потенциал дает возможность преобразования энергии газового потока в механическую энергию в каком-либо устройстве.

Транзит и поставки газа на территории Чеченской Республики осуществляет ОАО «Чеченгазпром». За последние десять лет транзитные поставки газа через территорию республики составили 18759,2 млн.м^3, из них15 636,0 млн.м^3–потребителям других регионов России и Закавказья. Длина магистральных газопроводов с филиалами газоснабжающей организации республики на данный момент составляет 698 км [9, 12].

Распределение газа на территории Чеченской Республики осуществляется ЗАО «Чеченрегионгаз». На рис. 4 представлена схема размещения существующих и планируемых ГРС ($Р_{вых,} \geq 0.4$ мПа).

В зависимости от режима работы и конструктивных особенностей применяемых схем эксплуатации выработка электроэнергии оценивается в 220-250 МВт.ч, а общий потенциал доступной газовой мощности в системе газоснабжения республики в 27,2 МВт.

Расчеты показывают, что ДГА можно эффективно использовать в первую очередь для 11 ГРС Чеченской Республики с общей установленной мощностью 11,3 МВт и выработкой электроэнергии до 100 миллионов кВтч.в год.

Рис. 4. Расположение ГРС на территории ЧР

Кроме того, детандер-генераторы относятся к оборудованию, созданному с использованием технологий «бестопливным», поддерживаемым Киотским протоколом к конвенции ООН об изменении климата. Реализация этих проектов может осуществляться с использованием механизма сбора средств путем продажи квот на выбросы парниковых газов [22, 23].

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Геотермальная энергия занимает особое место среди возобновляемых источников энергии (ВИЭ) из-за ее неисчерпаемости, огромных запасов, доступности и экологической чистоты.

Практически на всей территории России прогнозные запасы геотермальных ресурсов на доступных глубинах (до 5-6 км) в 4-6 раз превышает ресурсы углеводородов, а геотермальные энергоресурсы для нужд теплоснабжения (70/20^{0}С) по СКФО составляют 2,7 трлн. т.у.т. [1, 2].

По запасам геотермального потенциала ЧР занимает 3-е место после Дагестана и Камчатского края. К сожалению, сегодня данный ресурс не находит широкого применения в республике и в стране целом, хотя геотермальные теплоносители с небольшой глубиной залегания (2500-35000 м) вполне являются альтернативой УВ-сырью.

Теплоэнергетические воды территории республики представлены термальными месторождениями: Ханкальское, Гойтинское, Петропавловское, Гунюшки, Герменчукское, Гудермесское, Новогрозненское, Червленское, Комсомольское, Новощедринское, Шелковское, Дубовское, Каргалинское, Центрально-Бурунное и Курдюковское. Эксплуатационные запасы по категориям А+В+C_1составили 64,68 тыс. $м^3$/сут [6, 7, 13].

Термальные воды приурочены в основном к неогеновым песчаникам. Глубина залегания водоносных горизонтов колеблется от 570 м (Ханкальское) до 3800 м (Петропавловское), минерализация – 0,7-20,1 г/л, температура – 60-110°С. Тип воды в основном термальный, гидрокарбонатно-натриевыйхлоридный.

Огромный фонд свободных скважин, благоприятные условия для создания систем геотермальной циркуляции (ГЦС), близость к потребителям, спрос на выпускаемую продукцию – это не весь список положительных факторов, склоняющих в сторону создания геотермальной подотрасли в ТЭК ЧР. Существует еще одно преимущество – минимальная экологическая нагрузка на окружающую среду: в геотермальном производстве извлечение источника энергии и ее преобразование в тепловую или электрическую энергию локализованы до минимума [3, 6].

В г. Грозный и его пригородах компактно проживает почти 1/3 населения республики (потенциальные потребители), и здесь сосредоточено 4 геотермальных месторождений: Гунюшки, Петропавловское, Гойтинское, Ханкальское, экономическая целесообразность разработки которых в силу этого значительно выше [9].

Обычно с геотермальными ресурсами связывают возможности генерирования электроэнергии как наиболее ценного и востребованного продукта.

В республике имеются несколько месторождений, перспективных в этом направлении: Ханкальское, Новощедринское и др. С технической точки зрения генерация электроэнергии на этих месторождениях возможна, но неэффективна ввиду низкой рентабельности, и на сегодняшний день актуальнее вопросы горячего водоснабжения и теплоснабжения населения.

Таким образом, территория Чеченской Республики богата различными видами ВИЭ: солнечная, ветровая, геотермальная и др., которые можно рассматривать как эффективное и экологически чистое производство тепловой и электрической энергии. Но перспективы их использования пока незначительны и сопряжены со следующими проблемами: УВ-лобби, отсутствие государственной поддержки, квалифицированных кадров, средств на научные изыскания в этом направлении, свободных средств на перестройку и развитие этого направления энергетики. Устойчивое развитие региона требует создания стабильной многовекторной энергетики, способной удовлетворить растущие потребности населения и экономики республики.

Поэтому повышение эффективности использования энергоресурсов, внедрение новых перспективных альтернативных источников, необходимость поиска новых решений, учитывающих региональные особенности, увеличение доли ВИЭ в топливно-энергетическом балансе региона является одной из важнейших задач развития энергетики.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 256 с.
2. Атлас ветрового и солнечного климатов России / Под ред. *М.М. Борисенко, В.В. Стадник.* СПб., 1997. 173 с.

3. *Батаев Д.К.-С., Гагаева З.Ш., Гацаева Л.С. К* решению вопросов рационального природопользования и устойчивого развития // Актуальные вопросы нефтегазовой отрасли. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 2014. С. 218-220.
4. *Безруких П.П.* Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008.196 с.
5. *Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.* Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с.
6. *Гацаева Л.*С. Геоэкологические аспекты освоения геотермальных ресурсов Чеченской Республики и устойчивое развитие региона // Ландшафтные измерения устойчивого развития: исследование – планирование – управление. Материалы международной конференции, посвященной 70-летию со дня рождения Н.Л. Беручашвили (4-6 октября 2017 г., г. Тбилиси, Грузия). Тбилиси, 2017. С. 537-541.
7. *Гацаева Л.С.* Эффективность использования геотермальных ресурсов Чеченской Республики // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию С.М. Абаева, Владикавказ: Изд-во СОГПИ, 2013. С. 34-43.
8. *Керимов И.А.* Перспективы развития «зеленой» энергетики в Чеченской Республике // Актуальные проблемы защиты окружающей среды и техносферной безопасности в меняющихся антропогенных уловиях – «Белые ночи-2014». Материалы Международной научно-практической конференции (1-3 июня 2014 г., г. Грозный). С. 21-29.
9. *Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С.* К возможности использования детандер-генераторных установок на газовых сетях Чеченской Республики // Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ РАН (7 апреля 2011 г., г. Грозный). Грозный, 2011. С.355-357.
10. *Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С.* Программа развития энергетики Чеченской Республики на 2011-2030 гг. // Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ РАН (7 апреля 2011 г., г. Грозный). Грозный, 2011. С.38-63.
11. *Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Гацаева Л.С.* Эффективность использования геотермальных ресурсов Чеченской Республики // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Грозный: Академия наук Чеченской Республики, 2014. С. 147-151.
12. *Керимов И.А., Дебиев М.В., Ельмурзаев А.А., Абдулаев М.В.* Формирование возможных вариантов развития региональной энергетики на основе сценарного подхода // Грозненский естественнонаучный бюллетень, 2016. №1. С. 13-24.
13. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии / *А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгин и др.* М.: МЭИ, 2009. 144 с.
14. Минерально-сырьевые ресурсы Чеченской Республики. Изд. 2-е, доп. / *Под ред. Керимова И.А., Аксенова Е.М.* Грозный: Академия наук Чеченской Республики, 2016. 523 с.
15. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Ч.1-6. Вып.13. Л.: Гидрометиздат. 1990. 724 с.
16. *Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И.* Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф, 2008. 584 с.
17. *Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю.* Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. М.: КНОРУС, 2010. 232 с.
18. Справочник по возобновляемым источникам энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под ред. *П.П. Безруких.* М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 272 с.
19. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / Под ред. *Н.В. Кобышева, К.Ш. Хайрулина*. Спб.: Гидрометиздат, 2005. 319 с.

20. Biomass Energy Center. Biomassenergycentre.org.uk. Retrieved on 28 February 2012.
21. *Ellabban, Omar; Abu-Rub, Haitham; Blaabjerg, Frede* (2014). "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology". Renewable and Sustainable Energy Reviews.39: 748–764 [749].doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
22. *Gasch, Robert and Twele, Jochen (ed.)* (2013) Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. Springer, Wiesbaden 2013, p. 569 (German).
23. *Jacobson, Mark Z.; et al. (2015). «100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States».* Energyand Environmental Science.*8: 2093–2117.* doi:10.1039/C5EE01283J.

КРИТЕРИИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Габдерахманова Т.С.[1], Шакун В.П.[2]

[1]ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН;
Москва, Россия; 125412, ул. Ижорская, д.12 стр. 2; e-mail: tts_91@mail.ru
[2] ФГБОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
Москва, Россия; 119991, Ленинские горы, ГСП-1, д. 1 корп. 19

Проведен анализ структуры энергоснабжения Арктической зоны РФ с точки зрения используемых ресурсов. Сформулирован перечень ключевых факторов, накладывающих ограничение на строительство объектов альтернативной энергетики в АЗРФ.В картографическом виде представлены некоторые факторы, значимые при определении территорий, перспективных для внедрения объектов ветрогенерации.

Введение. В настоящее время актуальным является модернизация и оптимизация электроэнергетической инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ). Появление новых технологических возможностей и наработанный опыт производства, установки и эксплуатации оборудования для ВИЭ в сложных климатических условиях России и других стран позволяет рассматривать энергию солнца и ветра как альтернативу жидкому топливу в АЗРФ. Важнейшей задачей становится комплексная оценка перспективности региона и его отдельных административных единиц для внедрения технологий ВИЭ. Наибольший интерес для анализа представляют территории АЗРФ, изолированные от централизованных электроэнергетических систем, так как энергоснабжение данной группы потребителей сопровождается значительными экономическими издержками.

В последние годы был предпринят ряд исследований, посвященных оценке ресурсов, а также потенциалов (валового, технического и экономического) различных видов ВИЭ для субъектов России [1], в том числе для арктических районов. Такие оценки являются основополагающими для определения возможности эффективного производства энергии ВИЭ, однако не позволяют выявить фактическую пригодность территории для размещения энергогенерирующих объектов. Задача комплексной оценки перспективности отдельных территорий в условиях Арктики остается чрезвычайно актуальной.

Определение этапов и критериев комплексной оценки. Для решения указанной задачи в качестве основы была взята методика комплексного анализа пригодности и перспективности территории для размещения объектов солнечной и ветровой энергетики с применением технологий геоинформационного картографирования [2,3]. Согласно данной методике, анализ целесообразно выполнять в три этапа:

1) оценка величины и пространственного распределения ресурсов ВИЭ на региональном уровне;

2) оценка валового и технического потенциалов ВИЭ на региональном уровне;

3) комплексный анализ факторов и ограничений (природного, климатического, экономического, технического и социального характера), влияющих на размещение объектов ВИЭ (рис. 1).

Результатом анализа является районирование территорий по уровню перспективности для использования ВИЭ.

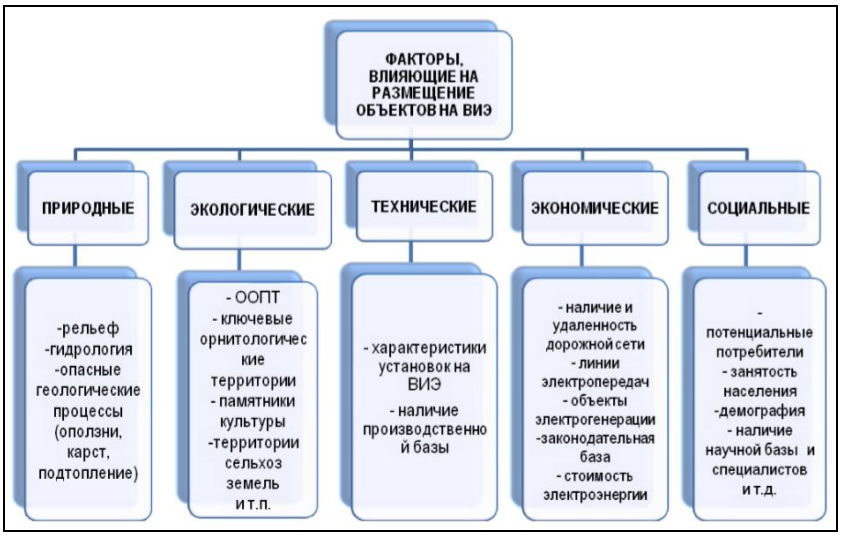


Рис.1. Перечень факторов, влияющих на размещение объектов возобновляемой энергетики [2]

В применении к АЗРФ в качестве факторов, в большей степени определяющих целесообразность сооружения объектов возобновляемой энергетики (помимо ресурсного потенциала) в данной работе рассматриваются:

1. территориальное распределение объектов – населенных пунктов или иных потребителей;
2. отсутствие/наличие присоединения потребителей к централизованной сети;
3. территориальное распределение действующих объектов электрогенерации (в том числе на основе ВИЭ) и их характеристики (в том числе степень износа оборудования);
4. характеристики территории с точки зрения землепользования: наличие особо охраняемых природных территорий, в т.ч. ключевых орнитологических территорий; лесной фонд, земли обороны и безопасности;
5. схемы перспективного развития территорий;
6. транспортная сеть (важный, но не определяющий фактор; влияет на экономическую составляющую проектов);
7. природно-климатические особенности, накладывающие ограничения на эксплуатацию объектов электрогенерации на ВИЭ [4].

Результаты и обсуждение. Ветроустановки рассматриваются как приоритетные источники энергии для удаленных арктических потребителей [7], т.к. пиковые месяцы выработки и потребления энергии (ноябрь-январь) совпадают, в то время как световой день в зимние месяцы на большей части АЗРФ либо короток, либо вообще отсутствует. Поэтому в данной работе был рассмотрен именно ресурс ветра.

На данном этапе авторами проведено районирование территории АЗРФ с учетом потенциала ветровой энергии и следующих факторов, определяющих размещение объектов ветрогенерации: наличие присоединения к централизованной сети, численность и характер расселения потребителей, проживающих на децентрализованных территориях и территориальное распределение действующих и проектируемых объектов ветрогенерации.Оценки и картографирование потенциалов ветровой энергии для территории АЗРФ были проведены на основе материалов [1]. В качестве характеристики энергетических ресурсов ветра была использована среднегодовая скорость ветра на высоте 50 м.

Проведенный анализ статистических данных [8] показал, что порядка 220 000 человек в АЗРФ проживает в зоне децентрализованного энергоснабжения и получает электроэнергию от автономных источников энергии. Для примера, в Мурманской области доля «изолированного» от сетей населения составляет 1% (около 7 тыс. чел), в арктической части Республики Саха (Якутия) – 100%.

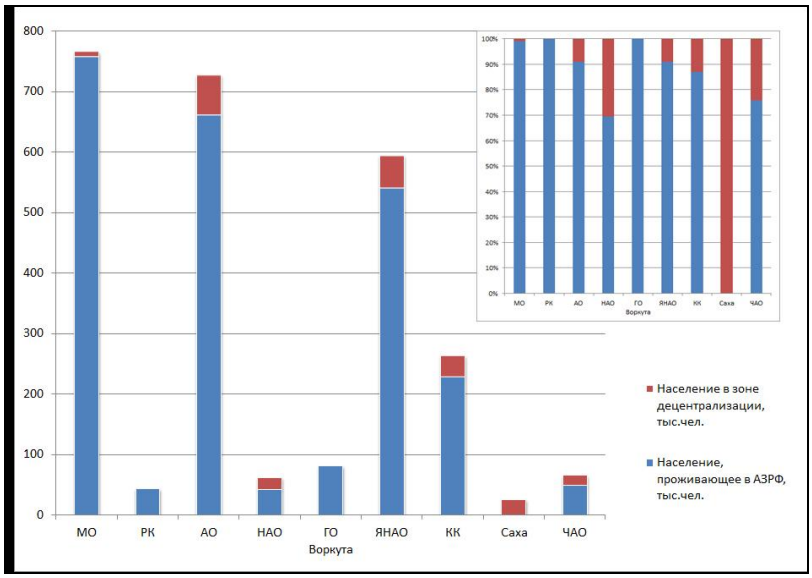


Рис. 2. Численность населения АЗРФ по областям/округам, в том числе проживающего в зонах децентрализованного энергоснабжения

Анализ открытых данных о действующих и запланированных к реализации объектов генерации с использованием энергии всех видов возобновляемых источников, а также комбинированных энергоустановок (с использованием дизельного топлива) на территории АЗРФ [9] показал, что суммарная установленная электрическая мощность энергоустановок на основе ВИЭ в регионе составляет порядка 105 МВт, в том числе микроГЭС – 94 МВт, ВЭС – 5, СЭС – 4.2 МВт, ПЭС – 1,7 МВт.

Результаты анализа представлены в виде набора данных и размещены в открытом ресурсе ГИС ВИЭ [10].

Пространственное распределение ресурсов, зон децентрализации, населения и объектов ветрогенерации в АЗРФ отображено на рис. 3.

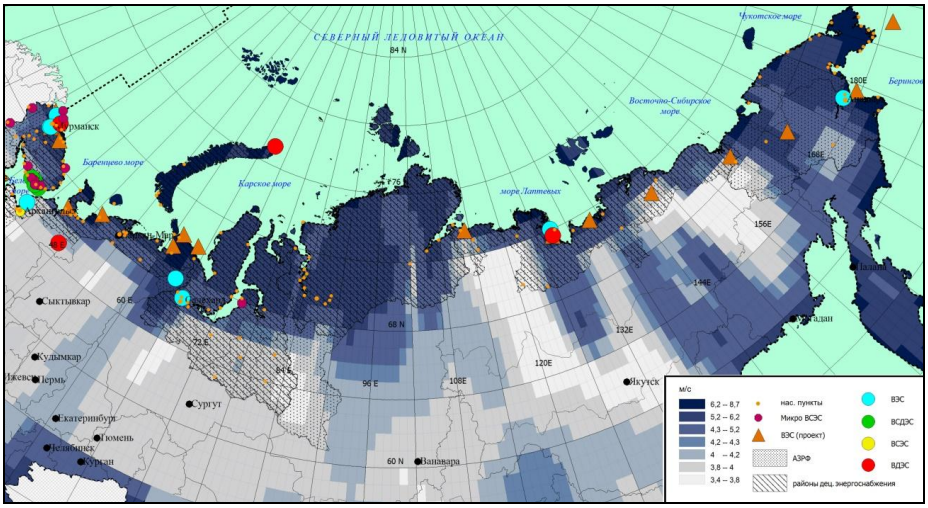


Рис. 3. Распределение ресурсного потенциала и генерирующих объектов ветровой энергетики в АЗРФ

На следующем этапе должны быть рассмотрены факторы, связанные с землепользованием в АЗРФ, в том числе наличие особо охраняемых и иных территорий, накладывающих ограничение на размещение новых объектов генерации. Дальнейший анализ целесообразно осуществлять на локальном (районном) уровне.

Заключение. В связи с актуальностью задачи выделения наиболее перспективных для размещения объектов возобновляемой энергетики территорий АЗРФ сформулирован перечень критериев отбора. Промежуточные результаты районирования АЗРФ с учетом распределения среднегодовых скоростей ветра на высоте 50 м, областей расселения потребителей электроэнергии и наличия или отсутствия доступа к централизованному энергоснабжению позволяют выделить наиболее перспективные локации, сочетающие высокую потребность в энергии и значительный ресурсный потенциал ветра. Собранная статистика о действующих и проектируемых в АЗРФ объектах ВИЭ с ранжированием по составу энергообъекта и мощности дает возможность оценить текущую и перспективную степень замещения дизель-генераторных мощностей в муниципальных образованиях и регионе в целом. Включение в анализ факторов землепользования, природно-климатических особенностей, планов перспективного развития муниципальных образований, схем транспортного сообщения позволит значительно уточнить границы перспективных зон.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00640.

Литература:

1. *Андреенко Т.И., Габдерахманова Т.С., Данилова О.В., Ермоленко, Ермоленко Б.В. и др.* Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России // Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 160 с.
2. *Рафикова Ю.* Геоинформационное картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии (на примере юга России) (кандидатская диссертация). 2016. 176 с.
3. *Мельникова А.А., Рафикова Ю.Ю.* Методика оценки условий внедрения объектов солнечной энергетики // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», № 2 (23) 2016 , С. 85-90.
4. *Бердин В.Х., Кокорин А.О., Юлкин Г.М., Юлкин М.А.* Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. – М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. 80 с.
5. *Kazim Baris Atici, Ahmet Bahadir Simsek, Aydin Ulucan, Mustafa Umur Tosun.* A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection // Utilities Policy, № 37. 2015.
6. *Serwan Baban, Tim Parry*. Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. School of Environmental Science and Management Papers, № 24. 2001.
7. Постановление №41 Правительства Чукотского автономного округа от 28 января 2016 года об утверждении государственной программы Чукотского автономного округа "Энергоэффективность и развитие энергетики Чукотского автономного округа на 2016 - 2020 годы".
8. Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2017 года.
9. *Габдерахманова Т.С., Киселева С.В., Попель О.С., Тарасенко А.Б.* Некоторые аспекты развития возобновляемой энергетики в Арктической зоне РФ // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», № 19-20 (207-208) 2016. с.41-53
10. ГИС «Возобновляемые источники энергии России». [Электронный ресурс]. URL: www.gisre.ru (дата обращения: 20.09.2017).

СТАНДАРТИЗАЦИЯ В РАЗВИТИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Рамазанов О.М., Абдулмуталимова Т.О., Рабаданов Г.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук; г.Махачкала, Россия; 367030, пр. И.Шамиля, 39а;
E-mail: omari50@mail.ru, tamila4@mail.ru, ramadan01@mail.ru

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) такие как ветер, солнце, термальная вода и пар земных недр, биомасса, тепло океанов и морей, начали рассматриваться и получили развитие как потенциальная замена традиционным источникам энергии в последние двадцать лет. Во многих экономически развитых странах развитие и использование возобновляемой энергетики обеспечивается государственной политикой, предоставляются финансы и льготы, разрабатываются нормативно-техническая и правовая базы.

В настоящее время инвестиции в ВИЭ почти в два раза превышают общемировые инвестиции в традиционные направления энергетики, использующие углеводородное сырье, и составляют 286 млрд. долларов. Так, с 2000г. мировое производство электроэнергии из солнечной энергии удвоилось в семь раз, а из энергии ветра - в четыре раза. В таких странах как Чили, ОАЭ стоимость единицы солнечной электроэнергии в 2 раза дешевле, чем энергии, полученной из угля. Наиболее активное развитие возобновляемая энергетика получила в странах Европейского Союза (ЕС) и США. В соответствии с принятой ЕС энергетической политикой к 2020 году доля энергии, получаемой из ВИЭ (с учетом объектов гидроэнергетики) в энергетическом балансе должна составить 20% [1].

На 2011 год, помимо энергии, получаемой из традиционных и новых видов гидроэнергетики (970 ГВт), наибольшие объемы установленной мощности возобновляемой энергетики в мире приходились на ветряную энергетику (238 ГВт), биомассу (72 ГВт) и солнечные фотоэлементы (70 ГВт) (рис.1). Наибольшие среднегодовые темпы роста по установленной мощности объектов ВИЭ с 2006 наблюдались в солнечной энергетике (включая солнечные фотоэлементы и концентрирующие солнечные коллекторы) и ветроэнергетике. Активному развитию данных технологий способствует как отсутствие необходимости в дополнительной переработке ресурсов, в отличие от БиоТЭС, и возможность использования модульного принципа, позволяющего создать уровень необходимой мощности, в отличие от гидроэнергетики и ГеоТЭС, так и действующие механизмы государственной поддержки, полученные технологические достижения в области разработки и создания накопителей электроэнергии, разработки новых материалов и увеличения КПД получаемой энергии, что позволяет снизить стоимость строительства и эксплуатацию электростанций ВИЭ [2].

Рис. 1. Установленные мощности ВИЭ в мире ГВт

В Европейском союзе (ЕС) применяется комплексный подход к формированию нормативной правовой базы в области энергетической эффективности, в том числе и в области ВИЭ. В ЕС используются регламенты, которые являются обязательными и применяются в государствах - членах; директивы, которые являются обязательными для государств - членов в части результатов, которые должны быть достигнуты; решения, являющиеся обязательными для субъектов, которым они адресованы; рекомендации, которые являются декларативными документами; стандарты, которые применяются на добровольной основе, но ЕС стимулирует их применение. Благодаря принятым документам в ЕС возобновляемая энергетика развивается даже быстрее, чем угольная, нефтяная или атомная (рис.2) [2].

Рис. 2. Среднегодовые темпы роста установленной мощности ВИЭ

В России, несмотря на большой потенциал для ВИЭ, в энергетическом балансе преобладает выработка энергии из углеводородного сырья и атомной энергии. Страна обладает 12% мировых запасов нефти, 35% мировых запасов газа, 16% мировых запасов угля и 14% урана. Преобладающим источником получения электроэнергии является природный газ (около 40 %), на долю угля приходиться 18 % энергии, на долю нефти - до 10 %. Гидроресурсы дают 20,5 % электроэнергии, атомная энергетика около 12 % [2]. Однако, несмотря на достаточность углеводородных ресурсов, половина регионов России испытывает дефицит энергии. Сегодня в стране газифицировано всего около 50% населенных пунктов, а свыше 75% территории не имеет централизованного энергоснабжения. В основной части энергетической политики России до 2025 г. сказано о необходимости развития ВИЭ, однако основной упор сделан на дальнейшее развитие топливно-энергетического комплекса (ТЭК), т.е. развитие традиционных направлений с использованием традиционных теплоносителей. Хотя есть и положительные сдвиги. Так, согласно утвержденному правительством РФ перечню постройки энергетических объектов, в том числе планируется до 2030 строительство 15 ветровых электрических станций, общей мощностью порядка 4500 МВт. Возобновляемая энергетика сегодня по объективным причинам не может составить прямую конкуренцию традиционным энергоносителям, хотя экономический потенциал ВИЭ составляет более 270 млн т.у.т., что соответствует четверти внутреннего потребления энергоресурсов страны [3]. Несмотря на огромные потенциальные запасы, в настоящий момент доля электроэнергии, вырабатываемой с использованием возобновляемых источников, составляет до 1,0% без учета ГЭС, мощностью свыше 30 МВт (по ГОСТ Р 51238, малыми считаются ГЭС – до 30 МВт) [4]. Частный бизнес также не вкладывается в развитие ВИЭ, рассматривая как финансово затратное производство, требующее для развития больших капитальных вложений.

Опыт многих развитых стран, в том числе и России, показывает, что можно успешно и экономически выгодно развивать ресурсы ВИЭ, используя современные технологии, оборудование, законодательную и нормативную базы и экономически оптимизируя размещение объектов ВИЭ. Так, на Камчатке 40 % потребляемой энергии вырабатывается на геотермальных источниках (Верхнемутновская - 12МВт и Мутновская - 50МВт), что подтверждает использование геотермальной энергии как ВИЭ. Себестоимость производимой на данных ГеоЭС электроэнергии в 3…4 раза ниже, чем на дизельных электростанциях. В 2015 г. построены ветряные парки в Усть-Камчатке и на Сахалине, реализовано 5 проектов солнечных электростанций [5].

Сегодня развития ВИЭ в России в основном обусловлено выработкой электроэнергии с помощью солнечных панелей и ветровых мельниц. За последние два года было введено 14 крупных солнечных электростанций общей мощностью около 130 МВт. По итогам текущего года запланирован ввод еще 125 МВт новой мощности объектов возобновляемой энергетики, из которых большая часть (90 МВт) - солнечная генерация.

Одной из важных задач при решение проблем развития возобновляемой энергетики, является наличие гармонизированной законодательной и нормативно-правовой базы, отвечающих современным техническим и экологическим требованиям.

В России законодательно развитие ВИЭ было заложено с внесением поправок 4 ноября 2007 г. в Федеральный закон «Об электроэнергетике». Было введено понятие «возобновляемые источники», названы источники возобновляемой энергии, обозначены основные направления, принципы и методы поддержки ВИЭ, подтверждена необходимость принятия федерального закона о возобновляемых ресурсах. Новая энергетическая стратегия России на период до 2030 г. отмечает необходимость развитие нетопливной энергетики – атомной, возобновляемой, включая гидроэнергетику – как одно из важных стратегических направлений развития национальной энергетики. Постановлением Правительства РФ от 3 июня 2008 г. № 426 «О квалификации генерирующего объекта на основе возобновляемых источников энергии» были установлены критерии, определяющие генерирующие объекты, имеющие право на государственную поддержку. Основным критерием названо функционирование на основе исключительно возобновляемых источников или в режиме комбинированного использования возобновляемых и иных источников энергии. В июне 2008 г. вышел Указ Президента Российской Федерации № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики», который стал определяющим документом для проведения мероприятий в этих областях. В январе 2009 г. принят важный документ – Распоряжение Правительства № 1-р «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.», устанавливающий принципы государственной политики, комплекс мер по развитию и целевые показатели (показатель в 4,5% электроэнергии на основе ВИЭ к общей генерируемой энергии к 2020 г.). 23 ноября 2009 г. принят Федеральный Закон «Об энергосбережении и о повышении энергоэффективности…», который является основополагающим законом как для ВИЭ, так и для всей политики в области энергетической эффективности и энергосбережения. Сформированы основные принципы государственной политики в области ВИЭ и определен комплекс мероприятий, направленный на развитие возобновляемой энергетики [6-12].

Однако, если не будет разработан весь комплекс нормативно-технических документов для обеспечения развития ВИЭ, принятые законодательные акты не смогут в полной мере обеспечить повышение энергетической эффективности и развитие ВИЭ, не будет создан привлекательный инвестиционный климат и обеспечено льготное финансирование и налогообложение.

В 2009 г. для совершенствования нормативной базы обеспечения развития энергоэффективности, была принята программа разработки национальных стандартов на 2009–2011

гг., в том числе в области ВИЭ планировалось разработать 97 стандартов: 24 стандарта по ветроэнергетике, 17 стандартов по гидроэнергетике, 56 стандартов - по гелиоэнергетике. В 2011 г. было разработано 42 стандарта, из них 9 - по ветроэнергетике, в окончательной редакции приняты 4 стандарта[13].

Технологии ВИЭ пока недостаточно развиты для конкурирования на рынке энергии, поэтому им необходима государственная поддержка и внедрение передового опыта, в том числе с использованием международных стандартов. Разработка и применение национальных стандартов (гармонизированных с международными стандартами), ускорит установление единой терминологии и положений; позволит разработать единые методы испытаний, измерений и учета; обеспечит взаимодействия и гармонизацию нормативных документов; ускорит внедрение современных достижений науки, техники и технологий в области ВИЭ.

Дальнейшее развитие отечественной базы стандартов ВИЭ, даст реальные технические решения в области повышения энергетической и экологической эффективности, позволит российским производителям оборудования для альтернативной энергетики перенять опыт в области ВИЭ. Быстрое распространение через стандарты новейших технических знаний усилит конкуренцию и будет способствовать формированию рынка возобновляемой энергетики, снижению затрат на проектирование, строительство и эксплуатацию энергообъектов.

Для разработки политики и механизмов развития и внедрения ВИЭ, получения реальных результатов крайне важно разработать и принять федеральный закон «О возобновляемых источниках энергии». Перспективы энергетической политики страны зависят от национальной стратегии в области возобновляемых источников энергии, наличия действующей законодательной, нормативной и технической документации, стабильной и конкурентной инвестиционной среды, принятия и реализации целевых энергетических программ по различным направлениям ВИЭ с учетом региональных особенностей и типа возобновляемых источников, включение значительных финансовых вложений в развитие ВИЭ, что существенно повысят эффективность и объемы возобновляемой энергии в энергобалансе страны, не мешая традиционной энергетике.

Литература:

1. Сазонов Ю.Д. Инвестиционная привлекательность ВИЭ// Энергия. – 2017.–№7. –С.48-51.
2. Грозовский Г., Попов В., Полякова Е. Нормативно-техническое регулирование в области возобновляемых источников энергии. Стандарты и качество. – 2015. – №7. – С19-30
3. Энергия. – 2017.–№3. –С.41.
4. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов. //Известия академии наук. Энергетика. –2014. – №5.– С. 24.
5. Залиханов М.Ч., Степанов С.А. Почем недра для народа // – Энергия. 2015.–№3. –С.57-61.
6. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2003. – № 13. – С. 1177.
7. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Энергетическая стратегия России на период до 2020 г.» от 28.08.2003 № 1234-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2003. – № 36. – С. 3531.
8. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.» от 13.11.2009 № 1715-р // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – С. 5836.
9. Постановление Правительства Российской Федерации «О квалификации генерирующего объекта на основе возобновляемых источников энергии» от 03.06.2008 № 426 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 23. – С. 2716.
10. Указ Президента Российской Федерации «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» от 04.06.2008 № 889 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 23. – С. 2672.

11. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г.» от 08.01.2009 № 1-р. // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 4. – С. 515.
12. Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – С. 5711.
11. Роль международных стандартов в повышении энергетической эффективности и продвижении возобновляемых источников энергии // http://www.iea.org/ – МЭА. – 2007. – С. 1-6.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ГАЗОДЕФИЦИТА НА ЮГЕ РОССИИ

Алиев Р.М.[1], Белан С.И.[2,3], Бадавов Г.Б.[4], Ниналалов С. А.[4]

[1]ФГБОУ ВПО Дагестанский государственный технический университет;
Махачкала, Россия, 367015, пр-т И.Шамиля, 70а
[2]ФГБОУ ВПО Дагестанский университет народного хозяйства;
Махачкала, Россия, 367008, ул. Атаева, 5
[3]Махачкалинский филиал ООО "Газпром проектирование";
Махачкала, Россия, 367015, ул. Ярагского, 93а
[4]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия, 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: lotos155@yandex.ru

Установлено наличие высокого потенциала экономии газового топлива за счет расширения использования геотермальных вод на Юге России. Приведена общая диспозиция и перспективная динамика сводных показателей эффективности выделенной совокупности - 72 месторождений Юга России. Подсчитано, что при реализации прогнозных ресурсов геотермальных ресурсов (797 тыс.м^3/сутки), освоенных только в семи субъектах округа, возможный объем замещения топлива может составить 48 млн. т у.т. или 10% регионального газопотребления.

Анализ зарубежного опыта в области добычи и использования геотермальных вод с целью энергосбережения свидетельствует, что в мире наблюдается существенный рост масштабов освоения и эксплуатации геотермальных месторождений. За период с 2000 г. по 2005 г. произошел значительный рост мощности и объемов прямого использования геотермальной энергии – около 85%. Установленные мощности систем геотермального теплоснабжения в мире составляют 100 тыс. ГДж/час с общей годовой выработкой 356 млн. ГДж. Вовлечению в мировой топливно-энергетический баланс возобновляемых источников энергии и, прежде всего, геотермальной энергии способствуют глобальные процессы роста потребности экономики в топливно-энергетических ресурсах, ухудшение экологической обстановки, сокращение запасов невозобновляемых источников энергии.

В России геотермальное производство развивалось в течение нескольких десятилетий второй половины прошлого века в двух регионах - на Юге страны и Камчатском крае. Однако фаза интенсивного роста в период 1980-1990 гг. сменилась резким снижением и последующим стагнационным состоянием. Главными причинами этого явилась общеэкономическая деструкция в стране после 1991 г. и низкие цены на углеводородное сырье. На Юге России ощутимо сказались также военные действия в Чечне.

На рис. 1 приведена динамика добычи геотермальных вод и разведочно-эксплуатационного бурения на Юге России за последние 40 лет.

Юг России не имеет достаточных ресурсов органического топлива (табл. 1) и гидроэнергии для полного удовлетворения возрастающих потребностей экономики и социальной сферы. Недостаток газа (более 21 млрд. куб. м) восполняется импортом природного газа из основных газодобывающих районов страны, что требует значительных дополнительных расходов. Вместе с тем, имеющийся потенциал геотермальных вод остается недоиспользованным.

Таблица 1.

Производство и потребление топливно-энергетических ресурсов в регионах Юга России

Юг России	Электроэнергия, млн. кВт*ч	Тепловая энергия, тыс. Гкал	Сжиженный газ, тыс. тонн	Нефть, тыс. тонн	Природный газ, млн. куб. м	Итого, млн. тут	Население, тыс. чел.
Производство ТЭР, всего, в т.ч.:	**70784**	**76321**	**361**	**12321,5**	**20096**	**81**	**22 968 435**
СКФО	***25252***	***18310***	***-***	***1264***	***712***	***15***	***9 254 940***
1. Республика Дагестан	5460	1636,2	-	195,2	327,1	2,87	2 737 313
2. Ставропольский край	16520,8	10405,4	-	1005,5	385,3	9,662	2 711 198
3. Чеченская Республика	1302,5	530,9	-	х	х	0,555	1 268 042
4. Кабардино-Балкарская Республика	409,2	2109,2	-	х	х	0,563	893 819
5. Республика Сев.Осетия-Алания	374,9	1664,7		1,5	-	0,464	700 858
6. Республика Ингушетия	н.д.	н.д.	н.д.	62,3	н.д.	0,089	516 693
7. Карачаево-Черкесская Республика	1185	1964,3	-	-	-	0,802	427 017
ЮФО	***45532***	***58010***	***361***	***11057***	***19383***	***66***	***13 713 495***
8. Республика Адыгея	91,1	822,8	-	0,3	13,1	0,211	443 168
9. Республика Калмыкия	0,1	282	-	199,4	73,7	0,426	283 166
10. Краснодарский край	6129	13888,2	132	1102,3	3572,7	10,784	5 160 656
11. Астраханская область	2605,8	12041	-	6445	14431	29,118	1 007 113
12. Волгоградская область	16338	17700	229	3310	806	15,195	2 589 887
13. Ростовская область	20368	13276	-	-	487	10,242	4 229 505
Потребление ТЭР, всего, в т.ч.:	**80072**	**58365**	**744**	**9643**	**41977**	**102**	**22 968 435**
СКФО	***22407***	***12584***	***468***	***-***	***17346***	***31***	***9 254 940***
1. Республика Дагестан	5136,1	1203,6	38,4	-	2634	5,1	2 737 313
2. Ставропольский край	9883,5	6974,4	405	-	10634	17,669	2 711 198
3. Чеченская Республика	2189,8	113,4	1,1	-	77,2	0,868	1 268 042
4. Кабардино-Балкарская Республика	1408,9	1381,9	5,3	-	1405	2,386	893 819
5. Республика Сев.Осетия-Алания	2082	1529,5	11,9	-	1175	2,394	700 858
6. Республика Ингушетия	531	130,6	0,8	-	523,2	0,812	516 693
7. Карачаево-Черкесская Республика	1175,7	1251	5,5	-	897,5	1,696	427 017
ЮФО	***57665***	***45781***	***276***	***9643***	***24631***	***71***	***13 713 495***
8. Республика Адыгея	1199,4	353	2,6	-	552,2	1,123	443 168
9. Республика Калмыкия	458,8	190,4	3,3	-	352,3	0,606	283 166
10. Краснодарский край	19815,8	12001	96,7	80	8189	18,931	5 160 656
11. Астраханская область	3548,2	9609,2	20	0,1	3732	7,465	1 007 113
12. Волгоградская область	17207,9	17063	110	9563	5515	29,53	2 589 887
13. Ростовская область	15435,2	6564,1	43,1	-	6291	13,94	4 229 505
Сальдо	**-9287**	**17956**	**-383**	**2678**	**-21881**	**-21**	

Имея благоприятные предпосылки к интенсивному развитию - значительную ресурсную базу теплоэнергетических вод, достаточно высокую экономическую эффективность, принадлежность геотермальных вод к возобновляемым источникам энергии - геотермальное производство на Юге России находится в настоящее время в стагнационно-кризисном состоянии. В связи с этим, проблема развития здесь геотермального производства представляется весьма актуальной.

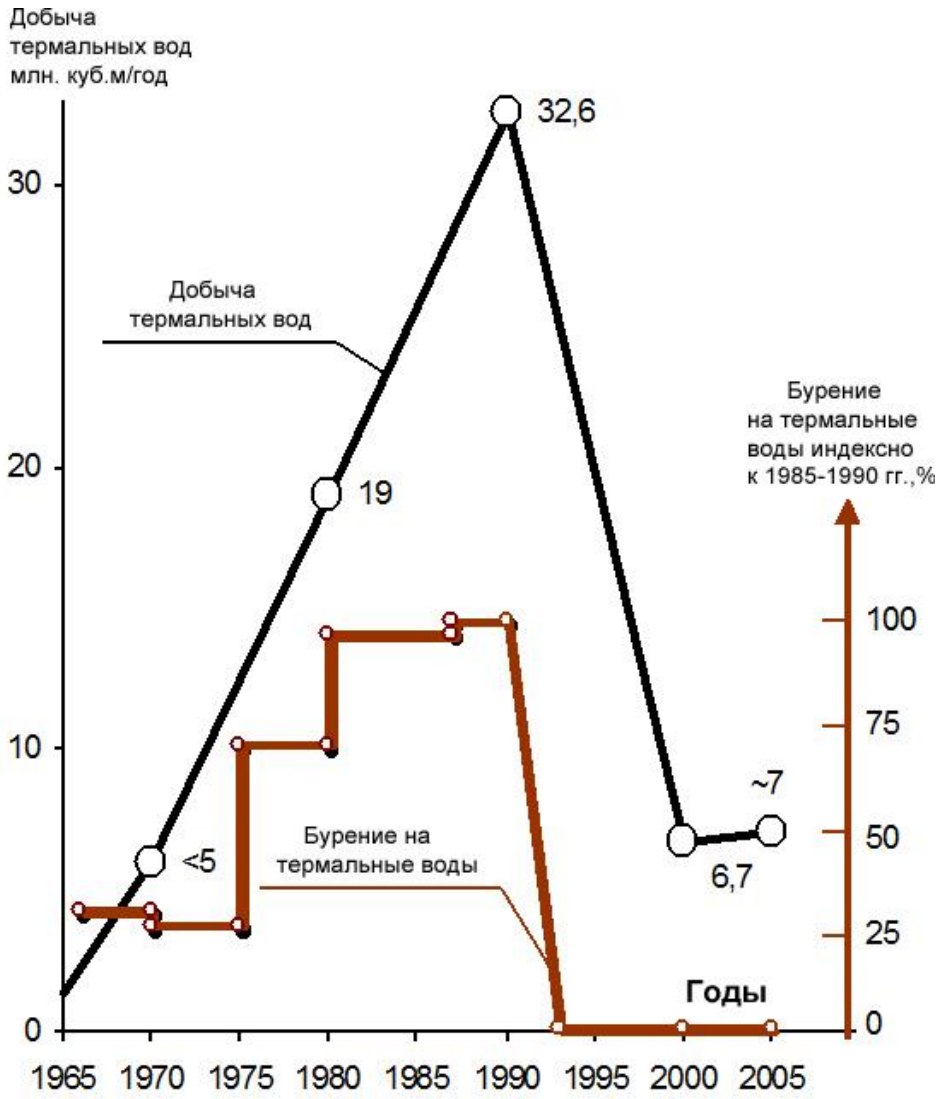


Рис. 1. Динамика добычи геотермальных вод и разведочно-эксплуатационного бурения на Юге России

В настоящее время геотермальное производство на Юге России характеризуется следующими обобщенными параметрами:

1. Количество геотермальных месторождений, ед.	74
2. Суммарное количество геотермальных скважин, ед.	241
3. Основные производственные фонды предприятий, млн. руб.	126,6
4. Численность обслуживающего персонала, чел.	283
5. Годовая добыча геотермальной воды, млн. $м^3$	
6. Годовой отпуск теплоэнергии, тыс. Дж	985,6

Сегодня в регионе функционируют два предприятия, осуществляющие добычу геотермальных вод и отпуск теплоэнергии: ООО "Геоэкопром" (Дагестан) и ОАО "Нефтегазгеотерм", добывающее геотермальные воды в Краснодарском и Ставропольском краях, Адыгее, Карачаево-Черкессии и Кабардино-Балкарии.

Оценка прогнозно-эксплуатационных ресурсов геотермальных вод перспективных площадей показала, что разведанные запасы геотермальных вод Юга России в настоящее время составляют 243,3 тыс.м^3/сутки. Их использование весьма невелико – 8,7%. Совершенно незначителен современный объем геотермального теплопроизводства в сопоставлении с объемом теплоэнергии, реализуемой на основе газоиспользования – 0,26%. При полной реализации разведанных запасов геотермальных вод возможный объем замещения природного газа возрастает в 11,7 раз, достигая 3,05% всего газопотребления. При реализации прогнозных ресурсов только освоенных геотермальных месторождений (797,7 тыс.м^3/сутки) возможный объем газозамещения возрастает до 10% регионального потребления газа (табл. 2).

Таблица 2.

Сопоставление объемов газопотребления и потенциала производства геотермального тепла в районах Юга России

Потребление газа природного за 2005 г. по районам Юга России - Ставропольский и Краснодарский края, республики Адыгея, Дагестан, Чеченская, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская), млн. м^3	Запасы, прогнозы геотермальных вод			Потенциал тепло-произ-водства за год		Современный и возможный объем замещения природного газа	
	Категории	Величина		тыс. ГДж	тыс. т у.т.	млн. м^3/год	%
		м^3/ сутки	млн.м^3/ год				
25028	используемые	21 085	7,1	1933,5	83,1	66,2	0,26
	разведанные	243 311	85,2	22309,4	960,0	764,5	3,05
	прогнозные	797 690	279,2	73140,9	3145	2506,4	10,01

Выявлена также стратегическая перспектива газозамещения в регионе геотермальными водами. Она определена в размере от 80 % современного объема газопотребления до 25-кратного превышения его.

На рис.2 показаны потенциальные возможности замещения природного газа геотермальной энергией в регионе.

Хотя объем использования геотермальных вод в регионе в настоящее время невелик, здесь имеются весьма значительные потенциальные возможности, которые включают в себя, прежде всего, масштабный геологический потенциал, накопленный опыт эксплуатации функционирующих в регионе месторождений и солидный фонд геотермальных скважин.

Как показывают проведенные исследования, на Юге России имеются большие ресурсы геотермальной энергии и значительное количество освоенных месторождений. В ближайшей перспективе повышение теплопроизводительности ряда действующих геотермальных месторождений может стать актуальным резервом экономии газопотребления в регионе. В последующем, геотермальные ресурсы региона смогут выполнять функцию стратегического резерва в теплоснабжении Юга России.

Была произведена оценка экономической эффективности повышения теплопризводительности существующих 72-х геотермальных месторождений Юга России. В связи с отрицательными значениями чистого дисконтированного дохода, отклонено от дальнейшего рассмотрения 21 месторождение. Проведено групповое ранжирование 51 месторождения, выделены три группы, различающиеся показателями внутренней нормы доходности возможных проектов их реконструкции.

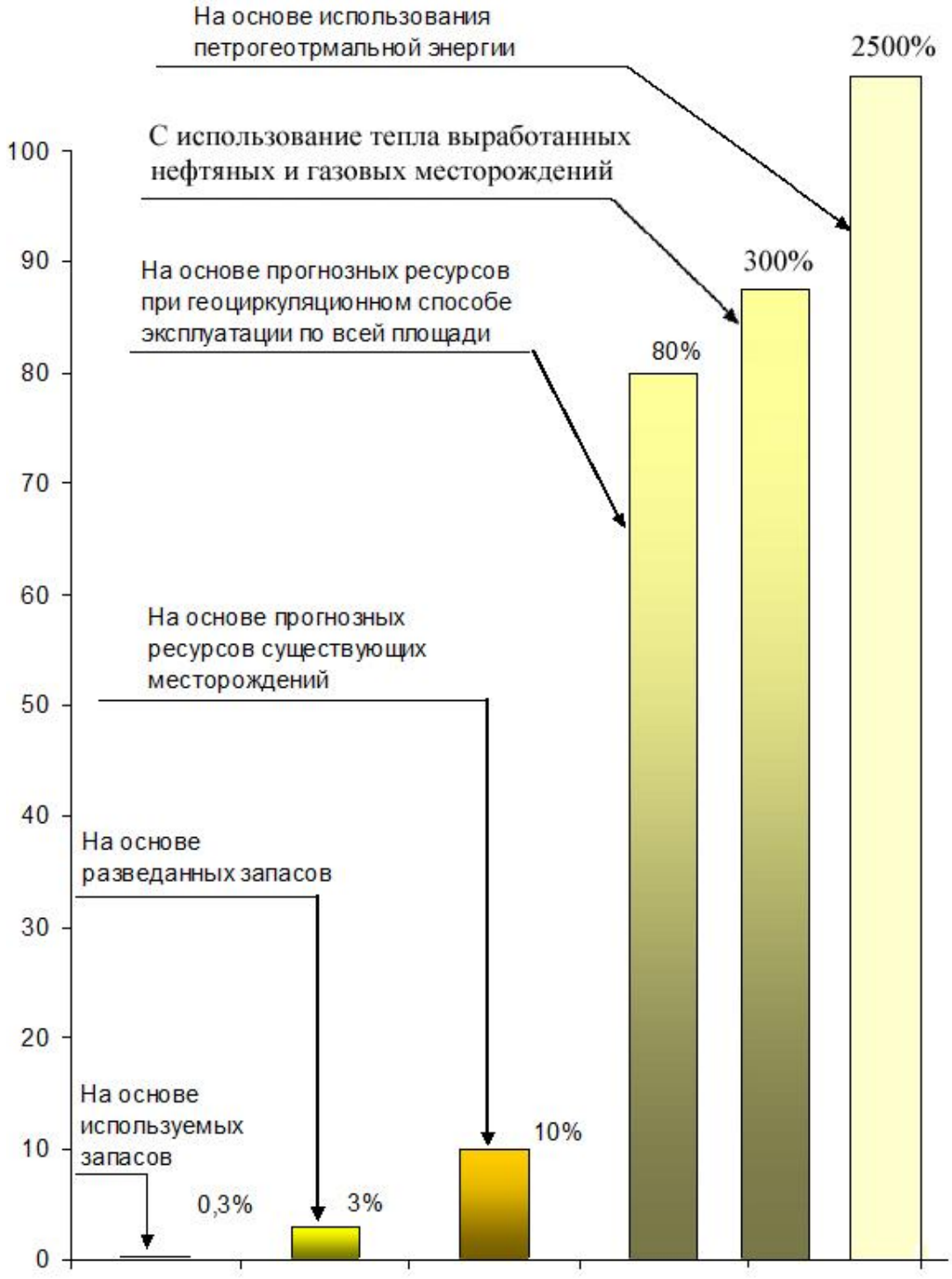


Рис. 2. Потенциальные возможности замещения природного газа геотермальной энергией

Осуществленный анализ позволяет определить степень перспективы и очередность рассмотрения конкретных проектов повышения теплопро-изводительности геотермальных месторождений.

Первая очередь – ближайшая перспектива – 29 месторождений 1-ой группы, потенциально обеспечивающие прирост теплопродукции за 25-летний период в размере 663,2 млн. ГДж и соответственно замещение природного газа в объеме 22,7 млрд. м^3. Масштаб возможных инвестиций составляет 4,1 млрд. руб. Внутренняя норма доходности проектов более 20%.

Вторая очередь – последующий этап – 9 месторождений 2-ой группы, потенциально обеспечивающие прирост теплопродукции за 25-летний период в размере 103,4 млн. ГДж и соответственно замещение природного газа в объеме 3,6 млрд. м^3. Масштаб возможных инвестиций составляет 1,1 млрд. руб. Внутренняя норма доходности проектов находится в интервале 15-20%.

13 месторождений 3-ей группы на данном этапе не наделяются статусом очередного рассмотрения.

В табл. 3 приведена общая диспозиция и перспективная динамика сводных показателей эффективности выделенной совокупности - 51 месторождения Юга России.

Таблица 3.

Общая диспозиция показателей перспектив развития ГТП Юга России

Сценарии	Варианты оценки эффективности	Пассивная динамика рыночной конъюнктуры					Активная динамика рыночной конъюнктуры				
		Стартовые инвестиции, млрд. руб.	ЧДД, млрд. руб.	ИДД, отн. ед.	ВНД, %	ДСО, лет	Стартовые инвестиции, млрд. руб.	ЧДД, млрд. руб.	ИДД, отн. ед.	ВНД, %	ДСО, лет
Сценарий ускоренного роста (100% собственный капитал)	ГТП	8,1	3,6	1,5	17,2	11,9	8,1	10,2	2,5	24,1	9,4
	ГТП + Замещение газа	8,1	8,9	2,3	28,3	7,6	8,1	25,3	4,8	39,1	6,5
	ГТП + разница внешнего и внутреннего тарифов	8,1	34,0	6,0	131,8	3,5	8,1	45,9	7,8	153,4	3,2
Сценарий умеренного роста (50% собственный капитал)	ГТП	4,05	2,1	1,6	16,3	16,0	4,05	8,9	3,6	27,0	11,1
	ГТП + замещение газа	4,05	7,7	3,3	35,5	8,8	4,05	24,3	8,2	52,8	7,2
	ГТП + разница внешнего и внутреннего тарифов	4,05	33,4	10,9	203,1	4,0	4,05	45,3	14,4	236,4	3,1

Примечание: ГТП - геотермальное производство, ЧДД – чистый дисконтированный доход, ИДД – индекс дисконтированной доходности, ВНД – внутренняя норма доходности, ДСО – дисконтированный срок окупаемости. Выделенным цветом показаны рекомендуемые показатели эффективности перспектив развития ГТП Юга России по рекомендуемым вариантам и сценариям.

Рассмотрены 2 сценария развития:

- сценарий ускоренного роста при обеспечении требуемых инвестиций полностью собственным капиталом;
- сценарий умеренного роста – при обеспечении развития собственным капиталом в объеме 50% требуемых инвестиций, другие 50% - за счет кредитов.

Оценка эффективности сценариев развития геотермального производства осуществлена по трем вариантам:

- эффективность собственно геотермального производства;
- эффективность геотермального производства с учетом замещения газа;
- эффективность геотермального производства с учетом экспорта замещаемого природного газа.

Как показал анализ, проекты ускоренного и умеренного сценариев развития геотермального производства по 51 месторождению, в настоящее время при пассивной динамике рыночной конъюнктуры по 1-му варианту являются среднеэффективными (ВНД в пределах

15-20%), а по 2-му и 3-му вариантам с учетом эффекта замещения природного газа – высокоэффективными.

Сроки окупаемости инвестиций с учетом дисконта (10%) колеблются по рекомендуемым вариантам от 6,5 до 8,8 лет, что также свидетельствует о инвестиционной привлекательности геотермальной энергетики.

Кроме того, следует отметить высокие показатели бюджетной эффективности по всем рассмотренным вариантам, причем значительную часть налоговых поступлений получат наряду с федеральным бюджетом (налог на добычу полезных ископаемых, НДС, налог на прибыль), региональный бюджет (налог на имущество, налог на прибыль) и местный бюджет (земельный налог).

Показатели экономической эффективности расширения использования геотермальных ресурсов Юга России по рекомендуемым сценариям (выделены дополнительным цветом), свидетельствуют о высоком потенциале и перспективах развития геотермального производства на Юге России.

Итоговые ориентирующие показатели:

– ресурсный потенциал замещения природного газа геотермальной энергией по существующим месторождениям Юга России – 10,01%;

– возможный дополнительный объем замещения природного газа за 25–летний период эксплуатации по 51 месторождению – 32,3 млрд. м^3 (5,2% от потребления газа в настоящее время), прирост теплопродукции – 938,3 млн. ГДж.

– возможный дополнительный объем замещения природного газа за 25 - летний период эксплуатации по всем 72 месторождениям – 41,5 млрд. м^3.

Проведенное исследование дает основание утверждать, что освоение геотермальных ресурсов Юга России представляет интерес для дочерних организаций ПАО "Газпром", осуществляющих свою деятельность в местах расположения геотермальных месторождений. Освоение геотермальных ресурсов Юга России должно войти в зону внимания ПАО "Газпром" и стать постоянным элементом общеотраслевого планирования.

Литература:

1. *Белан С.И., Панич Л.Н., Перцев В.П.* Перспективы использования геотермальных вод Юга России с целью замещения природного газа / Газовая промышленность. 2007. № 6. С. 27-29.
2. *Белан С.И., Бадавов Г.Б., Гусейнов Н.М.* Перспективы освоения возобновляемых источников энергии в энергодефицитных регионах Юга России. В Сб: Проблемы и перспективы использования потенциала возобновляемых источников энергии в регионе / Материалы круглого стола. 2005. С. 4-18.
3. *Белан С.И., Саркаров Р.А., Гусейнов Н.М., Бадавов Г.Б.* Технико-экономическая оценка перспектив освоения возобновляемых источников энергии в России с целью энергосбережения. В Сб: Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. 2012. С. 177-183.
4. *Гусейнов Н.М., Белан С.И., Бадавов Г.Б.* Экономическая эффективность расширения использования геотермальных вод Юга России. В Сб: Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. 2008. С. 198-204.
5. *Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А.* Перспективы использования возобновляемой энергетики в горных территориях / В сборнике: Эффективное развитие горных территорий России. Горный форум – 2016: материалы международной научно-практической конференции. 2016. С. 318-329.
6. *Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А.* О реализации республиканской целевой программы "Использование возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан" / В сборнике: Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. РАН. ИНИ-

ОН. Отд. науч. Сотрудничества; Отв. ред. В.И. Герасимов, Д.В. Ефременко. Москва, 2016. С. 659-662.

7. *Алиев Р.М., Исрапилов М.И., Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б.* Использование геотермальной энергии для производства тепла и электроэнергии // Тез. докл. Междунар. научн. конф., посвященной 275-летию РАН и 50-летию ДНЦ РАН. Махачкала. 21 мая 1999 г. С. 108.
8. *Алиев Р.М., Бадавов Г.Б.* Новые направления использования геотермальных вод в Северном Дагестане // "Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы": Сборник докладов междунар. науч.-практ. конф. СПб: Изд-во СПбГПУ, 4-6 ноября 2003. С. 282-284.
9. *Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Власов В.С.* Состояние и перспективы развития геотермальной энергетики в Дагестане // Международный семинар "Проект Всемирного Банка и Глобального Экологического Фонда по развитию геотермальной энергетики в странах Европы и Центральной Азии: участие стран СНГ"/В кн. "Проблемы развития геотермальной энергетики в странах СНГ и деятельность международного ГеоФонда". Москва. 25-26 ноября 2003 г. ОАО "ЭНИН им. Г.М. Кржижановского", 2004. С. 135-154.
10. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Исрапилов М.И., Бадавов Г.Б.* Перспективы использования на выработанных нефтяных месторождениях скважинных теплообменников и вод артезианских горизонтов для тепло- и горячего водоснабжения // Теплоэнергетика. 2008. № 12. С. 20-26.
11. *Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б.* Современное состояние и перспективы освоения геотермальных энергетических ресурсов Дагестана // Стратегия экономического развития Республики Дагестан до 2020 года: Материалы научно-практической конференции / Под общей редакцией члена-корреспондента И.К. Камилова. - Махачкала: ГУП "Типография ДНЦ РАН", 2008. С.668-680.
12. *Abdulagatov, I.M., Akhmedova-Azizova, L.A., Aliev, R.M., Badavov, G.B.* Measurements of the Density, Speed of Sound, Viscosity and Derived Thermodynamic Properties of Geothermal Fluids. J. Chem. Eng. Data, 61, 2016, 234–246. DOI: 10.1021/acs.jced.5b00507
13. *Abdulagatov, I.M., Akhmedova-Azizova, L.A., Aliev, R.M., Badavov, G.B.* Measurements of the density, speed of sound, viscosity and derived thermodynamic properties of geothermal fluids from south Russia Geothermal Field. Part II. Applied Geochemistry 69 (2016) 28-41. DOI.org/10.1016/j.apgeochem.2016.04.003
14. *Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алиев Р.М., Рамазанов А.Ш.* Комплексное освоение геотермальных ресурсов // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11, N1. С. 149-158. DOI: 10.18470/1992-1098-2016-1-149-158.
15. *Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А.* Вопросы республиканской целевой программы "Использование возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан" // Региональные проблемы преобразования экономики. 2015. № 9. С. 36-42.

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ И МИРЕ. НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ.

Свалова В.Б.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

Аннотация. Быстрый рост энергопотребления, ограниченность и удорожание ресурсов невозобновляемого топлива, обострение экологических проблем заставляют мировую экономику широко использовать альтернативные источники энергии. Геотермальные ресурсы являются важнейшим источником развития энергетики, редкометальной и химической промышленности, санаторно-бальнеологического и агропромышленного комплексов. Россия обладает огромными запасами

гидрогеотермальных, т.е. аккумулированных в подземных водах, и петротермальных, аккумулированных в горных породах, ресурсов. В то же время в России они используются далеко недостаточно [1-17]. Прошедший в Австралии в апреле 2015 г. Всемирный Геотермальный Конгресс подвел некоторые итоги развития геотермальной энергетики в мире.

Наиболее ярких успехов в развитии геотермальной энергетики Россия достигла на Камчатке. Общая мощность энергообъектов на Камчатке, включая Мутновскую (50 МВт), Верхне-Мутновскую (12 МВт) и Паужетскую ГеоЭС (14,5 МВт в 2014), оценивается в 76,5 МВт. Это составляет 25 % потребности региона в электроэнергии, что позволяет даже в случае прекращения поставок мазута на полуостров решить стратегическую задачу обеспечения электроэнергией жилого сектора и жизненно важных объектов. На Курилах работают две ГеоЭС – мощностью 1,8 МВт (Менделеевская на о. Кунашир) и 3,6 МВт (Океанская на о. Итуруп). Таким образом, общая мощность ГеоЭС России составляет 81,9 МВт.

Интересно сравнить производство электроэнергии из геотермальных источников по странам (Таб.1) [8].

Таблица 1.

Производство электроэнергии из геотермальных источников в мире

Страна	1990, МВт	1995, МВт	2000, МВт	2005, МВт	2010, МВт	2015, МВт
Аргентина	0,67	0,67	0	0	0	0
Австралия	0	0,17	0,17	0,2	0,1	1,1
Австрия	0	0	0	1	1,4	1,2
Китай	19,2	28,78	29,17	28	24	27
Коста Рика	0	55	142,5	163	166	207
Сальвадор	95	105	161	151	204	204
Эфиопия	0	0	8,52	7	7,3	7,3
Франция	4,2	4,2	4,2	15	16	16
Германия	0	0	0	0,2	6,6	27
Гватемала	0	33,4	33,4	33	52	52
Исландия	44,6	50	170	322	575	665
Индонезия	144,75	309,75	589,5	797	1197	1340
Италия	545	631,7	785	790	843	916
Япония	214,6	413,71	546,9	535	536	519
Кения	45	45	45	127	202	594
Мексика	700	753	755	953	958	1017
Новая Зеландия	283,2	286	437	435	762	1005
Никарагуа	35	70	70	77	88	159
Папуа Новая Гвинея	0	0	0	39	56	50
Филиппины	891	1227	1909	1931	1904	1670
Португалия	3	5	16	16	29	29
Россия	11	11	23	73	82	82
ТАЙВАНЬ	0	0	0	0	0	0,1
Тайланд	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Турция	20,6	20,4	20,4	20,4	91	397
США	2774,6	2816,7	2228	2544	3098	3450
Total	**5831,72**	**6833,38**	**7974,06**	**9058,1**	**10897**	**12635**

Наиболее перспективными регионами для практического использования геотермальных ресурсов на территории России являются Северный Кавказ, Западная Сибирь, Прибайкалье, Курило-Камчатский регион, Приморье, Охотско-Чукотский вулканический пояс. Практически повсеместно внутреннее тепло Земли может осваиваться с помощью тепловых насосов.

Использованием и усовершенствованием тепловых насосов для утилизации геотермальных ресурсов занимается целый ряд организаций. Пионерами использования тепловых насосов в России явились НПО «Недра» в Ярославле и Группа Компаний «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» в Москве. На тепловых насосах работают экспериментальная школа в деревне Филиппово Ярославской области, демонстрационный комплекс «Экопарк-Фили», энергоэффективный жилой дом в Москве на улице Академика Анохина, 62, административное здание «Гиперкуб» - первое здание иннограда "Сколково".

Оно выполнено в виде куба с ребром, равным 30 м, имеет семь этажей и площадь, равную 6 тыс. кв. метров. Проектирование «Гиперкуба» основано на принципах энергоэффективности, использовании возможностей окружающей среды, эргономики и снижения стоимости эксплутационных расходов. Здание снабжено солнечными батареями, расположенными на его южном фасаде, они используются для освещения коридоров, лестниц и т.д. Для управления климатическими условиями внутри здания применяется вода, которая поступает из артезианских скважин и круглый год имеет постоянную температуру около 5 °С. При построении трехмерной модели «Гиперкуба» использовалась российская технология Vizerra, позволяющая создавать интерактивные 3D-модели различных объектов. Первыми резидентами «Гиперкуба» стали около двух десятков компаний, в том числе Cisco, IBM и Siemens.

Строение разработано по международным стандартам LEED (Leadership in Energy & Environmental Design Standards) - это рейтинговая система сертификации проектов и зданий исходя из уровня их энергоэффективности, экологической чистоты и экоустойчивости, разработанная Американским Советом по Зеленым Зданиям – United States Green Building Council.

Для повышения рейтинга LEED в Гиперкубе была применена схема на базе теплового насоса Stibel Eltron WPF 66 G. В качестве источника низкопотенциального тепла используется буферная емкость объемом 1500л, которая подключена к тринадцати геотермальным зондам. Глубина каждого зонда составляет 80м. Такая схема в совокупности с пластинчатыми теплообменниками и трехходовыми клапанами позволяет тепловому насосу одновременно работать на охлаждение и на выработку тепла.

Автоматика ТНУ полностью интегрирована в систему «умного дома» Гиперкуба и управляется компьютером оператора службы эксплуатации. Программное обеспечение дает всю информацию о физических состояниях теплоносителей в различных гидравлических контурах и сама принимает решение о включении исполнительных механизмов запорной арматуры, двигателей циркуляционных насосов и компрессора теплового насоса.

Особенно широко тепловые насосы используются в коттеджном строительстве. Использование тепловых насосов в России имеет очень большие перспективы и резервы здесь огромны.

Источником низкопотенциальной тепловой энергии могут служить грунт поверхностных слоев Земли, водоёмы и природные водные потоки, окружающий воздух, вентиляционные выбросы зданий и сооружений, канализационные стоки, сбросное тепло технологических процессов.

Импульсом к интенсивному развитию тепловых насосов в мире послужил энергетический кризис 1973 года. За 3 года рынок тепловых насосов в США достиг уровня 300 000 установок в год.

Наибольшее распространение эти системы получили в США, Канаде, Японии, Исландии, Австрии, Германии, Швеции, Швейцарии.

Темпы роста производства тепловых насосов ежегодно увеличиваются на 30-40%. Так в Японии уже установлено более 10 млн тепловых насосов, в США ежегодно производится 1 млн установок. В Швеции получают от теплонасосов более 50% тепла. Мировым лидером по величине использования низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли на душу населения является Швейцария.

В России производится около 1000 тепловых насосов в год, что, конечно, совершенно недостаточно. Даже необходимость экономии в отоплении, слабая газификация страны, огромные территории и потребность в энергоснабжении отдаленных регионов не приводят к столь необходимой интенсификации отрасли.

Сочетание тепловых насосов с другими источниками возобновляемых энергоресурсов – солнца, ветра, биотоплива – открывает широкие перспективы энергонезависимого автономного экологичного жилищного строительства.

Для сравнения приведем данные по прямому использованию геотермальных ресурсов в мире [9] (Таб. 2, 3).

Таблица 2.

Прямое использование геотермальной энергии в мире

Страна	**1995**	**1995**	**2000**	**2000**	**2015**	**2015**
	Мощность МВт	**Энергия Т Дж/год**	**Мощность МВт**	**Энергия Т Дж/год**	**Мощность МВт**	**Энергия Т Дж/год**
Албания					16,23	107,59
Алжир	100	1657	100	1586	54.64	1699,65
Аргентина			25,7	449	163,60	1000,03
Армения			1	15	1,50	22,50
Австралия			34,4	351	16,09	194,36
Австрия	21,1	200	255,3	1609	903,40	6538,00
Беларусь					4,73	113,53
Бельгия	3,9	101,6	3,9	107	206,08	864,40
Босния и Герцеговина					23,92	252,33
Бразилия					360,10	6622,40
Болгария	133,1	778,5	107,2	1637	93,11	1224,42
Канада	1,68	47	377,6	1023	1466,78	11615,00
Карибские острова			0,1	1	0,1	2,78
Чили			0,4	7	19,91	186,12
Китай	1915	16981	2282	37908	17870,00	174352,00
Колумбия			13,3	266	18,00	289,88
Коста Рика					1,00	21,00
Хорватия			113,9	555	79,94	684,49
Чехия			12,5	128	304,50	1790,00
Дания	3,5	45	7,4	75	353,00	3755,00
Эквадор					5,16	102,40
Египет			1	15	6,80	88,00
Сальвадор					3,36	56,00
Эстония					63,00	356,00
Эфиопия					2,20	41,60
Финляндия			80,5	484	1560,00	18000,00
Франция	599	7350	326	4895	2346,90	15867,00
Грузия	245	7685	250	6307	73,42	695,16
Германия	32	303	397	1568	2848,60	19531,30
Греция	22,6	135	57,1	385	221,88	1326,45
Гренландия					1,00	21,00
Гватемала	2,64	83	4,2	117	2,31	56,46
Гондурас			0,7	17	1,93	45,00
Венгрия	340	5861	472,7	4086	905,58	10268,06
Исландия	1443	21158	1469	20170	2040,00	26717,00
Индия			80	2517	986,00	4302,00

Индонезия			2,3	43	2,30	42,60
Иран					81,50	1103,12
Ирландия					265,54	1240,54
Израиль	44,2	1196	63,3	1713	82,40	2193,00
Италия	307	3629	325,8	3774	1014,00	8682,00
Япония	319	6942	1167	26933	2186,17	26130,08
Иордания			153,3	1540	153,30	1540,00
Кения			1,3	10	22,40	182,62
Корея (Юж.)			35,8	753	835,60	2682,65
Латвия					1,63	31,81
Литва			21	599	94,60	712,90
Македония	69,5	509,6	81,2	510	48,68	601,11
Мадагаскар					2,81	75,59
Мексика			164,2	3919	155,82	4171,00
Монголия					20,16	340,46
Марокко					5,00	50,00
Непал			1,1	22	3,32	81,11
Нидерланды			10,8	57	790,00	6426,00
Новая Зеландия	264	6614	307,9	7081	487,45	8621,00
Норвегия			6	32	1300,00	8260,00
Пакистан					0,54	2,46
Папуа Новая Гвинея					0,10	1,00
Перу			2,4	49	3,00	61,00
Филиппины			1	25	3,30	39,58
Польша	63	740	68,5	275	488,84	2742,60
Португалия			5,5	35	35,20	478,20
Румыния	137	2753	152,4	2871	245,13	1905,32
Россия	210	2422	308,2	6144	308,20	6143,50
Саудовская Аравия					44,00	152,89
Сербия					115,64	1802,48
Словакия	99,7	1808	132,3	2118	149,40	2469,60
Словения	37	761	42	705	152,75	37,00
Южная Африка					2,30	37,00
Испания					64,13	344,85
Швеция	47	960	377	4128	5600,00	51920,00
Швейцария	110	3470	547,3	2386	1733,08	11836,80
Таджикистан					2,93	55,40
Тайланд			0,7	15	128,51	1181,20
Тунис			23,1	201	43,80	364,00
Турция	140	1987	820	15756	2886,30	45126,00
Украина					10,90	118,80
Великобритания			2,9	21	283,76	1906,50
США	1874	13890	3766	20302	17415,91	75862,20
Венесуэла			0,7	14	0,70	14,00
Вьетнам					31,20	92,33
Йемен			1	15	1,00	15,00
Югославия	80	2375	80	2375		
Total	**8604**	**112441**	**15145**	**190699**	**70358,98**	**587786.43**

Таблица 3.

Суммарное прямое использование геотермальной энергии в мире по различным категориям. (Мощность, МВт).

	1995	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**
Тепловые насосы	1854	5275	15384	33134	49898
Обогрев жилья	2579	3263	4366	5394	7556
Теплицы	1085	1246	1404	1544	1830
Бассейны	1097	605	616	653	695
С.-х. сушка	67	74	157	125	161

Индустриальное использование	544	474	484	533	610
Душевые	1085	3957	5401	6700	9140
Охлаждение/снеготаяние	115	114	371	368	360
Другое	238	137	86	42	79
Всего	**8664**	**15145**	**28269**	**48493**	**70329**

В октябре 2014 года прошел двухдневный саммит глав стран Евросоюза, в ходе которого была принята стратегия по климату и энергетике до 2030 года. Основные тенденции на рынке отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) Европейского союза тесно связаны с требованиями Директивы по энергетической эффективности (2012) и Директивы по увеличению доли использования возобновляемых источников энергии (2009). Основная цель этих документов – подвигнуть рынок к строительству зданий с нулевым потреблением невозобновляемой энергии, т.е. угля, нефти и газа.

Одной из главных мировых тенденций развития ОВК является развитие децентрализованных систем энергоснабжения зданий. Развитие систем, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии, позволяет практически в любой точке планеты от районов с вечной мерзлотой до экватора энергетически эффективно обеспечить здание тепловой энергией и холодом. Будущее за гибридными теплонасосными системами теплохладоснабжения, использующими в качестве источника тепла низкого потенциала грунт в комбинации с теплом атмосферного воздуха и вентиляционными выбросами зданий. Эта технология сегодня уже повсеместно доступна.

Литература:

1. Свалова В.Б. Геотермальная энергетика в ЖКХ. Независимая газета. НГ-ЭНЕРГИЯ. № 267 (6313), 9 декабря 2014 г., с. 14.
2. Свалова В.Б. Комплексное использование геотермальной энергии в России. Проблемы и перспективы. Материалы Второго международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности». 10-11 ноября 2014 г. М., REENFOR-2014, с.370-377.
3. Свалова В.Б. Геотермальные ресурсы России: проблемы и перспективы комплексного использования. // Мониторинг. Наука и технологии. №2(3), 2010, 16-29.
4. Свалова В.Б. Геотермальные ресурсы России и их комплексное использование.// Альтернативная энергетика и экология. 2009, №7, 69-79.
5. Свалова В.Б. Проблемы и перспективы использования геотермальных ресурсов. //Использование и охрана природных ресурсов в России. № 5, 2008, стр. 3-10.
6. Свалова В.Б. “Добыть тепло из-под Земли”. Газета «Тверская, 13», №115, 25 сентября 2010 г.
7. Свалова В.Б. "Термоминеральные воды России и их комплексное использование." //Гидрометеорология и экология, №2, 2010 г., стр. 174-191.
8. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Australia, 19 pp. CD.
9. Lund J.W., Boyd T. L. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Australia, 31 pp. CD.
10. Povarov K.O.,Svalova V.B. Geothermal Development in Russia: Country Update Report 2005-2009. Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.(CD)
11. Svalova V., Povarov K.Geothermal energy use in Russia. Country update for 2007-2012. Proceedings of European Geothermal Congress 2013. Pisa, Italy, 2013, 7 pp.
12. Svalova V.B. Mineral extraction from brines and geothermal resources complex use in Russia.\\ Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Indonesia, 7 pp, CD.
13. Svalova V.B. Complex utilization of geothermal resources. CD Proceedings of IAEG Congress, 5-10 September 2010, Auckland, New Zealand, 7 pp.

14.Svalova, V.B. Geothermal Resources of Russia and Their Complex Utilization. Proceedings of AGEC2011 (Australian Geothermal Energy Conference 2011), Melbourne, Australia, 8pp.
15.Svalova V. Geothermal Energy Use in Russia. Proceedings of The 4th African Rift Geothermal Conference(ARGeo C4) Nairobi, Kenya, 2012. 8 pp.
16. Svalova V., Povarov K.Geothermal Energy Use in Russia. Country Update for 2010-2015 Proceedings of World Geothermal Congress 2015, Australia, 7 pp, CD.
17. Svalova V., Tetimova S. Thermomineral Waters Complex Use and Heat Supply for the Town Velingrad (Bulgaria). Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Australia, 7 pp, CD.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИРИИ

Рамадан Амер, Елистратов В.В.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
Санкт-Петербург, Россия; 195251, ул. Политехническая, 29; eng_amer@live.com

В Сирии существует высокий потенциал ресурсов возобновляемой энергетики (ВИЭ), в том числе солнечной и ветровой энергии. При выгодном и правильном использовании ВИЭ может быть обеспечена энергетическая независимость страны. Поэтому анализа возможностей использования возобновляемых источников энергии и оценка потенциала ВИЭ всей территории Сирии представляет собой актуальную задачу для развития энергетики страны. В данном работе оценен потенциал ВИЭ всей территории Сирии, рассчитаны общий валовый и технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность территории Сирии, показаны общий теоретический технический потенциал ветроэнергетики Сирии и перспективные районы для строительства ВЭС. Выполнены расчеты и запроектирована ВЭС для одного из перспективных районов для строительства ВЭС (район Тияс в провинции Хомс).

Введение. Возобновляемые источники энергии – это потоки энергии, возникающие в атмосфере и на поверхности планеты в результате взаимодействия веществ, сил и энергий [1]. Для оценки потенциала ВИЭ всей территории Сирии, рассмотрены основные видов ВИЭ.

1. Солнечная энергия. Сирия обладает высокими ресурсами солнечной энергии, как и другие страны Ближнего Востока и средиземноморского побережья. Средний приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность $Э_{уді}$ в Сирии составляет около 5 кВт·ч /м^2 в день, или 1800 кВт·ч /м^2 в год. Средняя величина суточного лучистого потока колеблется от 4,4 кВт·ч /м^2 в день в горных районах на западе до 5,2 кВт·ч /м^2 в день в пустынных районах Бадии. Число часов солнечного сияния изменяется от 2820 часов до 3270 часов [2].

В 1994 году, National Energy Research Centre (NERC) завершил оценку солнечной энергии в Сирии и создали солнечный атлас Сирии. До сих пор в Сирии солнечных электростанций, подключенных к национальной сети, не существует, однако, растущее число строений использует системы водяного отопления, работающие на солнечной энергии. В Сирии существует около 2МВт фотоэлектрических систем (подключенных и не подключенных к сети) и более 0.3 миллионов систем водяного отопления, работающих на солнечной энергии, много локальных производителей солнечных систем водяного отопления.

Согласно Solar Atlas for the Mediterranean (Электронный ресурс) [3] показан средний приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность на рисунке 1. Для расчета валового потенциала солнечной энергии на горизонтальную поверхность всей территории Сирии, проведено зонирование территории и выделено пять зон, характеризуемых соответствующим средним приходом солнечной энергии и по помощью программы Google Earth рассчитана площадь каждой зоны. Характеристики зон и удельный приход солнечной энергии в каждой зоне показаны в таблице 1.

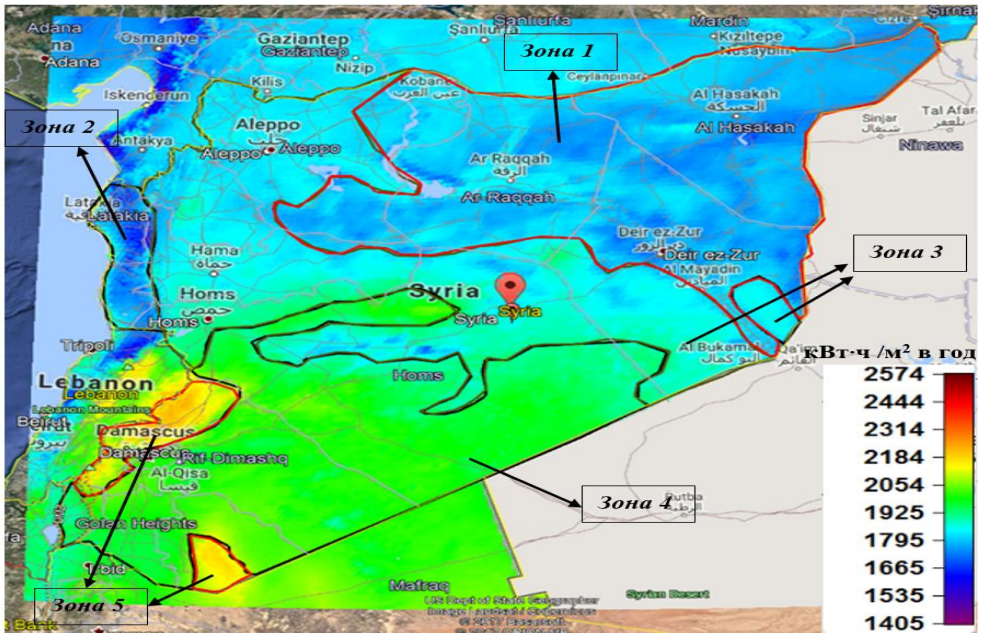


Рис. 1. Средний приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность $Э_{уд}$ (кВт·ч /м² в год)

Таблица 1.

Характеристики зон карты Сирии

Зона	Площадь зоны S_i, км²	$Э_{удi}$, ГВт·ч /км² в год	$Э_{уд.i} * S_i$, ГВт·ч в год
Зона 1	63574	1740	110618760
Зона 2	4847	1665	8070255
Зона 3	56710	1850	104913500
Зона 4	54335	2000	108670000
Зона 5	5714	2180	12456520

Общий валовый потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность всей территории Сирии определяется по формуле:

$$Э^{сэ}_{сум.в.} = \sum Э_{уд.i} * S_i \text{, ГВт·ч /год}$$

где i - *номер зоны*

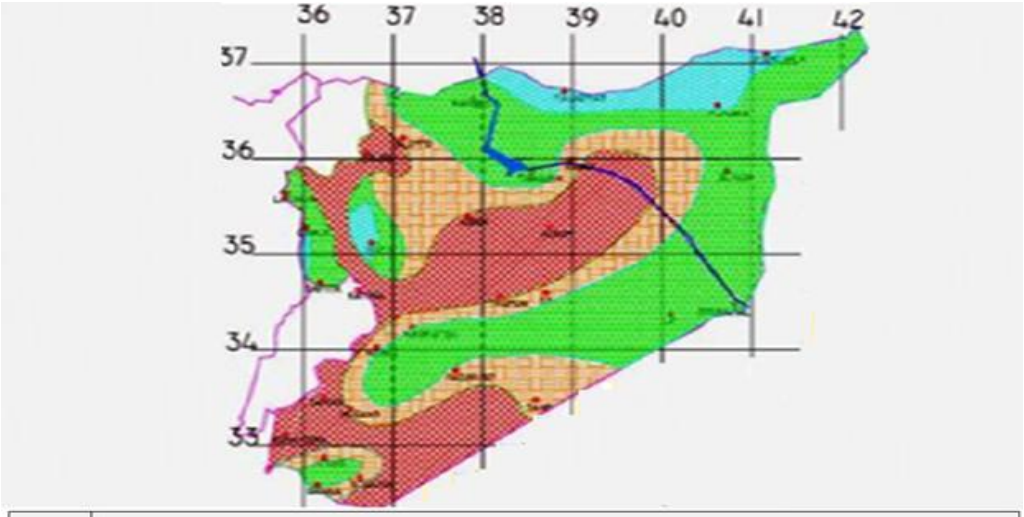
$$Э^{сэ}_{сум.в.} = 344729035 \text{ ГВт·ч/год} = 344729 \text{ ТВт·ч/год}$$

При использовании солнечных батарей со средним КПД равным 16% ($\eta_{СБ}$ = 16%) можно определить общий технический потенциал солнечной энергии территории Сирии $Э^{сэ}_{сум.т.}$по формуле:

$$Э^{сэ}_{сум.т.} = Э^{сэ}_{сум.в.} * \eta_{СБ} = 344729 * 0{,}16 = 55157 \text{ ТВт·ч/год}$$

2. Ветровая энергия. В 1989 г. при финансовой поддержке ПРООН (Программа Развития Организации Объединенных Наций) и в сотрудничестве с национальными датскими лабораториями "Risø " был завершен атлас ветра в Сирии, который содержит информацию о скорости ветра, взятых из 60 станций метеонаблюдений в Сирии, охватывающих большинство климатических зон, и эти информации включают в себя результаты измерений ветра за десять лет (1979-1989). Согласно атласу ветра, была создана карта ветров Сирии [4] для высоты 50 метров (рисунок 2). На основе анализа были выделены четыре ветровые зоны, характеризуемые соответствующими средними скоростями ветра. Зона, показанная на карте красным цветом, имеет наиболее высокий потенциал и среднегодовые скорости ветра (5-11,5 м/с для различных типов рельефа). Эта зона включает центральный район, юго-западный, юго-

восточной район н прибрежный горный район. Остальные зоны имеют меньший потенциал ветровой энергии, т.к. характеризуются меньшими значениями средних скоростей ветра.



Зоны	50 метров над уровнем земли									
	Закрытая местность		Открытая местность		Морское побережье		Открытое море		Холмы и горы	
	м/с	Вт/м²	м/с	Вт/м²	м/с	Вт/м²	м/с	Вт/м²	м/с	Вт/м²
1	5 - 6	150-250	6,5 – 7,5	300-500	7 – 8,5	400-700	8 - 9	600-800	10 – 11,5	1200-1800
2	4,5 - 5	100-150	5,5 – 6,5	200-300	6 - 7	250-400	7 - 8	400-600	8,5 - 10	700-1200
3	3,5 – 4,5	50-100	4,5 – 5,5	100-200	5 - 6	150-250	5,5 - 7	200-400	7 – 8,5	400-700
4	<3,5	<50	<4,5	<100	<5	<150	<5,5	<200	<7	<400

Рис. 2. Атлас ветра Сирии

Согласно [5] теоретический технический потенциал ветроэнергетики в Сирии был рассчитан на основе данных Атласа ветроэнергетики с учетом следующих допущений:

1. Для генерации электроэнергии из энергии ветра считались пригодными только места с минимальной плотностью энергии ветра 250 Вт/м^2 на высоте 50 м;
2. Плотность воздуха принимается за 1,184 кг/м^3, учитывая высоту уровня моря и температуру окружающей среды 25ºC;
3. Для расчетов были использованы технические характеристики двух коммерчески доступных ветроэлектроустановок (ВЭУ) мощностью 100 кВт и 1 МВт.
4. Для этого использовался интервал массива ветроэлектростанции (ВЭС) 10d (между строками) x 5d (в строках). Где d: диаметр ветроколеса;
5. Целесообразно для разработки ветропарков, использовано по крайней мере 5% от подходящей площади земли.

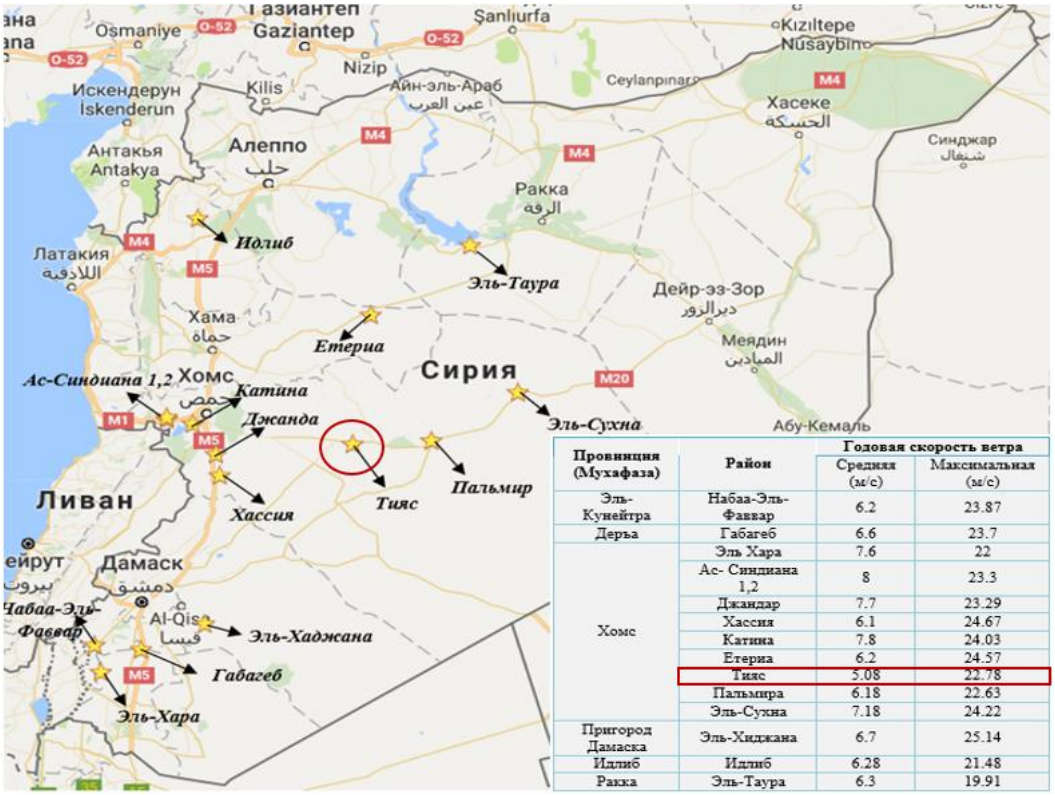
Исходя из этих расчетов, общий теоретический технический потенциал ветроэнергетики Сирии оценивается в 85000 МВт (см. таблица 2) [5].

Таблица 2.

Теоретический технический потенциал ветроэнергетики Сирии

Зоны в Атласе ветра Сирии	Площадь зоны [км^2]	Теоретический технический потенциал ветроэнергетики в каждой зоне [МВт]	Общий теоретический технический потенциал ветроэнергетики в Сирии [МВт]
1	54000	36000	85000
2	43000	25500	
3	75000	21500	
4	13000	2000	

В рамках проекта оценки ветровых ресурсов в Сирии и в сотрудничестве с немецкой компанией "Decon", были установлены станции мониторинга ветра в нескольких районах, которых были выбраны в зависимости от результатов Атласа ветра в течение 2004-2006 гг. Измеренные данные показали ветровые перспективные районы, которые имеют хороший ветровой потенциал, они показаны на рисунке 3 [6].



Провинция (Мухафаза)	Район	Годовая скорость ветра	
		Средняя (м/с)	Максимальная (м/с)
Эль-Кунейтра	Набаа-Эль-Фаввар	6.2	23.87
Дерьа	Габагеб	6.6	23.7
Хомс	Эль Хара	7.6	22
	Ас- Синдиана 1,2	8	23.3
	Джандар	7.7	23.29
	Хассия	6.1	24.67
	Катина	7.8	24.03
	Етериа	6.2	24.57
	Тияс	5.08	22.78
	Пальмира	6.18	22.63
	Эль-Сухна	7.18	24.22
Пригород Дамаска	Эль-Хиджана	6.7	25.14
Идлиб	Идлиб	6.28	21.48
Ракка	Эль-Таура	6.3	19.91

Рис. 3. Перспективные районы строительства ВЭС в Сирии

Для перспективного района Тияс авторами выполнены исследования ветроэнергетического потенциала и проектирование ветропарка мощностью 3,9 МВт [7]. На основе выполненных расчетов сделаны следующие выводы:

1. Основные характеристики ветрового режима в районе Тияс для ряда наблюдений за и направлением ветра на высоте 40 м (значение средней скорости, роза ветров, параметры распределения Вейбулла, удельная плотность ветрового потока) приведены на рисунке 4.

2. Пересчитанный для высоты 70 м природный ветроэнергетический потенциал составил 224,11 Вт/м^2 и технический ветроэнергетический потенциал (для нескольких ВЭУ мощностью по 1МВт) колеблется от 5 до 5,6 млн. кВт·ч/км^2.

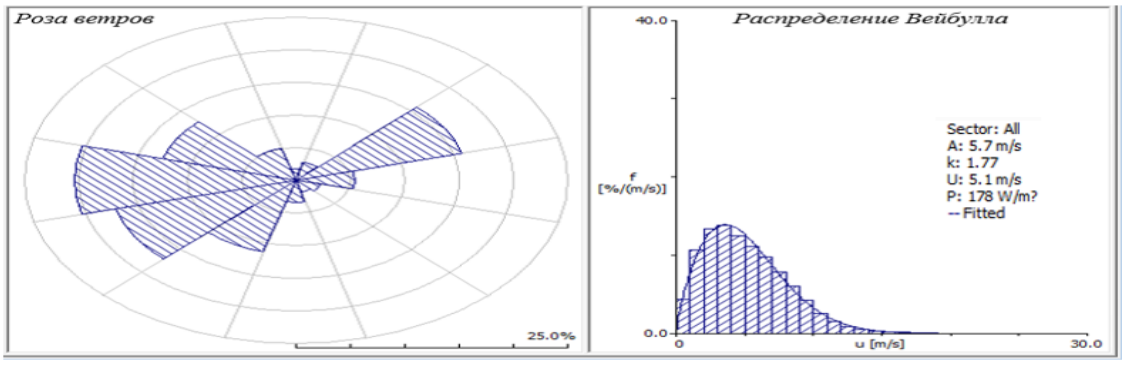


Рис.4. Основные характеристики ветра района Тияс на высоте 40 м

3. На высоте 70 м построена карта ветроэнергетических ресурсов (ВЭР) площадки Тияс (12.6 х 6.5 км^2) и выбрано несколько компоновок ВЭС, состоящей из 3 ВЭУ типа Siemens (SWT 1.3 MW/62) (см. рисунок 5) и принят вариант компоновки ВЭС 3 с выработкой 7175 МВт·ч/год и значением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) 21%.

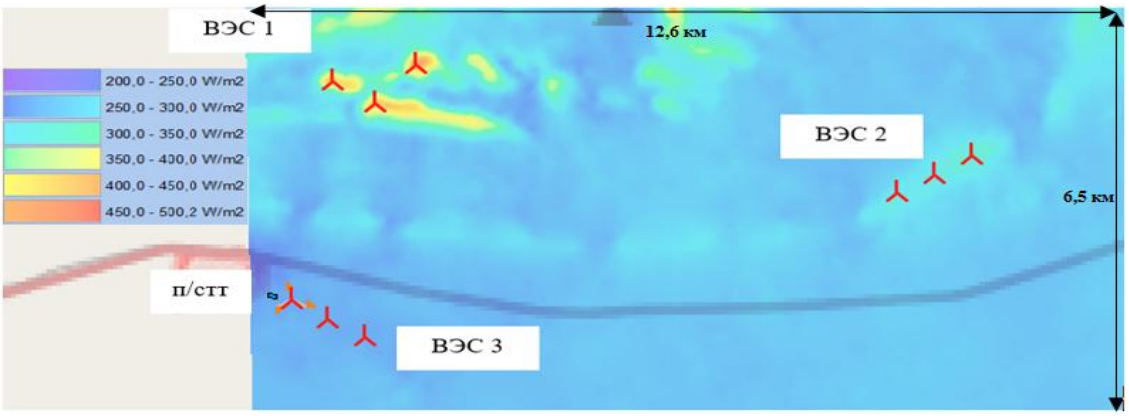


Рис. 5. Карта ВЭР площадки Тияс на высоте 70 м с несколькими компоновок ВЭС

3. Биомасса. Сельское хозяйство является важным фактором для сирийской экономики и, следовательно, животные и сельскохозяйственные отходы являются важными продуктами в сельских районах. Основными источниками биомассы в Сирии являются древесные и растительные отходы, а также отходы крупного рогатого скота и птицы. Более 60 % общего потенциала биомассы является производным от сельскохозяйственного сектора как показано на рисунке 6. Потенциал биомассы в Сирии оценивается в 25,8 млн. тонн в год, который делится между всеми источниками [8].

В 2010г был стороны 19 домашних биоустановки для производства биогаза в пригороде Эс-Сувейда. Объём каждой биоустановки 14 м^3.

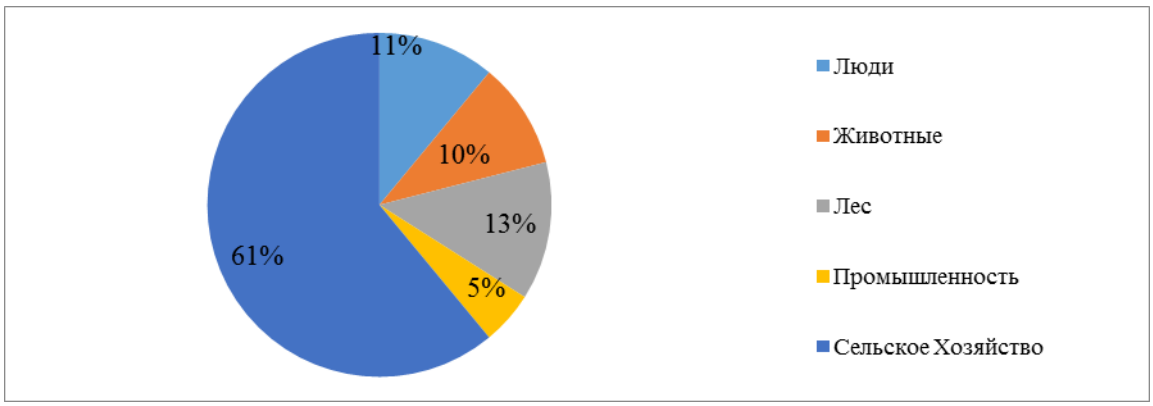


Рис. 6. Ресурсы биомассы в Сирии

4. Гидроэнергия. Гидроэнергия обеспечивает значительный вклад в энергоснабжение Сирии, обеспечивая от 2000 ГВт.ч до 4000 ГВт.ч в год, в зависимости от количества осадков. В таблице 3 представлены гидроэлектростанции (ГЭС) Сирии, наибольшими из которых являются ГЭС Эль-Таура мощностью 880 МВт и ГЭС Тишрин мощностью 630 МВт, обе на реке Эль-Фурат, обеспечивают около 90% производства гидроэнергетического сектора. Общая номинальная установленная мощность ГЭС составляет 1620 МВт [5]. Эти станции обеспечивали 5% и 13% производства электроэнергии, в зависимости от количества осадков.

Таблица 3.

ГЭС в Сирии

Река	Название	Номинальная Установленная Мощность [МВт]	Среднегодовая выработка [ГВт.ч/год]
Эль-Фурат	Эль-Таура	880	2000
	Эль-Баас	75	300
	Тишрин	630	1300
Барада	Уади-Барада	8	24
Эль-Аси	Эр-Растан	8	12
	Шезар	7	4
Эфрин	17 Апреля	10	40
Эль-Хабур	Эль-Хасака	1,2	3,3
Итого		1619,2	3683,3

Оценка гидроэнергетических ресурсов показывает:

- Сирийские гидроэнергетические ресурсы ограничены низким количеством осадков и стоком из международных рек. Большая часть гидроэнергетических ресурсов были использованы, и нет больших возможностей для использования малой, средней или большой гидроэнергии.

- Дальнейшие исследования должны быть проведены, чтобы проанализировать возможности для малых и микро-ГЭС. Они могут быть автономными электростанциями или соединяться для создания мини-энергосистемы в регионе с учетом доступности воды и окупаемостия инвестиций.

5. Геотермальная энергия. Геотермальный энергетический потенциал Сирии был оценен на основе математических моделей. Проспективные скважины с характеристиками показаны в таблице 4 [9]. Оценка геотермальных энергетических ресурсов показывает что существует высокий теоретический потенциал геотермальной энергии в некоторых местах Сирии, как в Пальмаире, однако технико-экономическое обоснование должно быть подготовлено.

Таблица 4.

Проспективные скважины для получения геотермальной энергии

Название скважины	Местоположение скважины	Температура поверхности С°	Дебет воды ($м^3$/час)
Aldabiat – Sukneh	Пальмира -центральный регион	61	42
Aboureah – Gareten	Пальмира -центральный регион	50	сухой пар
Almauh Swamp	Пальмира -центральный регион	45	320
Alyadude	Дараа-южный регион	44	7,72
Raas Alain	Северо-восточный регион	40	31,3
Alsfera	Алеппо- северной регион	38	980

Заключение и выводы. Из анализа возможностей использования ВИЭ и оценки потенциала ВИЭ территории Сирии, можно сделать следующие выводы:

1. Сирийская Арабская Республика хорошо обеспечена возобновляемыми источниками энергии, такими, как солнце и ветер, и в меньшей степени биомассой и водными ресурсами.

2. Общий валовый и технический потенциал солнечной энергии на горизонтальную поверхность всей территории Сирии составляют, соответственно, около 344729 ТВт·ч/год и 55157 ТВт·ч/год.

3. С учетом принятых допущений, общий теоретический технический потенциал ветроэнергетики Сирии оценивается в 85000 МВт.

4. На основе измеренных данных метеостанций и анализа Атласа ветров Сирии выбраны 14 перспективных площадок для строительства ВЭС.

5. Выполнены расчеты и запроектирована ВЭС для площадки Тияс, которые показали, что природный ветроэнергетический потенциал на высоте 70 м составил 224,11 Вт/м^2 и производство энергии на ВЭС, состоящей из 3 ВЭУ типа Siemens 1,3 МВт может составить 7175 МВт·ч/год и КИУМ 21%.

6. Основное использование ВИЭ в Сирии происходит за счет использования гидроэнергетических ресурсов, которые обеспечивают 5% - 13% общего производства электроэнергии в зависимости от водности.

7. Обоснование систем энергоснабжения на основе использования возобновляемых источников энергии представляет собой актуальную задачу для развития энергетики страны.

Литература:

1. *Елистратов В.В.* Возобновляемая энергетика // В.В. Елистратов. – 3-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2016. – 424 с.
2. *Ali Al-Mohamad*, Renewable energy sources in Syria // Renewable Energy, 2001, Volume 24, pp. 365-371.
3. Solar Atlas for the Mediterranean [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.solar-med-atlas.org/solarmed-atlas/solar_data
4. *Ali Hamzeh*, Overview of THE Syrian Energy Profile // Paper submitted to Regional Collaboration Workshop on Energy Efficiency and Renewable Energy Technology, Beirut, Lebanon, April 30, 2004.
5. *Fadi Aljawabra,* Large scale RE projects in Syria // An analysis of the institutional and legal framework in view of the Egyptian experience, Master Thesis, Cairo University and Kassel University , February 2011.
6. *Рамадан Амер, Елистратов В.В.,* Потенциал традиционных и возобновляемых источников энергии в Сирии // Энергохозяйство за рубежом журнал (в печати).
7. *Рамадан Амер*, Исследование и расчёт параметров ветроэлектростанции для условий Сирии // Магистерская диссертация, СПб, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016.
8. *Рамадан А.*, Потенциал возобновляемых источников энергии в Сирии // НОЦ «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе». Неделя науки СПбПУ, 2014, С. 49-51.
9. *Mohamad Kordab, Maen Daoud,* Water, energy and climate change nexus, prospective for the Syrian Arab Republic up to 2030 // Syrian National Report, Plan Bleu UNEP/MAP Regional Activity Centre, August 2011.

УДК: 339.166

РАЗРАБОТКА ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В РОССИИ

Алишаев М. Г., Ниналалов С. А.

ФБГУН Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала, Россия;
367030, пр-т И. Шамиля, 39а, said2706@gmail.com

Существуют разные мнения о запасах нефти и газа в России. По информации Председателя Правления Сбербанка Российской Федерации Герман Греф век нефти и газа для страны заканчивается. «На мой взгляд, это примерно 2028−2032 г. г... Повторения суперсырьевого цикла ждать не приходится. По меркам макроэкономики времени остается совсем не много, чтобы диверсифицировать экономику» [1].

Однако, по данным министра природных ресурсов и экологии России Сергея Донского [2] извлекаемые запасы нефти составляют около 29 миллиардов тонн. «Добыча сырой нефти (без газового конденсата) в 2015 году предварительно составила около 505 миллионов тонн. Если считать по этим цифрам, то открытых запасов хватит на 57 лет».

Согласно оценке компании BP [3], рентабельно извлекаемые запасы нефти составляют 14 млрд. т., то есть известных запасов достаточно на 28 лет добычи.

Таким образом, в любом случае необходимо заниматься разведкой и разработкой трудноизвлекаемых запасов нефти и развитием возобновляемых источников энергии.

На XXIII Мировом экономическом конгрессе в Стамбуле 10 октября 2016 года Президент Российской Федерации Владимир Путин отметил, что «спрос на возобновляемую энергию растёт опережающими темпами по сравнению с энергией из традиционных источников. Внедрение передовых технологий, в том числе таких, как распределённая генерация, мощные накопители и умные сети, способствует ускорению этого процесса» [4].

В Правительстве России не планируют активизировать разработки альтернативных источников энергии [5]. Владимир Путин подтвердил эту позицию: «В условиях падения цен на нефть более чем в два раза многие даже заговорили о том, что эра углеводородов идёт к закату, что надо уже сейчас полностью переориентироваться на альтернативные источники энергии. Думаю, реальных оснований для таких далеко идущих выводов пока нет – во всяком случае, пока» [4]. По мнению Президента России, традиционная энергетика также не будет стоять на месте: «Совершенствование технологий разведки и добычи делает трудноизвлекаемые запасы нефти и газа более доступными, в том числе это касается и энергетического потенциала Арктики» [6].

К трудноизвлекаемым ресурсам, стоимость освоения которых сравнима с сегодняшней стоимостью нефти на рынке, можно отнести горючие сланцы, технология добычи и переработки которых отработана в США.

Горючие сланцы

Геологи определяют горючие сланцы как осадочные породы, содержащие в основном аквагенное органическое вещество. При нагреве сланцев без доступа воздуха образуются жидкие и газообразные углеводороды (20-70% от первоначальной массы). Жидкие углеводороды близки по составу к нефтяным углеводородам и считаются сланцевой нефтью.

По оценкам специалистов общие запасы горючих сланцев в мире составляют порядка 650 трлн. тонн [7]. Из них можно получить до 26 трлн. т сланцевой нефти. При нынешнем уровне потребления этих энергоресурсов хватит на 300 лет непрерывной добычи.

С помощью термического воздействия на кероген, содержащийся в горючих сланцах, добывается керогеновая нефть [8]. Добыча проводится обычным шахтным методом с перегонкой на реакторах, где сланцы подвергают пиролизу без доступа воздуха, в результате чего из породы выделяется сланцевая смола [9]. Этот метод (ex-situ process [10]) является весьма затратным [11]. Другой способ добычи - нагревание производится непосредственно под землей [12] (in-site process[10]).

Развитие добычи горючих сланцев с их переработкой сдерживается проблемой утилизации большого количества углекислого газа, попадающего в атмосферу в процессе извлечения из него сланцевой смолы.

Кроме керогеновой нефти, горючие сланцы, как нефтематеринская порода [13], содержат легкую нефть и газ, которые добывают с помощью многостадийного гидроразрыва пласта и наклонно-направленного бурения с протяженными горизонтальными участками. Такого рода добыча сложнее и дороже добычи нефти, и себестоимость сланцевой нефти будет заметно выше традиционной. Добыча сланцевой нефти рентабельна при минимальном уровне цен на нефть в 50-60 долл. за баррель.

При добыче сланцевой нефти непосредственно из пласта дебит пробуренных скважин падает вдвое быстрее, чем при добыче обычной нефти– до 80 % через 400 дней после начала эксплуатации скважины. Для компенсации такого резкого падения и выравнивания профиля добычи скважины на сланцевых месторождениях вводят поэтапно.

Сланцевая революция в США

Первая коммерческая добыча газа из сланцевого месторождения была осуществлена в 1821 году на месторождении Fredonia (New York). Газовые отложения в сланце сконцентрированы в коллекторах, которые рассредоточены по сланцевому пласту. Высокая себестоимость добытого газа была связана с тем, что бурились многочисленные вертикальные скважины, проводился гидроразрыв пласта и откачивался газ.

Промышленная добыча сланцевого газа в США была запущена в начале 2000-х годов. Промышленное горизонтальное бурение значительно сократило себестоимость добытого газа и привело к так называемой «сланцевой революции».

Сланцевый газ, добываемый вблизи мест потребления, когда инфраструктура позволяет проводить бурение большого числа скважин, получается дешевым. Однако, для сохранения уровня добычи надо постоянно бурить новые скважины, а для транспортировки газа нужна отдельная трубопроводная сеть, так как сланцевый газ содержит примеси, и его нельзя смешивать с природным газом. Кроме того, нужны мощности по сжижению сланцевого газа для экспорта.

Сланцевый газ постепенно завоевывает место на мировом рынке. По прогнозам Международного энергетического агентства, ожидается, что доля сланцевого газа в структуре мирового потребления газа вырастет с 8 процентов в 2012 году до 35 % к 2035 году.

Из-за падения стоимости нефти и газа, произошедшего в 2014 году, многие компании США испытывают финансовые проблемы. Например, акции компании архитектора американского сланцевого бума Гарольда Хэмма Continental Resources упали на 30 %. Но это не ведет к окончанию «сланцевой революции». Стоимость добычи сланцевого газа снижается для внутренних потребителей, стимулируя рост экономики. Ожидается создание более 500 тысяч постоянных и около 1,2 млн. временных рабочих мест в сфере добычи и переработки сланцевого газа. Крупнейшая энергетическая корпорация США Exxon Mobil, выкупившая за 35 млрд. долларов компанию XTO Energy, добывающую сланцевый газ, тоже несет убытки. Однако компания имеет стратегию по разработке сланцевых пород на ближайшие 25 – 30 лет.

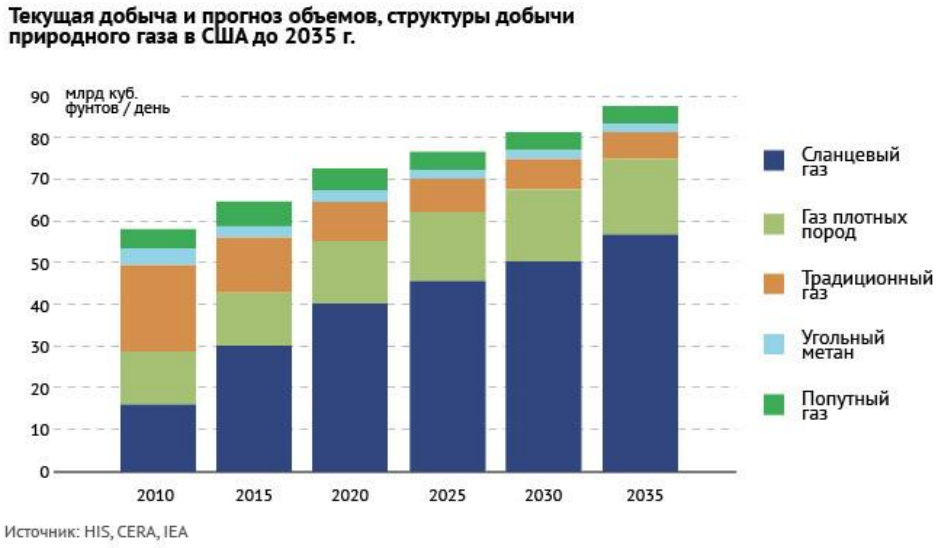


Рис. 1. Добыча и прогноз объемов добычи газа в США

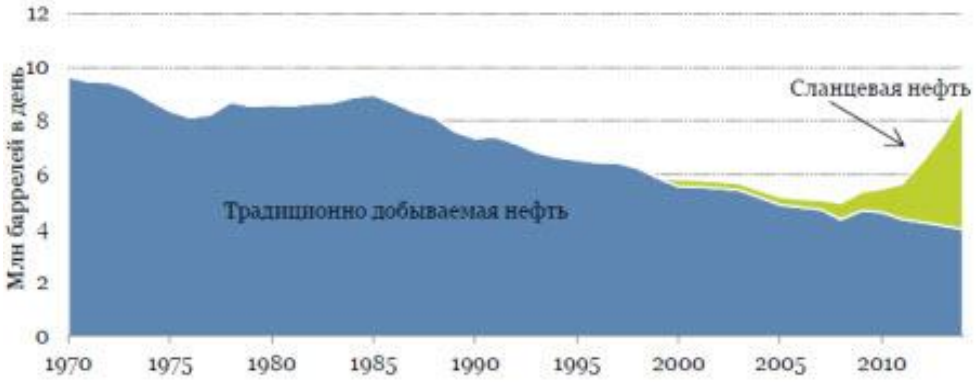


Рис. 2. Добыча нефти в США

Добыча сланцевого газа приводит к проблемам, связанным с загрязнением воды, в связи с чем многие страны запретили применение гидроразрыва пластов. Вблизи месторождений скапливаются значительные объемы отработанной загрязненной воды, которая, как правило, не утилизируется с соблюдением экологических норм. Грунтовые воды загрязняются толуолом, бензолом, мышьяком и др. Экологический фактор вызвал запрет на добычу сланцевого газа во Франции, в Германии, в Чехии, в Болгарии [14,15].

Появляется информация об обнаружении новых весьма крупных месторождений горючих сланцев в Канаде [16], в Иране [17], в других странах. Соединенные Штаты Америки заявили, что их запасы нефти превышают запасы России и Саудовской Аравии [18]. По результатам исследования норвежской консалтинговой компании Rystad Energy [19], извлекаемые запасы США составляют 264 млрд. баррелей, России - 256 млрд. баррелей, Саудовской Аравии - 212 млрд. баррелей. Сергей Донской назвал эти данные спекулятивной попыткой повлиять на рынок [20].

Однако, последнее обнаружение в Техасе запасов сланцевой нефти порядка 20 млрд. баррелей показывает, что прогнозы могут быть пересмотрены в сторону увеличения. «Тот факт, что это самое большое месторождение сланцевой нефти, показывает, что даже в тех районах, в которых уже добыли миллиарды баррелей нефти, есть еще потенциал, чтобы найти еще миллиарды долларов», - сказал Уолтер Гвайдроз, координатор программы энергетических ресурсов USGS [21].

Перспективы разработки горючих сланцев в России

Добыча и переработка горючих сланцев началась на территории сегодняшней России в 1918 г. с принятием постановления Совнаркома о добыче и переработке горючих сланцев. Были организованы систематическое изучение, разведка запасов и их промышленная разработка.

В 1927 г. было открыто крупнейшее месторождение горючих сланцев в Ленинградской области. В 1960-1990 гг. разрабатывались сланцевые месторождения в Эстонской ССР, Ленинградской области, Поволжье.

С 2008 года в России обсуждается тема использования имеющегося в России газосланцевого потенциала [22,23]. Россия обладает огромными запасами сланцев, основная часть которых сосредоточена в пластах Баженовской свиты в Западной Сибири. Извлекаемые ресурсы оцениваются в 22 млрд. баррелей нефти, что составляет почти половину ресурсов сланцевой нефти США. Вдоль западного склона Урала расположены два горизонта сланцев, частично выходящие на поверхность. В Якутии от Алдана до побережья Северного Ледовитого океана протянулся пласт сланцев, более удобныы для разведки и добычи. Месторождения в Иркутской области и в Кузбассе (Барзасские сланцы) были открыты еще в тридцатые годы прошлого столетия.

Летом 2013 года Президент России на пресс-конференции по итогам рабочего заседания глав государств и правительств стран – участниц Форума стран – экспортёров газа на вопрос о сланцевой революции в США ответил: «У России достаточно возможностей и для развития сланцевого газа, и для добычи его обычным способом. Наша страна по запасам, наверное, первая в мире, вы это знаете. У нас там триллионы <тонн> запасов. Мы обеспечим и себя на долгосрочную, длительную перспективу, даже с учётом роста экономики, и всех наших партнёров. Поэтому для нас сегодня это просто не актуально. Если будут улучшаться технологии, то мы для себя не исключаем этой возможности» [24].

Тем не менее, в 2013-2014 годах «Роснефть», «Лукойл» и «Газпромнефть» заключили соглашения с ExxonMobil, Statoil, Shell, Schlumberger и другими западными компаниями заключили договора о совместной работе по извлечению сланцевой нефти в разных участках Баженовой свиты [25]. События 2014 года и санкции Запада исключили возможность использования технологий зарубежных фирм. Это, с одной стороны, резко сузило перспективы «сланцевой революции» в России, а с другой, вынуждает российские компании разрабатывать собственные технологии [5,14].

Российские технологии на Баженовской свите

Негосударственные структуры начали самостоятельно искать способы разработки сланцевых месторождений в России. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года, разработанный учеными Института энергетических исследований РАН совместно со специалистами Аналитического центра при Правительстве РФ, исходя из отсутствия российских собственных технологий и оборудования, экстраполировали сегодняшнюю ситуацию с горючими сланцами, и оставили в лидерах в добыче сланцевой нефти и газа США [26]. Отмечая пик добычи сланцевых нефти и газа на 2035 год, разработчики Прогноза заявили, что «ключевым производителем сланцевой нефти останутся США. Динамика добычи в США будет определять динамику мирового производства сланцевой нефти».

«Газпром нефть» начала исследования запасов формирования Баженова (Баженовская свита) в Вынгаяхинской области Ямало-Ненецкого автономного округа. Это первый опыт компании в разработке сланцевых нефтегазовых ресурсов. В конце 2015 года специалисты «Газпром нефти» пробурили две скважины гидроразрыва, использовав при этом для облегчения работ традиционные скважины, пробуренные ранее. Произведенный гидроразрыв дал существенный приток нефти [27].

Согласно мнению научного руководителя Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, председателя научного совета РАН по проблемам геологии и разработки месторождений нефти и газа, академика РАН Алексея Конторовича, разработку технологий для добычи нефти на Баженовской свите необходимо осуществить в пределах ближайших 10 лет. Она обойдется в $5-10 млрд. У России есть не более 10 лет, чтобы разработать такие технологии и начать эффективную добычу нефти на Баженовской свите. Накопленный в США, опыт добычи сланцевой нефти для этого месторождения не подходит, так как природа коллектора в Баженовской свите принципиально иная. «Поэтому я считаю первостепенной задачей создание мощной программы научных исследований в России», - отметил Конторович [28].

В 2016 году «Газпромнефть» на Баженовской свите реализовала весь технологический цикл, применяемый в мировой практике для разработки сланцевой нефти [29]. Российские технологии позволяют извлекать из горючих сланцев 5-10 % находящейся в них нефти. В случае, если отечественным ученым удастся разработать современные эффективные методы извлечения нефти и газа из горючих сланцев, Баженовская свита Ханты-Мансийского автономного округа – Югры может давать ежегодно 20-30 млн. тонн нефти вместо сегодняшних 700 тысяч тонн.

Весной 2017 года Министерство энергетики России приняло заявку «Газпром нефти» на присвоение проекту «Развитие российских технологий и разработка оборудования для освоения Баженовского месторождения» статуса национального. Предполагается внедрение сейсмических, магниторезонансных и гравитационных методик исследования месторождения, а также метода геолого-гидродинамического моделирования слоев. Проект предусматривает развитие российских технологий бурения многоуровневых горизонтальных скважин и предполагает разработку методик добычи сланцевой нефти посредством термохимического извлечения [30].

Россия в условиях перманентных санкций Запада должна развивать собственные технологии. Необходима Федеральная целевая программа «Горючие сланцы России», предусматривающая разведку сланцевых месторождений, разработку собственных технологий добычи сланцевой нефти и сланцевого газа, необходимые налоговые льготы, субсидии и другие формы поддержки производителей. Российская Федерация должна быть готова к истощению извлекаемых запасов традиционных углеводородов и переходу к альтернативным источникам энергии, к которым, наряду с возобновляемыми источниками энергии и торфом, надо относить сланцевые нефть и газ.

Литература:

1. https://eadaily.com/ru/news/2016/10/04/nefti-i-gaza-rossii-hvatit-na-14-let-v-chem-oshibsya-german-gref
2. https://rg.ru/2016/03/16/glava-minprirody-rasskazal-kogda-v-rossii-zakonchitsia-neft.html
3. https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf
4. Выступление Президента РФ Владимира Путина на Мировом энергетическом конгрессе в Стамбуле 10.10.2016 г. // kremlin.ru/events/president/news/53062
5. М. Г. Алишаев, С. А. Ниналалов. Перспективы разработки горючих сланцев в России // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований», 19 - 21 октября 2016 г. Махачкала, с. 147-153.
6. Выступление Президента РФ Владимира Путина на Форуме «Российская энергетическая неделя», 4.10.2017 г. // kremlin.ru/events/president/news/55767
7. http://www.bigpowernews.ru/markets/document72853.phtml
8. http://neftegaz.ru/tech_library/view/4301-Goryuchie-slantsy
9. Нефть сланцевых плеев – новый вызов энергетическому рынку? // ИНЭИ РАН, ноябрь 2012, с. 6.
10. Сланцевая нефть: технологии, экономика, экология, Е. В. Грушевенко, Д. А. Грушевенко // ИНЭИ РАН, Экологический Вестник России, № 5, 2013, с. 28-33.
11. Sunggyu Lee, Oil Shale Technology. - CRC Press, 1990. 260 p.
12. http://vseonefti.ru/neft/slancevaya-neft.html
13. Сэмюэль А. Ван-Вактор. Нефть благословенная и проклинаемая: Международный нефтегазовый бизнес от скважины до бензоколонки. – М.: Альпина Паблишер, 2014. – 240 с.
14. С. Г. Асаулов. Нетрадиционные источники углеводородов: сланцевый пузырь или сланцевая революция? // Российские нефтегазовые технологии, 2014 32 (9) , p. 52-61.
15. http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-05-11/russia-was-right-shale-in-europe-has-proved-a-dud
16. http://moneymorning.com/2015/05/29/canadas-new-shale-oil-field-could-rival-the-bakken/
17. Iran discovers shale oil reserves // Oil & Companies News 28/04/2016
18. US oil reserves surpass those of Saudi Arabia and Russia // Financial Times. 4.07.2016. // https://www.ft.com/content/7525f1dc-41d6-11e6-9b66-0712b3873ae1
19. Per Magnus Nysveen. United States now holds more oil reserves than Saudi Arabia. 04.07.2016 // http://www.rystadenergy.com/NewsEvents/PressReleases/united-states-now-holds-more-oil-reserves-than-saudi-arabia

20. https://www.facebook.com/s.e.donskoy/posts/703760949762781
21. USGS Estimates 20 Billion Barrels of Oil in Texas' Wolfcamp Shale Formation. 15.11.2016 // www.usgs.gov/news/usgs-estimates-20-billion-barrels-oil-texas-wolfcamp-shale-formation
22. А. И. Блохин, Г. П. Стельмах, Р. М. Салихов, М. С. Петров. Горючие сланцы – реальная альтернатива нефти // Вестник РАЕН, 2009, № 1, с. 52-56.
23. Т. В. Усова. Переработка горючих сланцев с получением химических продуктов. Дисс. на соискание степени канд. техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2010, 146 с.
24. Пресс-конференция Президента России по итогам рабочего заседания глав государств и правительств стран – участниц Форума стран – экспортёров газа. 1.07.2013 // kremlin.ru/events/president/transcripts/18441
25. М. Г. Алишаев, С. А. Ниналалов. Горючие сланцы в России // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Региональные проблемы преобразования экономики: интеграционные процессы и социально-экономическая политика региона», Махачкала: ИСЭИ ДНЦ РАН, 9-11.11.2016 г.
26. Прогноз развития энергетики мира и России 2016. Институт энергетических исследовний РАН, Аналитический центр при Правительстве РФ, Москва, 2016 // https://www.eriras.ru/files/forecast_2016_rus.pdf
27. https://teknoblog.ru/2016/01/29/54768
28. http://tass.ru/tek/3218127
29. В. А. Прусаков. Бажен еще ждет // Нефтегазовая вертикаль. № 11, 2016, с. 54-58.
30. https://teknoblog.ru/2017/08/23/81470

МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕГИОНЕ

Амадзиева Н.А.[1], Хизриев А.Ш.[2]

[1]ФОИВТ РАН с.н.с., к.э.н.,naida047@inbox.ru
[2]Аспирант экологического факультета, кафедры "Прикладной экологии"
Российский Университет дружбы народов, г. Москва, alikhan-1995@mail.ru

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с развитием распределенной энергетики в регионе, выделены основные факторы, способствующие развитию и использованию распределенной энергетики, приведен конкретный пример использования автономной системы энергоснабжения, обозначены факторы, препятствующие развитию малой энергетики в регионе.

Распределенная энергетика - это сегмент энергетического хозяйства, включающий в себя малые генерирующие установки и малые генерирующие комплексы, в том числе не подключенные к централизованным электросетям, функционирующие на основе традиционных видов топлива и на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). К направлениям развития распределенной или малой энергетики можно отнести: энергии воды, энергию ветра, энергию биомассы, солнечную энергию, геотермальную энергию и другие автономные энергетические установки малой и средней мощности.

В настоящее время уже свыше 70 стран мира имеют свои национальные программы развития распределенной энергетики и прочное законодательное обеспечение этого направления. В России до сих пор такая программа и законодательное обеспечение отсутствуют.

К наиболее серьезным недостаткам централизованной энергетики относятся:

1) значительные потери энергии при доставке ее от производителей конечным потребителям;

2) длительные сроки и огромные затраты финансовых средств при строительстве новых объектов централизованной энергетики; 3) завышенные тарифы на электроэнергию.

В начале XXI века в энергосистемах ряда стран мира (США, Великобритания, Канада, Дания, Швеция, Италия, Австралия) произошли крупномасштабные аварии, повлекших за собой прекращение энергоснабжения мегаполисов, а также крупных промышленных объек-

тов. Основной причиной таких аварий, как известно, стали недостатки системного уровня традиционных централизованных систем энергоснабжения. С определенной периодичностью происходят различные природные катаклизмы, которые выводят из строя отдельные элементы традиционных систем энергоснабжения (высоковольтные линии электропередачи, трансформаторные подстанции и пр.), что приводит к нарушению их устойчивой работы. Традиционные системы энергоснабжения являются объектами повышенной опасности по причине их слабой защищенности перед угрозой террористических актов. Все перечисленное свидетельствует о недостаточной надежности систем централизованного энергоснабжения

Распределенные электростанции могут использоваться таких сферах как: промышленность, нефте- и газопроводы, телекоммуникации, сельское хозяйство, заправочные станции, сфера обслуживания, жилищно-коммунальное хозяйство, спортивно-оздоровительные центры [1].

На рис. 1 приведены основные факторы, способствующие развитию и использованию распределенной энергетики в регионе.

Основными достоинствами распределенных источников энергии являются следующие:

а) высокая технологическая и экономическая эффективность КПД свыше 90% в режимах когенерации и тригенерации. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии итепла в два и более раза ниже тарифов за счет более эффективных технологий генерации, отсутствие потерь и накладных расходов. Срок окупаемости – около 5 лет (только электроэнергия) до 2–3 лет при полной утилизации тепла в режимах когенерации и тригенерации;

б) модульность, масштабируемость, мобильность. Поставка блоками необходимой мощности, возможность быстрого подключения новых блоков к уже работающей станции, а также их демонтажа и перемещения на новые объекты;

в) короткие сроки ввода в эксплуатацию. Сроки построения электростанции мощностью до 2 МВт не превышают 9–12 месяцев, для более мощных станций (10–20 МВт) может потребоваться 12–18 месяцев;

г) Независимость и контроль. Конечный потребитель и его подрядные организации полностью контролируют сроки возведения генерирующих объектов и процесс их эксплуатации. Полностью устраняется проблема сбоев, отключений, нарушений, параметров тока и напряжения по не зависящим от потребителя причинам [2].

Рис. 1. Факторы, способствующие развитию и использованию распределенной энергетики в регионе

В качестве примера использования автономной системы энергоснабжения можно рассмотреть предприятие Хлебозавод № 5, город Махачкала, Ленинкентпгт, ул. Гагарина, 5. В качестве источника энергии используем микротурбины Capstone. Предполагается установить 5 микротурбин С65,мощностью 65 кВт. Каждая из пяти микротурбин С65 на хлебокомбинате будет работать круглый год (8760 ч) со средней нагрузкой около 85% от номинала (средняя суммарная мощность пяти микротурбин будет 276,25 кВт):

1. Годовая выработка электроэнергии микротурбинами составит:

$С_{год} = P_{ср} \times n \times h_{уст} = 276{,}25 кВт \times 5 \times 24ч \times 365 дней = 2419950 кВт \times ч$,

где Рср – средняя суммарная мощность; n – кол-во турбин; h уст – число часов использования установленной мощности.

2. Затраты на топливо

Тариф на газ – 5,06 руб./куб.м. (2017 г. с НДС);

Расход газа для микротурбин С65 = 23 куб. м/ч (при 100%) нагрузке

Ежегодные расходы на газ при работе пяти микротурбин С65 с нагрузкой 85% составят:

$З_{год} = q \times n \times h_{уст} \times T = 23$ куб.м/ч $\times 5$ шт $\times 0{,}85 \times 8760 \times 5{,}06$руб./куб.м. $= 4{,}332{,}827{,}4$ руб.

где q – расход газа для микротурбин С65.

Удельные расходы на топливо:

$З_{год} = 4{,}332{,}827{,}4 \div С_{год} = 2419950 = 558{,}515$ руб./(кВт×ч)

3. Себестоимость вырабатываемой электроэнергии.

При использовании микротурбин себестоимость вырабатываемой электроэнергии складывается из затрат на топливо и стоимости регламентного обслуживания. Затраты на персонал не учитываются, т.к. микротурбины работают без постоянного присутствия обслуживающего персонала. Удельная стоимость регламентного обслуживания (при курсе доллара 60 руб.): Суд. = 0, 994 руб. / (кВт х ч).

Себестоимость вырабатываемой электроэнергии складывается из удельной стоимости газа и удельной стоимости регламентного обслуживания:

$С_{выр.эн.} = 558{,}515$ руб./(кВт×ч) + 0,994руб/ (кВт х ч) = 559,509 руб./(кВт×ч)

4. Экономия на электроэнергии

Альтернативой использованию микротурбин является приобретение электроэнергии у энергосбытовой компании. Экономия на электроэнергии при автономном энергоснабжении будет определяться как разница между затратами при покупке электроэнергии у энергосбытовой компании и затратами на производство этого же объёма электроэнергии с помощью микротурбин. При годовом потреблении электроэнергии в объёме 2419950 кВт×ч экономия составит:

$Э_{эн} = (Т - С_{выр.эн.}) \times Э_{год} = (559{,}509)$ руб./кВт×ч $\times$ 2419950кВт×ч=1,353,983 руб.

При этом весь объѐм тепла, вырабатываемого микротурбинами, получатся фактически бесплатным, т.к. все издержки перенесены на себестоимость электроэнергии.

5. Экономия на тепле

При работе микротурбин образуется достаточно большой объём выхлопных газов. Тепловая энергия выхлопных газов может быть утилизирована с помощью теплообменника «газ-вода». При этом на 1 кВт×ч выработанной электроэнергии приходится 1,78 кВт×ч утилизированного тепла в виде горячей воды с температурой + 95°С. Это тепло может быть использовано на отопление объекта, или направлено на подогрев воды, поступающей в паровые котлы.

Объём утилизированного за год тепла составит:

$V_{ут.} = 419950 кВт \times ч \times 1{,}78 кВт \times ч = 4307511 кВт \times ч$.

Использование утилизированного тепла выхлопных газов на отопление, и подогрев воды, поступающей в паровые котлы, что в паровых котлах будет сжигаться меньше топлива (природного газа) где 9,3 кВт×ч/куб. м – удельная теплота сгорания природного газа, 0,90 – КПД паровогокотла. При тарифе на газ 5,06 руб./куб. м годовая экономия от утилизации тепла выхлопных газов составит:

$Э_Г' = 5{,}06$ руб./куб.м. $\times 514637$куб.м $= 2{,}604{,}063$руб.

6. Экономическая эффективность

Стоимость пяти микротурбин С65 составляет (включая шеф-монтаж и ПНР):

P = 916080 USD × 60 руб. / USD = 54,964,800 руб.

Ежегодная экономия от использования микротурбин для энергоснабжения объекта складывается из экономии на электроэнергии и тепле. Т.к. будущие тарифы на газ иэлектроэнергию предсказать невозможно, то все расчёты уместно вести в ценах 2017 г.(с НДС).

Ежегодная экономия на электроэнергии – $Э_{эн} = 1{,}353{,}983$ руб.

Ежегодная экономия на тепле – $Э_Г' = 2{,}604{,}063$руб

Суммарная ежегодная экономия:

$Э_{сумм.} = 1{,}353{,}983$ руб.+ $2{,}604{,}063$руб.= $3{,}958{,}046$ руб.

Срок окупаемости пяти микротурбин С65 (включая стоимость реализации проекта «под ключ»): 3 года 4 месяца.

Анализируя показатели можно сделать вывод, что внедрение распределенных автономных источников энергии на предприятияхв регионе является экономически выгодным и эффективным решением [3].

Перспективным направлением развития возобновляемых источников энергии вРеспублике Дагестан является использование потенциала биомассы животноводства (до50% экономического потенциала сектора) и твердых бытовых отходов (до 30% экономического потенциала сектора).

Распределенная электрогенерация может повысить надежность работы централизованной сети, которая обычно рассчитана для поставки электроэнергии конечному потребителю. Распределенные источники энергии (РИЭ) расширяют спектр используемыхпервичных энергетических ресурсов и повышают надежность энергоснабжения потребителей. Влияние РИЭ на выбор видов топлива, определяется применяемой технологией, анадежность работы энергосистемы может быть повышена благодаря развитию автономных источников с использованием возобновляемых энергоресурсов. Наличие достаточного резерва энергосистемы на электроэнергетическом рынке может уменьшить риск ограничений потребителей электроэнергии. Эффективное применение резервных мощностей РИЭ в энергосистемах способствует укреплению энергетической безопасности. Развитие РИЭ способствует также и уменьшению транзитных потоков энергии, увеличивая темсамым возможности сетей по транспорту электроэнергии и снижая ее потери. Внедрение распределенных источников в регионе должно будет осуществлятьсяна следующих принципах: системность и комплексность, экологическая безопасность, социальная ориентированность, экономическая эффективность, энергетическая безопасность и надежность.

Несмотря на то, что в настоящее время масштабы применения РИЭ ограничены, вбудущем следует ожидать постепенного формирования самостоятельных децентрализованных энергосистем [4].

Факторы, препятствующие развитию распределённой энергетики региона

1.Отсутствие работающих экономических механизмов и мер, стимулирующих ее развитие.

2. Неприспособленность и нежелание структур российской электроэнергетики развивать децентрализованные энергетические установки.

3. Отсутствие механизмов тарифной поддержки распределенной генерации в сфере ЖКХ.

4. Сложность технологического присоединения генерирующих установок к единой сети.

5. Затруднённость в получении квот на природный газ для децентрализованных генерирующих установок.

Подводя итоги, можно сделать выводы:

1. В качестве приоритетных направлений развития распределенной энергетики в Республики Дагестан целесообразно использование местных видов топлива, в первую очередь: геотермальной энергетики и биомассы отходов АПК, применение энергии солнца.

Строительство такого комплекса перспективно на базе имеющегося хлебозавода, так как это дает организовать замкнутый цикл производства, и он должен быть опытно-показательным.

2. Большие потенциальные возможности и благоприятная государственная поддержка в использовании ТЭЦ, возобновляемых и нетрадиционных источников энергиипредопределяют расширение рыночной доли РИЭ в будущем развитии региональногоэнергетического комплекса. Однако необходимо, чтобы дальнейшие исследования и разработки были направлены на уменьшение стоимости распределенных источников энергии и улучшение их экологических показателей.

3. Следует приспосабливать оборудование РИЭ к текущим требованиям существующих энергосистем и создавать децентрализованные энергосистемы, работающиесовместно с централизованной энергосистемой, а также формировать локальные энергосистемы, которые будут проводить основное количество потребляемой в регионе электроэнергии и лишь небольшое ее количество станут получать от централизованных источников энергии. Применение распределенной генерации в ближайшем будущем неизбежно поэкономическим и экологическим соображениям, а также из-за необходимости обеспечитьнадежное и безопасное энергоснабжение экономического развития региона и страны.

С учетом процессов, происходящих в мировой экономике и энергетике, у России как одной из ведущих стран мира нет альтернативы распределенной энергетике. Развитие распределенной энергетики – это не только более высокая надежность энергоснабжениястраны, но и компонент ее энергетической и национальной безопасности.

Литература:

1. Круглый стол «Распределенная энергетика – надежность энергоснабжения, энергетическая и национальнаябезопасность России» / Санкт-Петербург, СПб ГПУ // 15.03.2011.
2. БПЦ Энергетические системы Успешные отраслевые решения задач автономного энергоснабжения. – Режим доступа: http://www.bpcgroup.ru/industry/energy/.2013.
3. Амадзиева Н.А., Потенциал и проблемы использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан и СКФО //Региональные проблемы преобразования экономики. 2015. № 3.
4. Баширова А.А. Механизмы регулирования природопользованием на региональном уровне с позиций поддержания эколого-экономического равновесия (на примере Северо-Кавказского федерального округа) // Региональные проблемы преобразования экономики. 2012. № 3. С. 354-362.

Секция 2. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

[1]Григорьев Б.А., [2]Герасимов А.А.,[2]Александров И.С.

[1]ФГБОУ ВОРоссийский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина;
Москва, Россия; 119991, Ленинский проспект, 65; e-mail: gba41@mail.ru
[2]ФГБОУ ВОКалининградский государственный технический университет;
Калининград, Россия; 236022, Советский проспект, 1; e-mail: alexandrov_kgrd@mail.ru

Предложена методика моделирования термодинамических свойств и фазовых равновесий для смесей низкокипящих рабочих агентов природного происхождения. В качестве объекта исследования выбрана система метан/н-пентан (R50 – R601). Методика базируется на фундаментальном уравнении состояния GERG-2004 и расчетных данных о фазовом равновесии, полученных методом групповых вкладов. На основе массива расчетных данных определены коэффициенты уравнения состояния. Проведено сравнение расчетного массива с уравнением состояния и построена фазовая диаграмма «давление-температура». Погрешность описания расчетного массива новым уравнением составляет 0,97%.

Введение. Потребление тепловой энергии, получаемой за счет сжигания углеводородных топлив, постоянно увеличивается. Однако значительная часть тепловой энергии используется крайне неэффективно, зачастую просто рассеивается в окружающей среде. В последние десятилетия большие усилия прилагаются для того, чтобы каким-либо образом утилизировать эту энергию. Эту теплоту можно применять для отопления, получения холода либо механической работы (например, в цикле Ренкина, Брайтона или Стирлинга). Наибольшее распространение получил цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами, в качестве которых обычно используются органические вещества с более низкой, чем у воды, температурой кипения.Одними из таких перспективных рабочих веществ являются хладагенты природного происхождения - углеводороды. Эти веществаобладают относительно хорошими термодинамическими и теплофизическими свойствами, не оказывают воздействия на озоновый слой и не создают парникового эффекта, нетоксичны, дешевы, смешиваются с минеральными маслами.

Для проведения расчетов упомянутых выше циклов и проектирования теплотехнического оборудования необходима точная информация о термодинамических свойствах и фазовых равновесиях применяемых рабочих веществ и их смесей. Основным и надежным источником сведений о свойствах веществ служит эксперимент. Однако в виду его дороговизны и трудоемкости это не всегда возможно. Одним из решений данной проблемы может стать развитие прогнозных методов расчета и моделирования указанных свойств. В данной работе предлагается методика определения коэффициентов уравнения состояния смеси низкокипящих рабочих агентов природного происхождения. В качестве компонентов исследуемой бинарной смеси выбраны метан (R50) и н-пентан (R601), которые широко используются в качестве рабочих тел.

1. Уравнение состояния смеси. В данной работе для описания свойств смеси R50 – R601 (метан/н-пентан) предлагается уравнение в виде зависимости приведенной свободной энергии Гельмгольца α от приведенной плотности δ, приведенной температуры τ и мольной доли компонентов x

$$\alpha(\delta,\tau,x)=\alpha^0(\rho,T,x)+\alpha^r(\delta,\tau,x) \quad (1)$$

где $\alpha(\delta,\tau,x)$ – свободная приведенная энергия Гельмгольца смеси; $\alpha^0(\rho,T,x)$ – идеальная часть энергии Гельмгольца; $\alpha^r(\delta,\tau,x)$ – избыточная часть энергии Гельмгольца; $\delta = \rho/\rho_r(x)$; $\tau = T_r(x)/T$; $\rho_r(x)$, $T_r(x)$ – параметры приведения (псевдокритические свойства), определяемые по правилу комбинирования, предложенному Кунцем и Вагнером [1]

$$\frac{1}{\rho_r(x)}=\sum_{i=1}^{N}x_i^2\frac{1}{\rho_{c,i}}+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}2x_ix_j\beta_{v,ij}\gamma_{v,ij}\frac{x_i+x_j}{\beta_{v,ij}^2x_i+x_j}\frac{1}{8}\left(\frac{1}{\rho_{c,i}^{1/3}}+\frac{1}{\rho_{c,j}^{1/3}}\right)^3 \quad (2)$$

$$T_r(x)=\sum_{i=1}^{N}x_i^2T_{c,i}+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}2x_ix_j\beta_{T,ij}\gamma_{T,ij}\frac{x_i+x_j}{\beta_{T,ij}^2x_i+x_j}\left(T_{c,i}\cdot T_{c,j}\right)^{0.5} \quad (3)$$

где $T_{c,i}$ и $\rho_{c,i}$ – критические свойства i-того компонента; x_i – мольная доля i-того компонента в смеси; β_v,, γ_v, β_T, γ_T – коэффициенты бинарного взаимодействия.

Идеальная часть определяется по соотношению

$$\alpha^0(\rho,T,x)=\sum_{i=1}^{N}x_i\left[\alpha_{0i}^0(\rho,T)+\ln x_i\right] \quad (4)$$

где $\alpha_{0i}{}^0(\rho,T)$ – идеальная часть энергии Гельмгольца i-того компонента.

Избыточная часть определяется по соотношению

$$\alpha^r(\delta,\tau,x)=\sum_{i=1}^{N}x_i\alpha_{0i}^r(\delta,\tau)+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}x_ix_jF_{ij}\alpha_{ij}^r(\delta,\tau) \quad (5)$$

где $\alpha_{0i}{}^r(\delta,\tau)$ – избыточная часть энергии Гельмгольцаi-того компонента; $\alpha_{ij}{}^r(\delta,\tau)$ – избыточная функция.

Избыточная функция в общем виде описывается соотношением

$$\alpha_{ij}^r(\delta,\tau)=\sum_{k=1}^{K_{pol,ij}}n_{ij,k}\delta^{d_{ij,k}}\tau^{t_{ij,k}} \quad (6)$$

Форма избыточной функции, а также коэффициенты и показатели степени принимались по [1] и представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты и показатели степени уравнения (6).

K	$d_{ij,k}$	$t_{ij,k}$	$n_{ij,k}$
1	1	1	$0{,}25574776844118\cdot10^{1}$
2	1	1,55	$-0{,}79846357136353\cdot10^{1}$
3	1	1,7	$0{,}47859131465806\cdot10^{1}$
4	2	0,25	-0,73265392369587
5	2	1,35	$0{,}13805471345312\cdot10^{1}$
6	3	0	0,283496034763650
7	3	1,25	-0,49087385940425
8	4	0	-0,10291888921447
9	4	0,7	0,118363146819680
10	4	5,4	$0{,}55527385721943\cdot10^{-4}$

Для расчета избыточной и идеальной части свободной энергии Гельмгольца компонентов использовались современные надежные уравнения состояния, описывающие с высокой точностью все термодинамические свойства в широком диапазоне температур и давлений. В частности, для расчета свойств метана использовалось уравнение Зецмана и Вагнера [2], а для н-пентана использовалось авторское уравнение состояния [3]. Критические свойства компонентов приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Критические свойства компонентов системы R50 – R601

Обозначение	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Критические свойства		
			T_c, К	p_c, кПа	ρ_c, моль/л
R50	CH_4	16,043	190,564	4599,2	10,139
R601	C_5H_{12}	72,149	469,6	3370	3,216

Для определения коэффициентов бинарного взаимодействия в соотношениях(2), (3) и (5) был получен массив расчетных данных о давлениях начала кипения и конденсации в широком диапазоне изменения составов для исследуемой смеси. Расчетная методика базируется на кубическом уравнении состояния PPR78 и методе групповых вкладов. Данное уравнение хорошо себя зарекомендовало и уже давно используется для расчета фазовых равновесий многокомпонентных углеводородных смесей [4]. Следует отметить, что PPR78 точно описывает фазовые равновесия, но имеет низкую точность расчета термодинамических свойств в однофазной области, особенно в жидкой фазе. Этот недостаток кубических уравнений хорошо известен. Поэтому авторами была выбрана модель GERG-2004, лишенная этих недостатков.

На основе массива расчетных данных, состоящего из 110 значений, были определены коэффициенты взаимодействия, входящие в выражения (2), (3) и (5). Поиск коэффициентов осуществлялся с помощью одной из модификаций метода эволюционной оптимизации [5], который позволяет находить минимум оптимизируемого функционала при достаточно ограниченном наборе экспериментальных данных. Значения коэффициентов бинарного взаимодействия приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Коэффициенты бинарного взаимодействия, входящие в соотношения (2), (3) и (5), определенные в данной работе

Коэффициент	β_v	γ_v	β_T	γ_T	F
Численное значение	1,1104	1,0593	0,96622	1,2482	0,86013

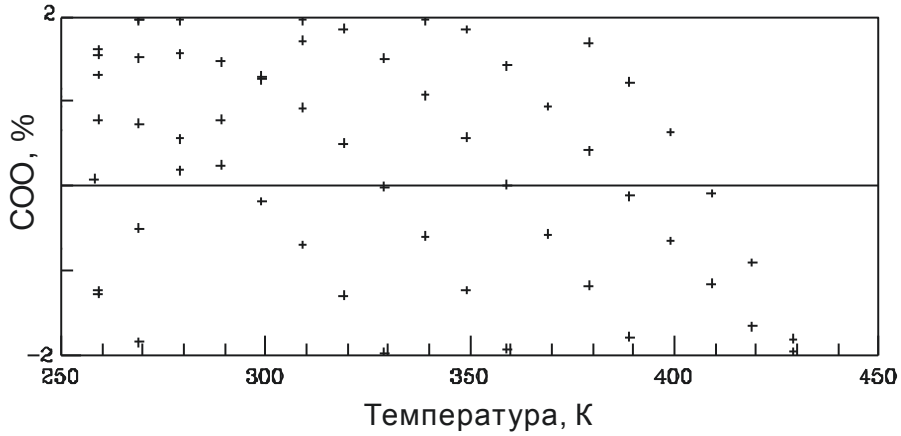


Рис. 1. Результаты сравнения расчетных данных по методике [4] с уравнением состояния (1)

Полученное уравнение состояния описывает расчетные данные со средней относительной погрешностью (СОО) в 0,97%. Кроме этого, на основе полученного уравнения была рассчитана диаграмма состояния «давление-температура» (рисунок 2). Из рисунка 2 видно, что предлагаемое уравнение физически верно передает поверхность состояния.

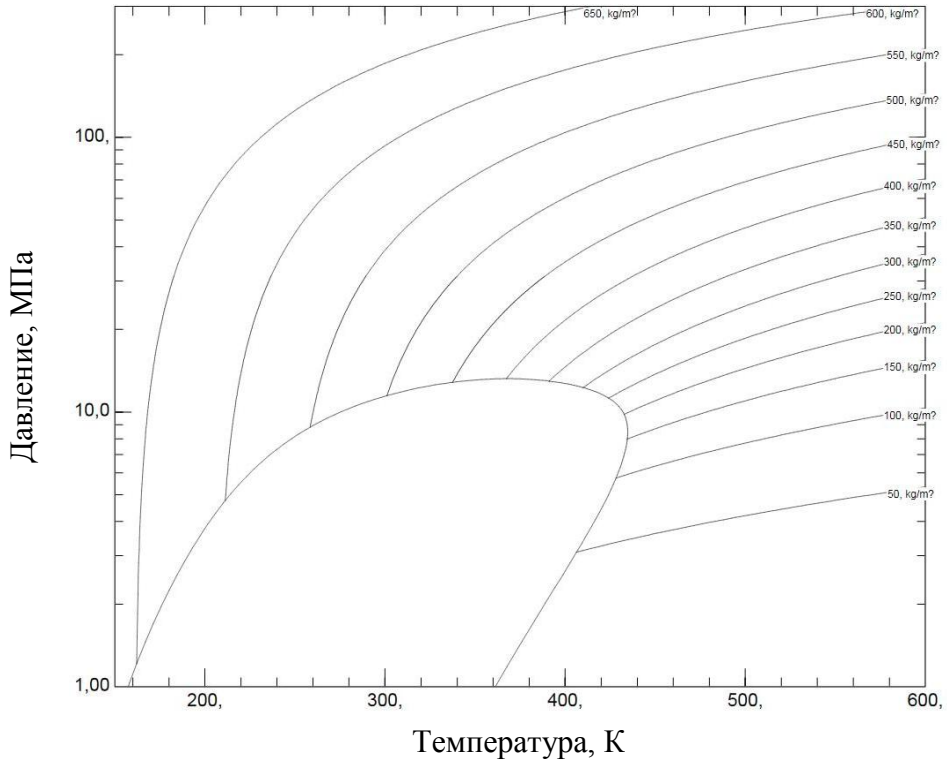


Рис. 2. Диаграмма «давление-температура» для эквимолярного состава смеси R50 – R601 (метан/н-пентан)

Заключение (выводы). Предложена методика определения коэффициентов уравнения состояния смеси метан-н-пентан. Методика базируется на методе групповых вкладов и фундаментальном уравнении состояния и может быть применена для моделирования термодинамических свойств и фазовых равновесий углеводородных смесей, для которых отсутствуют надежные данные о коэффициентах бинарного взаимодействия.

Литература:

1. The Gerg-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures / O.Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, M. Jaeschke. – Dusseldorf, 2007. – 535 p.
2. Setzmann, U. and Wagner, W. A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data, 20(6):1061-1151, 1991.
3. Александров И.С. Новое фундаментальное уравнение состояниянормального пентана/ И.С. Александров, А.А. Герасимов, Б.А. Григорьев // Вести газовой науки. Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов. - 2016. - № 4 (28). – С. 87-95.
4. Jaubert J.-N. VLE predictions with the Peng-Robinson equation of state and temperature dependent k_{ij}calculated through a group contribution method / J.-N. Jaubert, F. Mutelet // Fluid Phase Equilib. – 2004. – V.224. – P. 285-304.
5. Bell I. Automatic Fitting of Binary Interaction Parameters for Multi-fluid Helmholtz-Energy-Explicit Mixture Models / I. Bell, E.W. Lemmon //J. Chem. Eng. Data. – 2016.- Vol. 61, № 11. – P. 3752–3760.

УДК 622.276.2(571.5)

О ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КАЛОРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПЛАСТОВЫХ ВОД НА ОСНОВЕ *P,V,T* – ДАННЫХ

Бабаева С.Ш., Гусейнов А.Г.

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности.
Баку. Азербайджан
e-mail: avqust1955@mail.ru

Нами предлагается методика расчета термодинамических величин для концентрации по 18,11 г/л пластовой воды на основе только *P,V,T* – данных. Для этой цели воспользуемся термодинамическим уравнением в интегрально-дифференциальной форме [1-5]:

$$I(P_2T)-I(P_1T)=\int_{P_1}^{P_2}\left[V-T\left(\partial V/\partial T\right)_P\right]_T dP \qquad (1)$$

Чтобы решить это уравнение с целью вычисления ΔI, нами составлено следующее простое уравнение состояния для по концентрации 18,11 г/л пластовой воды:

$$V=a_0+a_1T/P+a_2T^2/P^2\ , \qquad (2)$$

где a_0, a_1, a_2 – постоянные при *T=const*. Эти коэффициенты вычисляются для каждой изотермы. Из уравнения (2) вычислим $\left(\partial V/\partial T\right)_P$:

$$\left(\partial V/\partial T\right)_P=a_1/P+2a_2T/P^2 \qquad (3)$$

После интегрирования (1) получаем следующее:

$$I(P_2T)-I(P_1T)=\Delta P\left[\left(a_0+a_1T/P+a_2T^2/P^2\right)-T\left(a_1/P+2a_2T/P^2\right)\right]=\Delta\left(a_0-a_2T^2/P^2\right), \qquad (4)$$

где $\Delta P=P_2-P_1$

Таблица 1

Значение коэффициентов a_0, a_1 и a_2

Температура, К	**Коэффициенты**		
	a_0	a_1	a_2
298,15	0,00095	1,006	-2079,3
323,15	0,000966	0,956	-2632,4
348,15	0,000983	0,902	-3240,2
373,15	0,001	0,857	-3414,7
398,15	0,0011008	0,805	-4392,8
423,15	0,001037	0,752	-4931,1
448,15	0,00105	0,69038	-5520,43

Таблица 2

Значение изменения энтальпии для 18,11 г/л пластовой воды

Температура, К	298,15	323,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15
ΔI, кДж/кг	113,38	218,03	322,23	426,62	531,93	638,17	745,95

Эти табличные данные можно выразить следующей эмпирической формулой:

$$\Delta I=0{,}0005T^2+2{,}49T-673{,}46 \text{ кДж/кг} \qquad (5)$$

Значения a_0 и a_2 определяем из термического уравнения состояния (2), а затем можно вычислить изменение энтальпии в зависимости от давления по изотермам. Известно, что начальное значение энтальпии условно принимают равное нулю, причем этот выбор произ-

волен, затем вычисляют изменение его значения в широкой области изменения параметров состояния. Таким образом, полученные значения изменения энтальпии при *ΔI(P,T)* позволяют вычислить значения изобарной теплоемкости по следующей термодинамической зависимости [1]:

$$C_p = \left[\partial(\Delta I/\partial T)\right]_P \qquad (6)$$

Как указано выше, согласно формуле (6) мы определяем значение энтальпии при *P=10МПа* и температуре *T*, то позволит нам вычислить изобарную теплоемкость C_P, также при различных температурах и давлении *P=10МПа*. Чтобы определить влияние различных значений давления на C_P мы воспользовались термодинамической зависимостью [1].

$$C_p(P_2T) - C_p(P_1T) = -T\int_{P_1}^{P_2}\left(\partial^2 V/\partial T^2\right)_P dP \qquad (7)$$

Составленное нами термическое уравнение состояния позволяет упростить уравнение (7). Для этой цели представим себе, что зависимость *V=φ(T)* при *P=const* хорошо описывается уравнением:

$$V = C_0 + C_1T + C_2T^2 \qquad (8)$$

Определим значение $\left(\partial^2 V/\partial T^2\right)$ из этого уравнения:

$$\left(\partial^2 V/\partial T^2\right)_P = 2C_2T \qquad (9)$$

Тогда уравнение (7) примет вид:

$$C_p(P_2T) - C_p(P_1T) = -2C_2T \qquad (10)$$

Итак, с помощью уравнения (6) мы можем вычислить значения $C_p(P_1T)=C_p(10МПа,T)$. Тогда, зависимость (10) будет иметь следующую форму. Тогда зависимость (10) будет иметь следующую форму:

$$C_p(P_2T)=C_p(10МПа,T)-2C_2T \qquad (11)$$

С помощью уравнения (8) определяем значения C_2 для каждой изобары и вычисляем величины изобарной теплоемкости пластовой воды (конц. 18,11 г/л).

Таблица 3

Значения изобарной теплоемкости C_p для пластовой воды при концентрации 18,11 г/л

***T*,K**	***P*₁, МПа**					
	0,1	10,0	15,618	25,327	30,141	39,256
298,15	4,1790	4,1556	4,1388	4,1146	4,1032	4,0827
348,15	4,1921	4,1718	4,1610	4,1434	4,1349	4,1168
398,15	4,2511	4,2268	4,2141	4,1908	4,1801	4,1639
448,15	4,5854	4,3485	4,3289	4,2958	4,2811	4,2565

При наличии изобарной теплоемкости C_p можно вычислить величину изохорной теплоемкости C_v по следующей зависимости [1]:

$$C_p - C_v = \alpha_P^2 TV/\beta_T \qquad (12)$$

где $\alpha_P = 1/V\left(\partial V/\partial T\right)_P$ - коэффициент изобарного расширения жидкости; $\beta_P = -1/V\left(\partial V/\partial P\right)_T$ - изотермическая сжимаемость жидкости.

Значения α_P и β_T можно определить из термического уравнения состояния (2). Из этого же уравнения получим:

$$\left.\begin{aligned}\left(\partial V/\partial T\right)_P &= a_1/P + 2a_2T/P^2 = 1/P\left(a_1 + 2a_2\,T/P\right)\\ \left(\partial V/\partial T\right)_T &= -\left(a_1T/P^2 + 2a_2T^2/P^3\right) = -T/P^2\left(a_1 + 2a_2\,T/P\right)\end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Вычислим значения α_P и β_T с учетом с учетом производных $(\partial V/\partial T)_P$ и $(\partial V/\partial T)_T$:

$$\alpha_P = 1/V(\partial V/\partial T)_P = 1/VP(a_1 + 2a_2 T/P) \quad (14)$$

$$\beta_T = -1/V(\partial V/\partial P)_T = -T/VP^2(a_1 + 2a_2 T/P) \quad (15)$$

Разделив (15) на (14) получим следующее:

$$\alpha_P/\beta_T = P/T, \qquad \alpha_P = P\beta_T/T \quad (16)$$

Если учесть значение α_P из соотношения (12), то получим:

$$C_p - C_v = \alpha_P PV = 1/VP(a_1 + 2a_2 T/P)PV \quad (17)$$

$$C_p - C_v = -(a_1 + 2a_2 T/P) \quad (18)$$

Таблица 4

Значение изохорной теплоемкости C_v для пластовой воды при концентрации 18,11 г/л

***T*, К**	***P*, МПа**					
	0,1	10,0	15,618	25,327	30,141	39,256
298,15	4,1349	4,1074	4,0875	4,0583	4,0443	4,0190
348,15	3,8980	3,8794	3,8694	3,8528	3,8448	3,8273
398,15	3,6410	3,6297	3,6210	3,6121	3,6066	3,5982
448,15	3,4152	3,4083	3,4045	3,3976	3,3944	3,3850

Отметим, что коэффициенты этого уравнения a_1 и a_2 определяются на основании уравнения (2). Тогда:

$$C_p - C_v = -\alpha_P VP \quad (19)$$

Из уравнения (19) получим:

$$C_v = C_p - \alpha_P VP \quad (20)$$

Таким образом, определив значения C_p и C_v мы можем вычислить отношение C_p/C_v для расчета скорости распространения звука C.

Для этой цели можно использовать термодинамическую формулу:

$$C = \sqrt{-V^2(\partial V/\partial T)_S} \quad (21)$$

Известно, что $(\partial V/\partial T)_S = C_p/C_v(\partial V/\partial P)_T$, тогда с учетом $\beta_T = -1/V(\partial V/\partial P)_T$, то из (21) получим:

$$C = (\partial V/\partial T)_S = \sqrt{-V^2 C_p/C_v(\partial V/\partial P)_T} = \sqrt{V C_p/C_v\beta_T} \quad (22)$$

Этим уравнением можно рассчитать скорость распространения звука пластовой воды при 18,11 г/л.

Таблица 5

Значения C_p/C_v и C для пластовой воды при концентрации 18,11 г/л

***T*, К**	***P*, МПа**	C_p/C_v	C_p/C_v
298,15	0,1	1,0107	-
	10,0	1,0117	1512,0
	15,618	1,0126	1522,7
	25,327	1,0139	1538,9
	30,141	1,0146	1546,9
	39,256	1,0159	1562,1
348,15	0,1	1,0754	1556,1
	10,0	1,0754	1574,6
	15,618	1,0754	1584,7
	25,327	1,0754	1601,5
	30,141	1,0756	1609,8
	39,256	1,0757	1628,1

398,15	0,1	1,1676	1513,4
	10,0	1,1645	1535,7
	15,618	1,1690	1547,8
	25,327	1,1602	1570,4
	30,141	1,1590	1581,1
	39,256	1,1572	1597,5
448,15	0,1	1,2841	1405,7
	10,0	1,2759	1443,5
	15,618	1,2715	1449,0
	25,327	1,2644	1475,9
	30,141	1,2612	1488,3
	39,256	1,2530	1509,6

Заключение

С помощью термодинамического уравнения на основе *P-V-T* данных были определены калорические свойства (изменение энтальпии, изобарная, изохорная теплоемкости и скорость распространения звука пластовой воды при выше указанных параметрах.

Литература:

1. Х.И.Амирханов, Г.В.Степанов, Б.Г.Алибеков. Изохорная теплоемкость воды и водяного пара. Академия Наук СССР Дагестанский Филиал. Махачкала. 1969.
2. В.А.Кириллин, В.В.Сычев, А.Е.Шейдлин. Техническая термодинамика. М. Энергия. 1974.
3. В.И.Дворянчиков. Термодинамические свойства и фазовые равновесия водных растворов электролитов. Махачкала. 201 с.
4. А.Г.Гусейнов. Экспериментальное исследование плотности и упругости паров пластовых вод. Мониторинг наука и технологии. Махачкала. 2016. №4(29).
5. А.Г.Гусейнов, А.Н.Шахвердиев. Экспериментальное исследование плотности и упругости паров высокоминерализованных природных пластовых вод. Вести газовой науки. Москва. 2016. №4(28).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОСТАВОВ ТРОЙНЫХ СИСТЕМ NaCl-$NaVO_3$-$Na_2ЭO_4$ (где Э – Mo, W)

И.К. Гаркушин[1], Т.В. Губанова[1], А.В. Буланова[2], Н.С. Кравец[2]

[1] Самарский государственный технический университет
E-mail: lecome@yandex.ru
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
[2] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: kuro169tengu@gmail.com
Россия, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34

С использованием известного экспериментального метода определены удельные энтальпии плавления, рассчитаны удельные энтальпии и энтропии плавления, удельные теплоемкости и плотности для двойной системы метаванадат, вольфрамат натрия и двух трехкомпонентных систем из хлорида, метаванадата, молибдата и вольфрамата натрия.

Расплавы содержащие галогениды, метаванадаты и соли кислородсодержащих кислот состава $H_2ЭO_4$ (где Э – Mo, W) s^1-элементов находят широкое применение в разных областях науки и техники в качестве функциональных материалов. Для определения области, в кото-

рой можно использовать данный состав, необходимо провести оценку его физико-химических свойств.

Для нонвариантных составов двухкомпонентной $NaVO_3$-Na_2WO_4 и двух трехкомпонентных систем NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4 и NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4 экспериментально определили удельную энтальпию плавления и рассчитали, используя метод аддитивности, некоторые физико-химические свойства.

Существует множество способов расчета физико-химических свойств эвтектических составов [2-4]. Наиболее распространенным является метод аддитивности [3]. В работе приведен расчет мольной и удельной энтальпии плавления ($\Delta_m H$), энтропии плавления ($\Delta_m S$), теплоемкости (C_p) и плотности (ρ) эвтектических составов. Исходные данные по индивидуальным веществам взяты из [1]. Авторы экспериментально установили составы сплавов эвтектического типа плавления (табл. 1).

Таблица 1

Термодинамические характеристики исходных солей и эвтектические составы двухкомпонентной системы $NaVO_3$-Na_2WO_4 и трехкомпонентных систем NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4 и NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4

Вещество	*M*, г/моль	$\Delta_m H_{мол}$, кДж/моль	ρ, кг/м^3	$C_{p,моль}$, Дж/моль·К	*x*, мол.доли				
					$NaVO_3$- Na_2WO_4	NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4		NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4	
					e	E_1	E_2	E_1	E_2
NaCl	58.4	28168	2.165	50.5	-	0.24	0.095	0.234	0.144
$NaVO_3$	121.9	28324	5.15	97.6	0.7	0,66	0,56	0.715	0.68
Na_2MoO_4	205.9	22426	3.28	141.7	-	0.1	0.345	-	-
Na_2WO_4	293.8	31381	4.18	139.8	0.3	-	-	0.051	0.176

Мольную и *удельную энтальпии плавления* эвтектических составов рассчитали по формулам (1) и (2):

$$\Delta_m H_{уд}(E)=\sum \omega_i \cdot \Delta_m H_{уд,i}, \quad (1)$$

$$\Delta_m H_{E,мол}(E)=\sum x_i \cdot \Delta_m H_{мол,i}, \quad (2)$$

где $\Delta_m H_{уд}(E)$ – удельная энтальпия плавления эвтектического состава, Дж/г; $\Delta_m H_{мол}(E)$ – мольная энтальпия плавления эвтектического состава, Дж/моль; $\Delta_m H_{уд,i}$ – удельная энтальпия плавления компонента, Дж/г; $\Delta_m H_{мол,i}$ – мольная энтальпия плавления компонента, Дж/моль; ω_i – массовая доля *i*-го компонента; x_i – мольная дола *i*-го компонента.

Мольную и *удельную энтропии плавления* эвтектических составов определили, используя (3) и (4):

$$\Delta_m S_{уд}(E)=\sum \omega_i \cdot \Delta_m S_{уд,i}, \quad (3)$$

$$\Delta_m S_{E,мол}(E)=\sum x_i \cdot \Delta_m S_{мол,i}, \quad (4)$$

где $\Delta_m S_{уд}(E)$ – удельная энтропия эвтектического состава, Дж/г·К; $\Delta_m S_{мол}(E)$ – мольная энтропия эвтектического состава, Дж/моль·К; $\Delta_m S_{уд,i}$ – удельная энтропия *i*-го компонента, Дж/г·К; $\Delta_m S_{мол,i}$ – мольная энтропия *i*-го компонента, Дж/моль·К; ω_i – массовая доля *i*- го компонента; x_i – мольная дола *i*-го компонента.

Расчет *удельной энтальпии плавления* провели по формуле (5), зная удельную энтропию плавления и температуру плавления эвтектики:

$$\Delta_m H_{уд,расч}(E)=\Delta_m S_{уд}(E)\cdot T_E, \quad (5)$$

где $\Delta_m H_{уд,расч}(E)$– удельная энтальпия плавления эвтектического состава, Дж/г; $\Delta_m S_{E,уд}$ – удельная энтропия эвтектического состава, Дж/г·К; T_E – температура плавления эвтектического состава, К.

Плотность эвтектических составов определили по формуле (6):

$$\rho_E=\sum \omega_i\cdot\rho_i \ , \quad (6)$$

где ρ_E – плотность эвтектического состава при 20°С, кг/м^3; ω_i – мольная дола *i*-го компонента; ρ_i – плотность *i*-го компонента, кг/м^3.

Расчет *мольной* и *удельной теплоемкостей* эвтектических составов провели по формулам (7) и (8):

$$C_{p\,E,уд}=\sum \omega_i\cdot C_{p\,уд,i} \ , \quad (7)$$

$$C_{p\,E,мол}=\sum x_i\cdot C_{p\,мол,i} \ , \quad (8)$$

где $C_{p\,E,уд}$ – удельная теплоемкость эвтектического состава, Дж/г·К; $C_{p\,E,мол}$ – мольная теплоемкость эвтектического состава, Дж/моль·К; $C_{p\,уд,i}$ – удельная теплоемкость *i*-го компонента, Дж/г·К; $C_{p\,мол,i}$ – мольная теплоемкость *i*-го компонента, Дж/моль·К; ω_i – массовая доля *i*- го компонента; x_i – мольная дола *i*-го компонента.

Молярную массу сплава рассчитывали по формуле (9):

$$M_{спл}=\sum x_i\cdot M_i \ , \quad (9)$$

где $M_{спл}$ – молярная масса сплава, г/моль; M_i – молярная масса *i*-го компонента, г/моль; x_i – мольная дола *i*-го компонента.

Мольную теплоемкость рассчитали по формуле (10), используя значение удельной теплоемкости и массы сплава:

$$C_{p\,E,мол} = M_{спл}\cdot C_{p\,E,уд} \ , \quad (10)$$

где $M_{спл}$ – молярная масса сплава, г/моль; $C_{p\,E,уд}$ - удельная теплоемкость эвтектического состава, Дж/г·К; $C_{p\,E,мол}$ – мольная теплоемкость эвтектического состава, Дж/моль·К.

Результаты расчетов основных термодинамических свойств нонвариантных составов представлены в табл. 2. Эти данные являются исходной информацией для рекомендаций использования этих составов в качестве функциональных материалов различного назначения.

Таблица 2

Характеристики эвтектик в исследованных системах, рассчитанные по правилу аддитивности

Точка	$t_{пл}$, °С	$\Delta_m H_{уд}$, Дж/г	$\Delta_m H_{мол}$, Дж/моль	$\Delta_m S_{уд}$, Дж/г·К	$\Delta_m S_{мол}$, Дж/моль·К	$\Delta_m H_{уд,расч}$, Дж/г	$\rho_{уд}$, кг/м^3	$C_{р,уд}$, Дж/г·К	$C_{р,мол}$, Дж/моль·К	$M_{спл}$, г/моль	$C_р$, Дж/г г·К
e	552	168	29241	0.183	32	151	4655	0.636	110	173.5	110
E_1	568	241	25678	0.255	29	245	4450	0.79	91	115	91
E_2	530	181.6	26416.6	0.357	28	322	4117	0.75	107	145	109
E_3	560	246	28443	0.261	30	217.6	4660	0.766	89	116	89
E_4	540	201	28839	0.215	31	174	4570	0.687	98	143	98

Расчетные методы не всегда позволяют с высокой точностью определять значения удельных энтальпий плавления, поэтому востребованными остаются экспериментальные методы.

Экспериментальный метод определения удельной энтальпии плавления основан на сравнении термодинамических свойств исследуемого образца и эталонного вещества. Изменения температуры образца обусловлены фазовыми переходами или химическими реакциями, связанными с изменениями энтальпии, в частности, энтальпий плавления. Изменения зависят от природы образца и эталона, скорости нагревания, положения горячих спаев термопары в веществе, степени измельченности и т.д. [5-7].

В работе для экспериментального определения удельной энтальпии плавления использовали методику, описанную [3]. Снимали 3 кривых охлаждения и нагревания исследуемого эвтектического состава и эталонного вещества. Площади пиков дифференциальных кривых ДТА ограничивали в соответствии с рекомендациями Международного комитета по стандартизации в термическом анализе [8]. Расчет удельной энтальпии плавления состава проводили по формуле (16):

$$\Delta_m H_e = \Delta_m H_{эт} \cdot \frac{S_e}{S_{эт}} \cdot \frac{T_e}{T_{эт}}, \text{ Дж/г}, \qquad (16)$$

где $\Delta_m H_{эт}$– удельная энтальпия фазового перехода эталонного вещества, близкого по температуре фазового перехода к исследуемому составу, Дж/г; S_e, $S_{эт.}$ – площади пиков дифференциальных кривых, отвечающие плавлению эвтектического состава и фазовому переходу эталонного вещества соответственно; T_e, $T_{эт.}$ – температуры плавления эвтектического состава и фазового перехода эталонного вещества соответственно, К.

Окончательное значение энтальпии находили как среднее трех измерений. Точность определения удельных энтальпий плавления составляет ±5 %. В качестве эталона был выбран бромид лития с температурой плавления 552°С.

Данные о характере плавления, температурах плавления и составе нонвариантных точек в двухкомпонентной системе $NaVO_3$-Na_2WO_4 и трехкомпонентных системах NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4 и NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики эвтектик в двойной системе $NaVO_3$-Na_2WO_4 и тройных системах NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4 и NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4 с удельной энтальпией плавления

Характер точек	Содержание компонентов, мол. %				$t_{пл}$, °С	$\Delta_m H_{уд}$, кДж/кг	$\Delta_m H_{уд\ расч}$, кДж/кг
	NaCl	$NaVO_3$	Na_2MoO_4	Na_2WO_4			
e	-	70	-	30	552	199	151
E_1	24	66	10	-	568	268	245
E_2	9.5	56	34.5	-	530	240.6	322
E_3	23.4	71.5	-	5.1	560	290	217.6
E_4	14.4	68	-	17.6	540	166	174

Выявленные низкоплавкие составы систем $NaVO_3$-Na_2WO_4, NaCl-$NaVO_3$-Na_2MoO_4 и NaCl-$NaVO_3$-Na_2WO_4 с температурами плавления 552°С, 568°С, 530°С, 560°С и 540°С соответственно и энтальпиями плавления 199 кДж/кг, 268 кДж/кг, 225.5 кДж/кг 290 кДж/кг и 166 кДж/кг соответственно могут послужить основой для рекомендации к использованию в качестве фазопереходных функциональных материалов в среднетемпературных химических источниках тока.

Литература:

1. Глушко В.П. Термические константы веществ / Ресурс интернет: - http://www.chem.msu.ru/cgi-bin/tkv.pl?show=welcome.html/welcome.html
2. К.П. Мищенко, А.А. Равделя Краткий справочник физико-химических величин. - Л.: Химия, издание 7, 1974. - С. 200.
3. Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г. Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. – М.: Химия, 1984. – С. 99.

4. Lumsden J. Thermodynamics of molten salt mixture. L. – N.Y.: Acad. Press, 1969. – 351 p.
5. Wittels M.-J. The American Mineralogist. - New-York, 1951. - Vol. 36. - P. 615-619.
6. Берг Л.Г., Аносов В.Я. Практическое руководство по термографии. – Казань: Изд-во Казанск. госуд. университета, 1976. – 222 с.
7. Попов М.М. Термометрия и калориметрия. – М.: Изд-во МГУ, 1954. – 942 с
8. Егунов В.П. Введение в термический анализ: монография. – Самара, 1996. – 270 с.
9. Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я. Основы физико-химического анализа. – 1956. – 504 с.
10. Гаркушин И.К., Губанова Т.В., Петров А.С., Анипченко Б.В. Фазовые равновесия в системах с участием метаванадатов некоторых щелочных металлов. - М.: Машиностроение-1, 2005. - 118 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПЕРИОДИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Бородулин В.Ю., Низовцев М.И.

ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН;
Новосибирск, Россия; 630090, пр-т ак. Лаврентьева, 1; e-mail: v_u_b@mail.ru

Разработана физико-математическая модель регенеративного теплообменника с периодическим изменением направления воздушного потока. Модель учитывает фазовые превращения, которые могут происходить, как на стенках теплообменной матрицы, так и непосредственно в воздушном потоке. Проведён анализ влияния обобщенных параметров на эффективность работы теплообменника. Такой подход позволил значительно упростить исследование процессов при большом количестве параметров. Рассмотрено влияния температуры воздуха и влажности на эффективность теплообменника.

Введение. Улучшение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций и повышение их герметичности предъявляет возрастающие требования к системам отопления и вентиляции [1]. Срок эксплуатации жилого зданий обычно составляет десятки лет, поэтому уже на стадии проектирования в его конструкции и инженерном оборудовании необходимо предусматривать применение энергосберегающих технологий для снижения эксплуатационных затрат [2-4]. За последние десять лет глобальное энергопотребление возросло на 17.8 % [5], около 40% в этом повышении относится к строительному сектору [6]. При этом эмиссия диоксида углерода за счет строительного сектора в индустриальных странах оценивается в 50% [7,8]. В развивающихся странах этот показатель еще выше. Для снижения выбросов диоксида углерода в большинстве стран мира разрабатывают и внедряют новые стандарты и технологии [9].

Опыт эксплуатации многоквартирных и малоэтажных жилых зданий показывает, что энергозатраты на нагрев и охлаждение вентиляционного воздуха достигают до 50 % от общих энергозатрат [2,3,4]. Несмотря на значительное энергопотребление, на кондиционирование вентиляционного воздуха для жилых зданий, которое оцениваются примерно в 35–40 kWh/m^2 в год, до 90% этой энергии может быть сохранено благодаря использованию регенеративных и рекуперативных теплообменников [9,10]. В настоящее время системы вентиляции широко используются совместно с системами регенерации и рекуперации тепла. В таких системах для этого применяется теплообменники различных типов.

Перспективную группу теплообменников представляют воздухо-воздушные теплообменники с периодическим изменением направления воздушного потока. В качестве рабочего

тела в них применяются либо различного рода засыпки [11,12], либо матрицы с регулярными мини-каналами [13–15]. Эти устройства компактны, они не требуют значительных затрат электрической энергии. Их можно использовать для энергосберегающей вентиляции даже отдельных комнат в многоквартирных жилых зданиях.

В холодных климатических условиях важно иметь средства противодействия обмерзанию теплообменников. В теплообменниках, в которых теплообмен сопровождается интенсивным массообменом, формирование льда наблюдается при более низких температурах, чем в обычных [16,17]. Несмотря на значительное внимание к вопросам конденсации влаги и льдообразования в рекуперативных и регенеративных воздухо-воздушных теплообменниках, эти проблемы по-прежнему остаются актуальными и мало изученными. В частности, практически нет работ по исследованию влияния температуры уличного и внутреннего воздуха и влажности потоков на явную и влажностную эффективность регенеративных теплообменников. Особенность таких теплообменников заключается в том, что их эффективность сложным образом зависит от большого количества определяющих параметров. В настоящей работе определён ряд обобщающих комплексов, которые определяют эффективность работы регенеративного теплообменника с периодическим изменением направления воздушного потока, как без учета, так и с учетом влажности воздуха. Разработана модель, учитывающая фазовые превращения, которые могут происходить, как на стенках теплообменной матрицы, так и непосредственно в воздушном потоке. Обобщение результатов достигается за счет выявления определяющих безразмерных комплексов в системе уравнений. Анализ в терминах обобщенных параметров имеет то преимущество, что позволяет значительно упростить исследование процессов при большом количестве параметров.

1. Модель регенеративного теплообменника. Рассмотрим физико-математическую модель, описывающую тепло-влажностные процессы при работе регенеративного теплообменника с периодическим изменением направления воздушного потока. Теплообменник используется для утилизации тепла или холода вентиляционного воздуха. Реверсивный вентилятор создает воздушный поток с периодическим изменением его направления течения через тепообменную матрицу. Матрица представляет собой набор одинаковых сквозных каналов. Каналы периодически продувается с противоположных сторон воздушными потоками с разной температурой и влажностью.

При моделировании из теплообменной матрицы выделяем одиночный теплообменный канал. Обмен тепловой энергией между воздушным потоком и матрицей происходит через поверхность стенок канала. Поперечные размеры канала малы и длины участков аэродинамической и тепловой стабилизации существенно меньше длины канала, поэтому считается, что теплообмен в канале соответствует теплообмену полностью развитого течения. В общем случае поток в канале может представлять собой течение смеси воздуха, пара и частиц тумана (сконденсировавшихся капелек воды). Предполагается также, что частицы тумана полностью вовлечены в движение воздушным потоком, проскальзывания между фазами нет. При этом допускается, что между компонентами потока установилось локальное термодинамическое равновесие. Поверхность стенок канала и воздушный поток имеют разные температуры. Конденсация и испарение влаги может происходить, как на стенках канала, так и в потоке. Водяной пар из воздушного потока может конденсироваться на стенках канала, образуя водяную пленку. Помимо этого, пар может конденсироваться непосредственно в потоке в виде тумана. При испарении наоборот, влага с поверхности стенок канала и с частичек тумана будет испаряться в воздушный поток, насыщая его паром. При моделировании фазовых превращений внутри воздушного потока предполагается, что пар, охлаждённый ниже температуры точки росы, моментально конденсируется и превращается в частички тумана. При повышении температуры внутри потока испарение тоже происходит мгновенно. При моделировании массообмена на стенках канала принимается аналогия между конвективными теплообменом и массообменом.

Рассмотрим тепло- и массообмен в одиночном канале теплообменной матрицы. Для анализа процессов при описанных выше условиях была разработана ранее физико-математическая модель расчета [15]. Система уравнений этой модели имеет следующий вид:

$$\left(c^m+\eta c^w\right)\frac{\partial t_m}{\partial \tau}=\frac{\lambda_m}{\rho_m}\cdot\frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2}+\frac{\alpha\Pi}{\rho_m S_m}\cdot\left(t_a-t_m\right)+r\frac{\partial \eta}{\partial \tau}+c^w\cdot\left(t_a-t_m\right)\frac{\partial \eta}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\left(c_p^a+\omega c_p^v+fc^w\right)\cdot\frac{\partial t_a}{d\tau}+\left(c_p^a+\omega c_p^v+fc^w\right)u\cdot\frac{\partial t_a}{\partial x}=\frac{\alpha\Pi}{\rho_a S}\cdot\left(t_m-t_a\right)+r\frac{df}{d\tau}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau}=\frac{\beta\cdot\Pi}{\rho_m S_m}\cdot\left(\omega-\omega_S^m\right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau}+u\frac{\partial \omega}{\partial x}+\frac{\beta\cdot\Pi}{\rho_a S}\cdot\left(\omega-\omega_S^m\right)+u(\tau)\cdot\left(\omega-\omega_S^a\right)\cdot\delta(x-\xi)=0, \quad (4)$$

$$\omega_S(t)=0.622\frac{Ps(t)}{P_B-P_S(t)}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \tau}+u\frac{\partial f}{\partial x}-u(\tau)\cdot\left(\omega-\omega_S^a\right)\cdot\delta(x-\xi)=0, \quad (6)$$

где τ – время, x – пространственная координата, t_m –температура матрицы, t_a – температура воздуха, u – скорость потока, ρ_a – плотность воздуха, ρ_m – плотность материала матрицы, λ_m, c^m– коэффициент теплопроводности материала матрицы и его теплоемкость, S – площадь сечения канала, S_m – площадь поперечного сечения стенок канала, Π – периметр канала, β – коэффициент массоотдачи, ω – текущее значение влагосодержания воздуха, ω_S^m – влагосодержание насыщения при температуре стенки матрицы, ω_S^a – влагосодержание насыщения при температуре воздушного потока, r – удельная теплота парообразования, α – коэффициент теплоотдачи, $P_S(t)$ – парциальное давление насыщенного пара при температуре t, P_B – барометрическое давление, c_p^a, c_p^v и c^w–теплоёмкости воздуха, водяного пара и воды; $\delta(x)$ – дельта-функция. Количество конденсата на стенках канала характеризуется массовой долей влаги $\eta(\tau,x)$ по отношению к массе материала канала. Массовая доля частиц тумана в потоке обозначена f.

Уравнение (1) отражает совместный баланс тепловой энергии матрицы и конденсата в ней. Сохранение тепловой энергии в потоке увлажнённого воздуха описывается уравнением (2). Уравнения (3) и (4) выражают соответственно сохранение массы конденсата на стенках канала и влагосодержания в потоке. Уравнение (5) даёт связь между давлением насыщения и влагосодержанием, а (6) моделирует перенос влаги в виде частиц тумана.

Система уравнений (1 – 6) дополняется начальными и граничными условиями:

$$\omega(\tau,x)\big|_{x=0}=\omega_{11} \text{ или } \omega(\tau,x)\big|_{x=L}=\omega_{21}. \quad (7)$$

$$t_a(\tau,x)\big|_{x=0}=t_{11} \text{ или } t_a(\tau,x)\big|_{x=L}=t_{21}, \quad (8)$$

$$f(\tau,x)\big|_{x=0}=0,\ f(\tau,x)\big|_{x=L}=0. \quad (9)$$

$$\left.\frac{\partial t_m}{\partial x}\right|_{x=0}=\left.\frac{\partial t_m}{\partial x}\right|_{x=L}=0. \quad (10)$$

$$\eta(0,x)=\eta_0(x),\ \omega(0,x)=\omega_0(x),\ f(0,x)=f_0(x). \quad (11)$$

Здесь ω_{11}, ω_{21}– влагосодержание внутреннего и наружного воздуха, t_{11}, t_{21}– температуры внутреннего и наружного воздуха. Функции, которые задают начальные распределения внутри канала конденсата, пара в потоке и частиц тумана для определённости запишем: $\eta_0(x)=0$, $f_0(x)=0$,

$$\omega_0(x)=\omega_{11}+\frac{\omega_{21}-\omega_{11}}{L}\cdot x. \quad (12)$$

Начальные распределения температуры воздуха и поверхности стенок канала матрицы также для определённости зададим:

$$t_m(0,x) = t_a(0,x) = t_{11} + \frac{t_{21} - t_{11}}{L} \cdot x\,. \tag{13}$$

Обобщённый анализ решений системы уравнений (1–6) можно провести, если рассмотреть влияние безразмерных комплексов задачи. Для этого определим характерные масштабы задачи и преобразуем систему уравнений к безразмерному виду. Выразим теперь температуру воздуха и матрицы в безразмерном виде:

$$\theta = \frac{t_a - t_{21}}{t_{11} - t_{21}},\ \xi = \frac{t_m - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}\,. \tag{14}$$

Нормировка температуры проведена на температурный напор, т.е. на разницу температур внутреннего и наружного воздуха. Безразмерное влагосодержание воздуха запишем в виде аналогичном (14):

$$\varpi = \frac{\omega - \omega_{21}}{\omega_{11} - \omega_{21}}\,.$$

Пространственные размеры удобно масштабировать, используя длину канала *L*:

$$\bar{x} = \frac{x}{L},$$

где $\bar{x}$ –безразмерная координата. Скорость потока нормирована на её максимальное значение u_{max} и, следовательно, $u = u_{\max} \cdot \bar{u}$. Здесь $\bar{u}$ – безразмерная скорость потока, являющейся функцией времени. В качестве масштаба времени τ_0 выбрано время, за которое воздушный поток со скоростью u_{max} преодолеет канал длиной *L*:

$$\tau_0 = L / u_{\max}\,.$$

В результате подстановки в систему уравнений (1 – 6) безразмерных переменных получим систему уравнений в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \varpi}{\partial \bar{\tau}} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \varpi}{\partial \bar{x}} + \mathrm{NTU}_m \cdot \left(\varpi - \varpi_S^m\right) + \bar{u} \cdot \left(\varpi - \varpi_S^a\right) \cdot \delta\left(\bar{x} - \varsigma\right) = 0, \tag{15}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \bar{\tau}} = \mathrm{NTU}_m \cdot \left(\omega_{11} - \omega_{21}\right) \cdot \left(\frac{\rho_a S}{\rho_m S_m}\right) \cdot \left(\varpi - \varpi_S^m\right), \tag{16}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{\tau}} + \bar{u} \cdot \frac{\partial f}{\partial \bar{x}} = \left(\omega_{11} - \omega_{21}\right) \cdot \bar{u} \cdot \left(\varpi - \varpi_S^a\right) \cdot \delta\left(\bar{x} - \varsigma\right), \tag{17}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{\tau}} + \bar{u} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = \psi \cdot \left(\mathrm{NTU} \cdot \left(\xi - \theta\right) + K \cdot \left(\frac{c^w}{c_p^a}\right) \cdot \left(\frac{df}{d\bar{\tau}}\right) \right), \tag{18}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial \bar{\tau}} = \left(\frac{\chi_m}{\chi_a}\right) \frac{1}{\mathrm{Pe}} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\left(1 + \eta \dfrac{c^w}{c^m}\right)} \left(\mathrm{NTU} \cdot \left(\frac{\rho_a c_p^a S}{\rho_m c_m S_m}\right) \cdot \left(\theta - \xi\right) + \left(K + \theta - \xi\right) \cdot \left(\frac{c^w}{c^m}\right) \frac{\partial \eta}{\partial \bar{\tau}} \right). \tag{19}$$

В системе уравнений (15–19) приняты следующие дополнительные обозначения:
χ_a *и* χ_m – температуропроводность воздуха и материала матрицы,

$$\psi = \left(1 + \omega \frac{c_p^v}{c_p^a} + f \frac{c^w}{c_p^a}\right)^{-1},$$

где $\omega = \omega_{21} + \varpi \cdot \left(\omega_{11} - \omega_{21}\right)$. Также в уравнении (19) появились безразмерные комплексы Пекле Pe и Кутателадзе K:

$$\mathrm{Pe} = u_{\max} L / \chi_a\,,\ \mathrm{K} = \frac{r}{c^w \cdot \left(t_{11} - t_{21}\right)}\,.$$

Комплексы NTU и NTU_m, дающие количество единиц переноса тепла и влаги, записываются в виде:

$$\mathrm{NTU} = \frac{\alpha \Pi L}{\rho_a c_p^a S u_{\max}}, \ \mathrm{NTU}_m = \frac{\beta \Pi L}{\rho_a S u_{\max}}.$$

Подобные комплексы используются при анализе эффективности теплообменников различных типов [18].

Граничные условия в безразмерном виде будут иметь вид:

$$\partial\xi/\partial\bar{x}\big|_{\bar{x}=0} = \partial\xi/\partial\bar{x}\big|_{\bar{x}=1} = 0, \qquad (20)$$

$$\theta\big|_{\bar{x}=0} = 1 \text{ или } \theta\big|_{\bar{x}=1} = 0. \qquad (21)$$

При переключениях направления потока знак скорости изменяется на противоположный. Если безразмерную длительность цикла регенерации обозначить через τ_C, то значения безразмерной температуры потока на входах в канал при переключениях могут быть записаны в виде:

$$\theta\big|_{\bar{x}=0}\,(n\tau_C \le \bar{t} < \left(n+\frac{1}{2}\right)\tau_C) = 1, \ \theta\big|_{\bar{x}=1}\,((n+\frac{1}{2})\tau_C \le \bar{t} < (n+1)\tau_C) = 1 \qquad (22)$$

где n – последовательность циклов регенерации, n =0,1,2,…

Начальные распределения температуры воздуха и стенок матрицы в безразмерном виде:

$$\theta(\bar{x})\big|_{\bar{t}=0} = \xi(\bar{x})\big|_{\bar{t}=0} = 1-\bar{x}. \qquad (23)$$

Из записи системы (15–19) в безразмерном виде следует, что её решение определяется конкретным набором независимых безразмерных комплексов. Такими комплексами являются: NTU, массовое NTU_m, отношение температуропроводностей с числом Пекле $\chi_m/(\chi_a \mathrm{Pe})$, массовое отношение $\rho_a S/\rho_m S_m$, число Кутателадзе K, разность влагосодержаний внутреннего и наружного воздуха $\Delta\omega = \omega_{11} - \omega_{21}$, отношения теплоёмкостей воды и материала матрицы c^w/c^m, а также воздуха и материала матрицы c_p^a/c^m. Этот перечень необходимо дополнить ещё одним параметром, который не входит в запись системы явным образом. Таким параметром является безразмерная длительность цикла регенерации $\tau_C = \Delta t_C u_{\max}/L$, которая входит через граничные условия (22). Всего получается девять комплексов, из них только восемь независимые. Каждый из этих безразмерных комплексов будет оказывать различное влияние на решение, и как следствие на эффективность регенерации.

Система уравнений (15–19) с граничными (20, 22) и начальными условиями (23) решалась методом конечных разностей.

2.Влияние обобщенных параметров на тепловую и влажностную эффективность. При анализе эффективности воздушных регенеративных теплообменников обычно используют один из двух подходов. При первом учитывают только явное тепло и не учитывают фазовые превращения влаги, а при втором рассматривают наряду с явным теплом и скрытое тепло, связанное с возможными фазовыми превращениями. В случае отсутствия фазовых превращений или не учета их используется понятие температурной эффективности ε_T. При равенстве водяных эквивалентов она выражается следующим образом:

$$\varepsilon_T = \frac{t_{11}-t_{12}}{t_{11}-t_{21}} = \frac{t_{22}-t_{21}}{t_{11}-t_{21}}. \qquad (24)$$

Цикл или период работы теплообменника с изменением направления потока можно представить в виде последовательности условно «холодного» и «тёплого» полупериодов. Во время «холодного» полупериода воздух из помещения удаляется на улицу, отдавая тепло стенкам каналов теплообменной матрицы и остывая при этом. Во время «теплого», наоборот, воздух поступает с улицы в помещение, при этом его температура повышается за счет съёма

тепла аккумулированного матрицей. С учётом этого можно ввести температурную эффективность соответственно «теплого» и «холодного» полупериодов:

$$\varepsilon_T^+ = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}\ ,\ \varepsilon_T^- = \frac{t_{11} - t_{12}}{t_{11} - t_{21}}\ . \qquad (25)$$

В общем случае эти эффективности между собой не равны. Равенство может нарушаться, как из-за неравенства водяных эквивалентов приточного и вытяжного воздуха, так и из-за процессов связанных с фазовыми превращениями. При отсутствия фазовых превращений и равенстве водяных эквивалентов приточного и вытяжного воздуха имеем: $\varepsilon_T^+ = \varepsilon_T^- = \varepsilon_T$.

В условиях умеренной климатической зоны для обеспечения комфортного пребывания в помещениях иногда наибольший интерес представляют величины явной и влажностной эффективностей во время теплого полупериода.

При учёте фазовых превращений обычно для анализа используют две эффективности, это явная или температурная и влажностная эффективности, которые обозначаются соответственно как ε_S и ε_L. При равенстве массовых расходов приточного и вытяжного воздуха влажностная эффективность определяется аналогично (25):

$$\varepsilon_L^+ = \frac{\omega_{22} - \omega_{21}}{\omega_{11} - \omega_{21}}\ ,\ \varepsilon_L^- = \frac{\omega_{11} - \omega_{12}}{\omega_{11} - \omega_{21}}\ . \qquad (26)$$

Здесь, как и ранее, ω обозначает влагосодержание. Величина ε_S определяется согласно (24). Иногда используется понятие средней эффективности за полупериод, а также средняя за период, которая в нашем случае определяется просто как средняя арифметическая величина. Здесь и далее по тексту среднюю величину будем обозначать чертой над символом.

Рассмотрим теперь влияние на явную и влажностную эффективности безразмерных комплексов задачи (15–19) в условиях увлажнённых воздушных потоков. При проведении расчётов использовались следующие базовые значения параметров задачи: температура внутреннего воздуха в помещении +25 ^{0}C, температура наружного воздуха –5 ^{0}C . Относительная влажность внутреннего воздуха принималась равной 50% , наружного 80 % . Сравнение результатов расчетов при варьировании одного из безразмерных комплексов проводилось относительно результатов расчета при базовых значениях параметров. На рисунках результаты соответствующие «базовым» условиям расчета обозначены символом «звездочка». При выбранных условиях расчетов для чисел Льюиса и NTU справедливы равенства Le=1, и NTU=NTU$_m$.

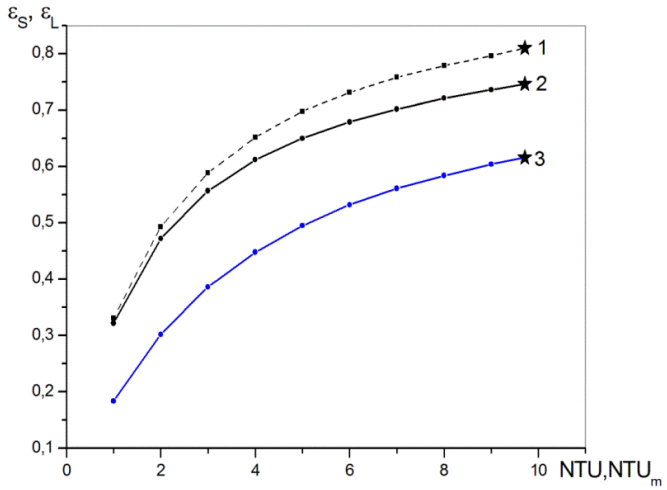


Рис. 1. Зависимость средней за цикл температурной эффективности для сухих воздушных потоков (1), явной (2) и влажностной (3) эффективности от NTU и NTU$_m$

На рис.1 показаны результаты расчетов зависимостей явной и влажностной эффективности от NTU_m , а также для сравнения температурной эффективности для сухих воздушных потоков от NTU. Эффективности возрастали с увеличением NTU. Явная эффективность воздушных потоков была ниже температурной эффективности, и их разница увеличивалась с ростом NTU_m.

Анализ системы уравнений (15-19) приводит к выводу о появлении двух безразмерных комплексов K и $\Delta\omega = \omega_{11} - \omega_{21}$, учитывающих влияние на ε_S и ε_L тепло-влажностных условий наружного и внутреннего воздуха.

На рис.2 представлены зависимости $\overline{\varepsilon}_S$ от K, которые определены при NTU_m =10 для разных значений относительной влажности воздуха в помещении. Ранее в условиях сухих воздушных потоков изменение температуры не влияло на температурную эффективность регенерации. Этот же результат получен в виде линии 1 на рис.2а, которая соответствует малой относительной влажности внутреннего воздуха, φ=15%.

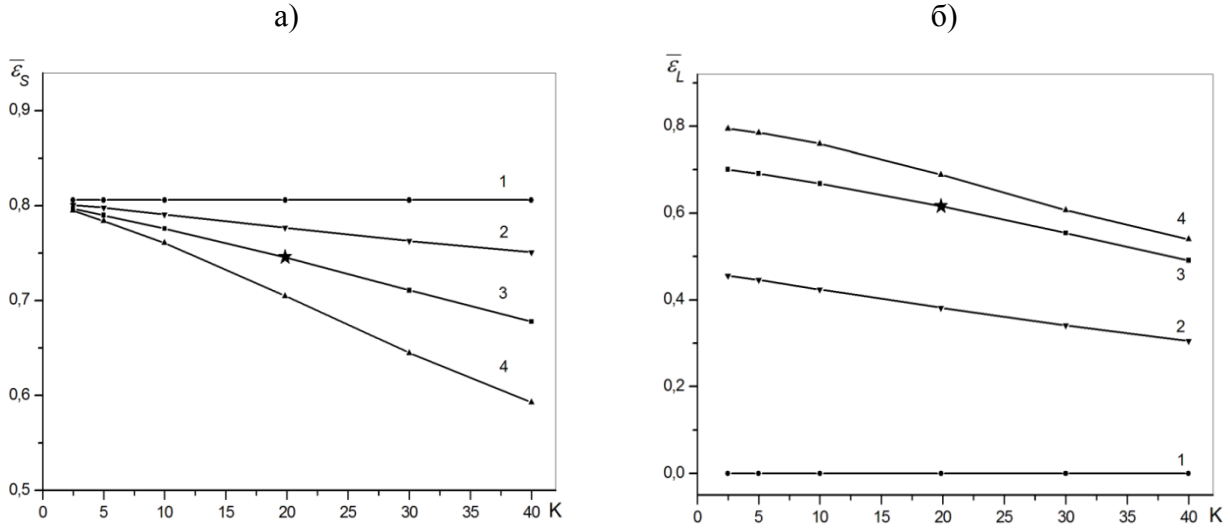


Рис. 2. Зависимость средней за цикл явной (а) и влажностной (б) эффективности от числа K при относительной влажности воздуха в помещении (1 –φ=15%; 2–φ=30%; 3–φ=50%; 4– при φ=85%)

Увеличение относительной влажности воздуха в помещении повышало чувствительность $\overline{\varepsilon}_S$ к изменению его температуры. Более значительно влияние влажности проявлялось при малых температурных напорах, т.е. при больших K. Наоборот, в области малых K, при большой разнице температур между наружным и внутренним воздухом различие в влажности воздуха слабо влияло на эффективность, а сама эффективность принимала максимальное значение. Причина заключается в том, что увеличение температурного напора ($t_{11} – t_{21}$) ведёт к уменьшению числа K. Уменьшение K, в свою очередь, приводит к ослаблению влияния фазовых превращений на общий теплообмен. На рис. 2б представлены зависимости средней за цикл влажностной эффективности $\overline{\varepsilon}_L$ от числа K. Зависимости построены при различных значениях относительной влажности внутреннего воздуха. Наибольшее влияние на $\overline{\varepsilon}_L$ температуры внутреннего воздуха проявлялось при более высокой относительной влажности внутреннего воздуха. С уменьшением температурного напора, или ростом K, наблюдалось снижение $\overline{\varepsilon}_L$ практически по линейному закону, что является удобным при проведении различного рода расчетов.

Рассмотрим влияние на $\bar{\varepsilon}_S$ и $\bar{\varepsilon}_L$ разности влагосодержаний внутреннего и наружного воздуха $\Delta\omega$. В расчётах варьирование $\Delta\omega$ осуществлялось изменением относительной влажности воздуха внутри помещения. Влияние этого фактора на явную и влажностную эффективности теплообменника показано на рис.3. Здесь представлены средние эффективности за "теплый" $\bar{\varepsilon}^+$ и "холодный" $\bar{\varepsilon}^-$ полупериоды, а также в целом за цикл, $\bar{\varepsilon} = (\bar{\varepsilon}^+ + \bar{\varepsilon}^-)/2$. В поведении графиков можно выделить три характерных диапазона $\Delta\omega$. В первом диапазоне, $\Delta\omega \le 1.35$ г/кг, при малом отличии влагосодержания внутреннего и наружного воздуха получены равенства $\bar{\varepsilon}_S = \bar{\varepsilon}_S^+ = \bar{\varepsilon}_S^- = \bar{\varepsilon}_T$ и $\bar{\varepsilon}_L = \bar{\varepsilon}_L^+ = \bar{\varepsilon}_L^- = 0$. Причина заключается в том, что в данном диапазоне отсутствовали фазовые превращения.

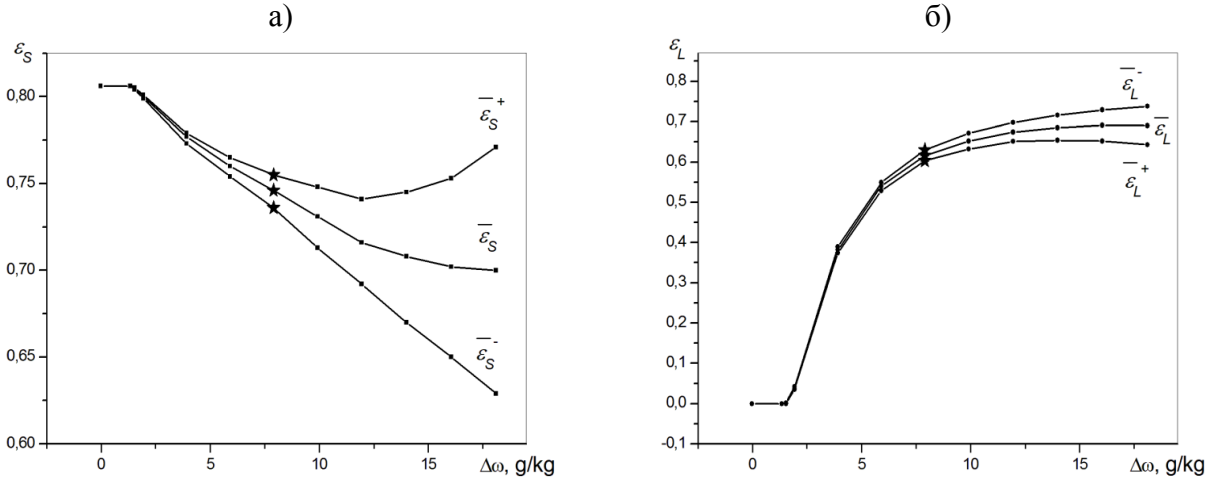


Рис. 3. Зависимость явной (а) и влажностной (б) эффективности от разности влагосодержаний воздуха в помещении и на улице

Во втором диапазоне, при «умеренной» разности влагосодержаний, примерно до $\Delta\omega = 11.9$ г/кг были характерны процессы конденсации и испарения влаги в теплообменной матрице. Явные средние эффективности в «теплом» и в «холодном» полупериодах уменьшались (рис.3а), а влажностные, наоборот, возрастали (рис.3б). Можно отметить, что аналогичное снижение явной эффективности при наличии процессов конденсации и испарения влаги было отмечено и во вращающихся регенераторах. В диапазоне «умеренных» влажностей внутреннего воздуха, как уже отмечалось ранее [15], накопления влаги в теплообменной матрице в целом за весь период работы теплообменника не происходило. Вся влага, сконденсировавшаяся за «холодный» полуцикл в каналах теплообменной матрицы, испарялась в воздушный поток за «теплый» полуцикл.

В третьем диапазоне при $\Delta\omega \ge 11.9$ г/кг конденсация в среднем за период преобладала над испарением, и происходило постепенное накопление влаги на стенках канала. Это приводило к дополнительному нагреву стенки канала и росту $\bar{\varepsilon}_S^+$. Другая причина повышения $\bar{\varepsilon}_S^+$ заключалась в конденсации влаги в потоке в виде тумана на «теплом» полуцикле при высокой влажности внутреннего воздуха. Следует отметить также, что увеличение $\bar{\varepsilon}_L^-$ уже при «умеренных» разностях влагосодержаний более заметное, чем $\bar{\varepsilon}_L^+$, что связано с образованием водяного тумана в потоке во время «холодного» полуцикла. При «высокой» разности влагосодержаний отличие становится еще более существенным, так как процессы конденсации при «холодном» полуцикле начинают преобладать над процессами испарения при «теплом».

Заключение. Разработана физико-математическая модель регенеративного теплообменника с периодическим изменением направления воздушного потока. Учёт влажности воздушных потоков, и как следствие возможности фазовых превращений в теплообменнике,

привёл к появлению в модели новых безразмерных независимых комплексов, через которые температурно-влажностные условия окружающей среды влияют на явную и влажностную эффективности. Такими комплексами являются число Кутателадзе K и Δω. Изменение температурных условий влияло на эффективность через число K. Для мало увлажнённых воздушных потоков эффективность не зависела от температуры окружающей среды. В случае влажного воздуха такая зависимость выявлена. С ростом температурного напора между температурой воздуха в помещении и на улице, явная и влажностная эффективности возрастали. Чувствительность эффективности к изменению K увеличивалась с ростом влажности внутреннего воздуха и как следствие с увеличением Δω. При этом рост K всегда приводит к снижению $\overline{\varepsilon}_S$ и $\overline{\varepsilon}_L$. Расчеты показали, что образование конденсата происходило, как на стенках каналов, так и непосредственно в воздушных потоках. Процессы конденсации и испарения зависели от Δω. В целом средняя за цикл явная эффективность с ростом влажностного напора уменьшалась. Влажностная эффективность $\overline{\varepsilon}_L$ напротив возрастала. Конденсация, в основном происходила на стенках каналов. Образование частиц тумана в воздушном потоке влияло на влажностную эффективность в пределах нескольких процентов.

Работа выполнена при поддержке госбюджетного финансирования, номер госрегистрации проекта 0322-2016-0012.

Литература:

1. Fernandez-Seara J., Diz R., Uhia F.J.,.Dopazo A, Ferro J.M. Experimental analysis of an air-to-air heat recovery unit for balanced ventilation systems in residential buildings//Energy Conversion and Management, 52, 2011. C.635-640.
2. Rezaie B., Esmailzadeh E., Dincer I. Renewable energy options for buildings: Case studies//Energy and Buildings, 43, 2011.C.56-65.
3. Roulet C. A., Heidt F.D., Foradini F., Pibiri M. C. Real heat recovery with air handling units//Energy and Buildings, 33, 2001.C.495–502.
4. Awbi H.B., Chapter 7 – ventilation//Renew Sustain Energy Rev, 2, 1998.C.157–188.
5. British Petroleum Statistical Review of World Energy, June 2017.
6. Abdel-Salam M. R.H., Fauchoux M., Ge G., Besant R. W., Simonson C. J. Expected energy and economic benefits, and environmental impacts for liquid-to-air membrane energy exchangers (LAMEEs) in HVAC systems: A review// Applied Energy, 127, 2014.C.202-218.
7. Fehrm M., Reiners W., Ungemach M. Exhaust air heat recovery in buildings// International Journal of Refrigeration, 25, 2002.C.439–449.
8. Liu J., Li W., Liu J., Wang B. Efficiency of energy recovery ventilator with various weathers and its energy saving performance in a residential apartment// Energy and Buildings,42, 2010.C.43-49.
9. Mardiana A., Riffat S.B. Review on physical and performance parameters of heat recovery systems for building applications//Renewable and Sustainable Energy reviews, 28, 2013. C.174–190.
10. Dodoo A., Gustavsson L., Sathre R. Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings//Energy and Buildings, 43, 2011. C.1566–1572.
11. Aristov Y.I., Mezentsev I.V., Mukhin V.A. A new approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems//Energy and Building, 40, 2008, C.204–208.
12. Yang C.M., Chen S.I., Chen S.L. Energy-efficient air conditioning system with combination of radiant cooling and periodic total heat exchanger//Energy, 59, 2013.C. 467–477.
13. Manz H., Huber H., Schalin A., Weber A., Ferrazzini M., Studer M. Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery//Energy and Buildings, 31, 2000. C.37–47.

14. Nizovtsev M.I., Borodulin V.Yu., Letushko V.N., Zakharov A.A. Analysis of the efficiency of air-to-air heat exchanger with a periodic change in the flow direction//Applied Thermal Engineering, 93, 2016.C.113–121.
15. Nizovtsev M.I., Borodulin V.Yu., Letushko V.N. Influence of condensation on the efficiency of regenerative heat exchanger for ventilation//Applied Thermal Engineering, 111, 2017.C. 997–1007.
16. Liu P., Nasr M.R., Ge G., Alonso M.J., Mathisen H.M., Fathieh F., Simonson C., A theoretical model to predict frosting limits in cross-flow air-to-air flat plate heat/energy exchangers//Energy and Buildings,110, 2016. C.404–414.
17. Alonso M.J., Liu P., Mathisen H.M., Ge G., Simonson C., Review of heat/energy recovery exchangers for use in ZEBs in cold climate countries// Build. Environ., 84, 2015.C. 228–237.
18. W.M. Kays, A.L. London, Heat Exchanger Thermal and Pressure-Drop Design. Compact Heat Exchangers. Stanford: McGraw-Hill Book Company, 1984.

УДК 536.242.08

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Ф.А. Рагимов

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
Баку, rahimov_fa@yahoo.com

Экспериментальные исследование температурного режима стенки при переходном режиме движении холодного толуола показали, что при определенных условиях возникает улучшенный режим теплоотдачи, который сопровождается термоакустическими автоколебаниями давления. Приведенные здесь результаты дают основание считать, что для охлаждения высокотемпературной поверхности целесообразно использовать холодные углеводороды, которые при высоких тепловых потоках создают условия температуры металла.
Ключевые слова: температурный режим, переходной режим движения, теплоотдача, термоакустические автоколебания давления

Определение температуры стенки аппаратов, работающих при сверхкритическом давлении вещества, является одним из основных вопросов проектирования. Конструктору еще до изготовления аппарата важно знать, как он будет действовать. В этом вопросе конструктору может помочь только отработанная методика расчета. Создание расчетных методов – одна из основных задач специалистов, работающих в данном направлении.

В тех случаях, когда процесс изучен недостаточно полно, расчет его усложняется, а существующие расчетные формулы, как правило, имеют приближенный характер. При этом большое затруднение вызывает выбор достоверных уравнений среди большого числа существующих формул. Последнее имеет место в том случае, когда одно и тоже явление объясняется с различных точек зрения или экспериментальные данные исследователей противоречат друг другу, или описывают разные закономерности изучаемого явления. По этой причине в литературе отсутствует надежное расчетное уравнение для жидкостей при сверхкритическом давлении и различных режимах теплоотдачи. Определение условий возникновения того или другого режима теплоотдачи только на основании экспериментальных данных, полученных в ограниченном интервале изменений режимных параметров, является несколько условным и приближенным, что затрудняет расчеты аппарата.

Если бы при сверхкритическом давлении наблюдался только ухудшенный режим теплоотдачи, то расчет аппарата несколько облегчался бы, так как в этом случае в расчете необходимо было бы определить наибольшее значение температуры стенки. Однако, в большинстве случаев, в практике встречается улучшенный режим теплоотдачи, при котором с увеличением теплового потока температура стенки изменяется мало. Наличие такого процесса дает возможность создать аппараты, работающие при больших тепловых потоках. В этом случае конструкторы должны определить условия возникновения улучшенного режима теплоотдачи в проектируемом устройстве.

Кроме указанных режимов при $P>P_{кр}$ наблюдается также нормальный режим теплоотдачи. Естественно, эмпирические зависимости, полученные для различных режимов теплоотдачи отличаются друг от друга, и каждая зависимость может применяться в определенном интервале изменений режимных параметров. Таким образом, расчет теплоотдачи при сверхкритическом давлении является сложной задачей, он имеет ряд неопределенностей в отношении выбора расчетных формул для отдельных веществ при различных интервалах изменений режимных параметров.

Многочисленные экспериментальные работы показывают, что в определенном интервале изменений тепловых и гидродинамических характеристик потока под влиянием вышеуказанных эффектов при сверх критических давлениях (СКД) жидкости наблюдаются нормальные, улучшенные и ухудшенные режимы теплоотдачи, которые при вертикальном горизонтальном положении трубы проявляют себя по-разному. Закономерность этих режимов теплоотдачи целесообразно изучать в отдельности и выявлять влияние свободной конвекции, а также других эффектов на интенсивность теплообмена

В данной работе ограничивается исследованием особенности теплоотдачи при переходном режиме движении толуола сверхкритического давления в вертикально трубе.

Выше было отмечено, что экспериментальные данные по температурному режиму стенки можно условно разделить на две группы:

1) Данные, полученные с холодной жидкостью, соответствующие условию охлаждения высокотемпературной поверхности;

2) Данные, полученные с нагретой жидкостью, соответствующие условиям работы парогенераторов тепловых электрических станций.

Температурные режимы стенки в указанных случаях отличаются между собой. В опытах с различными жидкостями, соответствующие первому случаю, отмечались нормальные и улучшенные режимы теплоотдачи. Экспериментальные данные по теплоотдаче с нагретой жидкостью доказывают существование нормального и ухудшенного режимов теплообмена.

Экспериментальные исследование температурного режима стенки при переходном режиме движении холодного толуола СКД $t_{ж}^{вх} / t_{m} = 0{,}05 \div 0{,}08$ в вертикальной трубе ($d_в/d_н$ = 1,5/2,0÷3,5/4,0 мм) показали, что при температурах стенки меньше t_m имеет место нормальный режим теплоотдачи. Выявлено, что при определенных условиях ($P>P_{кр}$, $t_ж<t_m$, $t_c \geq t_m$) возникает улучшенный режим теплоотдачи, который сопровождается термоакустическими автоколебаниями давления (ТААК). Природа этого явления окончательно не изучена. Теплообмен при условиях $P>P_{кр}$, $t_ж<t_m$, $t_c \geq t_m$ сопровождается высокочастотными (ВЧ) пульсациями давления жидкости, амплитуды которых могут достигать десятков процентов от статического давления в канале.

На рис. 1. показаны изменения температуры стенки по длине трубы при подъемном движении толуола. Из этого рисунка следует, что не монотонное распределение температуры стенки наблюдается при $t_c \geq t_m$. Высокочастотная пульсация давления жидкости начинается также при указанном условии [1]. Рис.1. характеризует изменение температуры стенки с повышением плотности теплового потока при постоянных значениях остальных режимных параметров. Видно, что при $t_c<t_m$ (t_m = 365°C) изменение температуры стенки по длине трубы

соответствует нормальному режиму теплоотдачи (кривая 1). По мере увеличения теплового потока температура стенки возрастает по длине трубы (кривая 2). При достижении температуры стенки приблизительно 250°С нарушается монотонный характер изменение температуры стенки (кривые 3, 4), что может быть объяснено влиянием свободной конвекцией. При подъемном движении направление вынужденной и свободной конвекции совпадают, соответственно изменяется интенсивность теплоотдачи, который в свою очередь изменяет характер распределение температуры стенки. В таких опытах в начальной части трубы t_c увеличивается, в средней части ее уменьшается, а в конечной части t_c возрастает слабо. Отметим, что характер изменение температуры стенки зависит от влияния свободной конвекции, плотности теплового потока, энтальпии и расхода жидкости, а также от значения $q/\rho u$. При малых массовых скоростях нарушение монотонности распределения температуры стенки наступает при $t_c<t_m$. По мере приближения температуры жидкости к t_m изменение t_c по длине трубы приобретает волнообразный характер (кривые 3, 4). С дальнейшим повышением теплового потока t_c возрастает и становится $t_c>t_m$. В таких опытах по длине трубы наблюдается возрастание температуры стенки. В опытах с холодным толуолом при $t_c \geq t_m$ возникает пульсационный режим, который влияет на характер изменения температуры стенки [2].

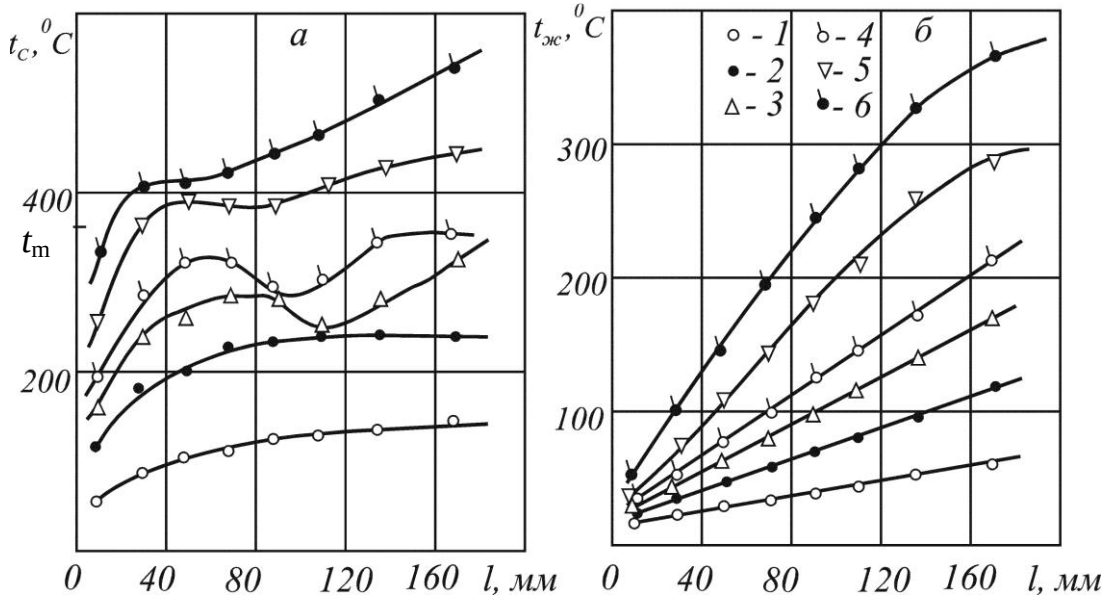


Рис. 1. Изменение температуры стенки (а) и жидкости (б) по длине трубы при подъемном движении толуола для P = 7,0 МПа, ρu = 97 кг/(м²·с), $t_{ж}^{вх}$ = 18°С; 1–$q\approx0{,}25\cdot10^5$; 2–$q\approx0{,}76\cdot10^5$; 3–$q\approx0{,}89\cdot10^5$; 4–$q\approx1{,}30\cdot10^5$; 5–$q\approx1{,}70\cdot10^5$; 6–$q\approx 2{,}45\cdot10^5$ [1].

Для измерения амплитуды и частоты использовался индуктивный датчик давления ДДИ-21, установленный через переходник в средней части обогреваемого участка трубы.

Во время опытов синхронно производились замеры всех параметров теплообмена и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и высокочастотных (ВЧ) колебаний давления. Влияние АЧХ ВЧ колебаний на температурный режим демонстрируется на графиках зависимости $t_c = f(q)$ и $t_c = f(x/d)$. Такие зависимости представлены на рис. 2 и 3. График зависимости $t_c = f(q)$ показывает, что при постоянных режимных параметрах, с увеличением теплового потока, изменение температуры стенки имеет различные характеры.

Начальный участок АБ графика зависимости $t_c = f(q)$ соответствует нормальному режиму конвективного теплообмена. Участок БВ образуется при условии $t_c \approx t_m$, в котором в при стеночной части потока $t_{ж} \approx t_m$, иначе говоря у стенки жидкость находится при околокритическом состоянии в зоне большой теплоемкости (ЗБТ). В указанном условии сильные изменение теплофизических свойств жидкости способствует улучшению теплообмена и как след-

ствие этого незначительное изменение температуры стенки. Здесь не исключены влияние свободной конвекции и ускорения потока за счет сильного изменения плотности теплоносителя. Можно предположить, что вязкостный режим течения, имеющие место на участке АБ графика переходит на вязкостно-гравитационный режим. Кроме этого следует отметить, что при $t_c \approx t_m$ возникают пульсации давлении жидкости, сопровождаемые термоакустическими автоколебаниями (ТААК). Согласно предложенным моделям, по мере повышения теплового потока, ЗБТ перемещается от стенки к ядру потока и образуется участок ВГ графика зависимости $t_c = f(q)$. Отметим, что пульсация давления жидкости и температуры стенки с увеличением теплового потока усиливались. При температурах $t_c \approx$ 450–500°С с увеличением теплового потока скачкообразно снизилась температура стенки на графике $t_c = f(q)$ и образовался участок улучшенного режима теплоотдачи ГДЕ.

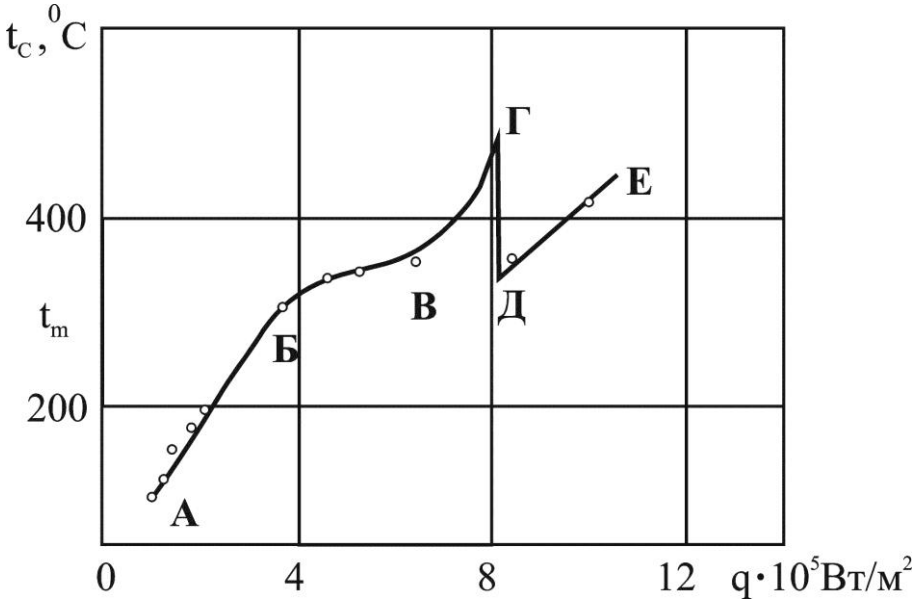


Рис. 2. Зависимость температуры стенки трубы от плотности теплового потока при постоянной массовой скорости потока и различных давлениях толуола: ρu = 1100 кг/(м^2·с); $d_н$ =3,0 мм; $d_{вн}$ =1,9 мм; l =606 мм; $l_{обо}$ =210 мм; $t_ж^{вх}$ =30°С; x/d = 84; $Re_{вх}$ =2000; $Re_{вых}$ = 10000; P = 4,5 МПа

Уместно отметить, что за начальную границу возбуждения ТААК принято то значение теплового потока, при малейшем увеличении которого возбуждались пульсации давления теплоносителя в трубе. Это позволило определить область существования колебательных режимов и границы устойчивой работы теплообменного аппарата без ВЧ пульсации давления. При поддержании в трубе постоянных входных параметров толуола и статического давления 4,5 МПа ВЧ пульсации давления начинается в начале участка БВ при $q_{н.к.}$ = 3,8·10^5 Вт/м^2. Как было отмечено выше с увеличением теплового потока ВЧ пульсации давления усиливался и на участке ГД под воздействием ТААК давления температура стенки падает приблизительно на 100 °С. Аналогичные результаты получаются при других режимных параметрах толуола (рис.3). В этом опыте давление, массовая скорость и температура жидкости на входе в трубу поддерживались постоянными. Нормальный режим конвективного теплообмена при $t_c<t_m$ (кривая 1, 2) с увеличением теплового потока нарушается (кривая 3). Такая закономерность связана с достижением температуры пристеночного слоя жидкости значения t_m. Вследствие этого, теплоотдача интенсифицируется и с увеличением теплового потока температура стенки изменяется незначительно и кривые $t_c = f(x/d)$ сливаются между собой. Темп прироста температуры стенки меньше темпа увеличения теплового потока. Картина теплообмена сильно изменяется с момента возбуждения в трубе ТААК давления. Наблюда-

ется интенсификация теплообмена, вызванная ВЧ колебаниями давлениями жидкости и резкое падение температуры стенки (кривая 5). При дальнейшем увеличении теплового потока наблюдается снижение темпа прироста амплитуды акустического давления. Такая закономерность изменения АЧХ акустического давления привела к немонотонному увеличению температуры стенки (кривая 6).

При низких температурах теплоносителя улучшение теплоотдачи сопровождается пульсациями давления жидкости, так называемыми термоакустическими автоколебаниями (ТААК). В опытах с холодной жидкостью на участке ГДЕ графика $t_c = f(q)$ температура стенки снижается (теплоотдача улучшается).

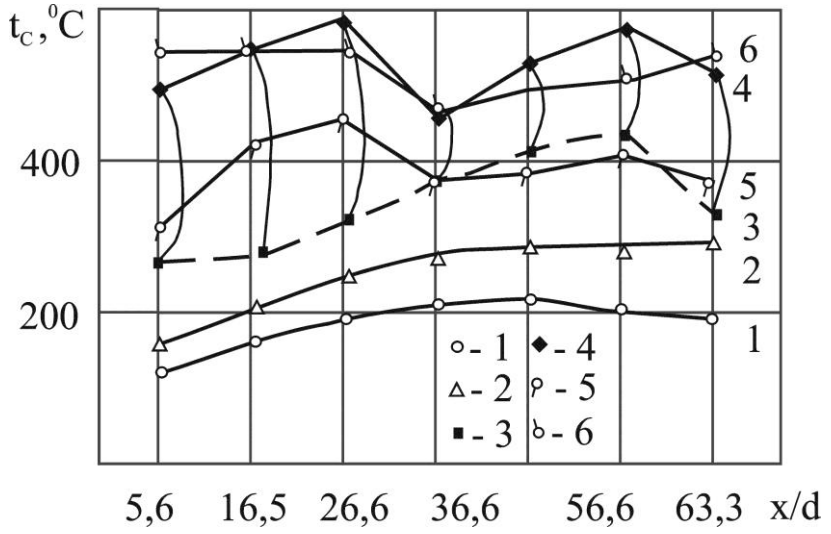


Рис. 3. Изменение температуры стенки по длине обогреваемого участка при различных тепловых потоках:
P=7,2МПа; ρu=1450 кг/(м²·с); $Re_{вх}$=3645; $Re_{вых}$=18860; $t_{ж}^{вх}$ = 29°С; $d_н$ =2,0 мм; $d_в$ =1,5 мм; l = 295 мм; $l_{обог}$ = 110 мм; q, Вт/м²·10⁵: 1–2,73; 2–2,81; 3–8,7; 4–13,2; 5–16,2; 6–18,5.

Приведенные здесь результаты дают основание считать, что для охлаждения высокотемпературной поверхности целесообразно использовать холодные углеводороды, которые при высоких тепловых потоках создают условия возникновения улучшенного режима теплоотдачи, сопровождаемые снижением температуры металла.

При выработке электроэнергии с целью повышения экономичности тепловых электрических станций СКД, жидкость предварительно нагревается до поступления в парогенератор. В этом случае в зависимости от режимных параметров (q, ρu, $q/\rho u$) возможно возникновение ухудшенного режима теплоотдачи, сопровождаемого повышением температуры металла.

Список обозначений

d – диаметр трубы, мм; P – давление, МПа; q – тепловой поток, Вт/м²; i – энтальпия, кДж/кг; l – расстояние от входа трубы, м; Re - критерии Рейнольдса; t – температура, °С; t_m– температура соответствующую максимуму теплоемкости при СКД жидкости; ρu – массовая скорость, кг/(м²с).

Индексы: ж – жидкость, с – стенка, об – обогреваемая, в – внутренняя, н - наружная, вх – вход, вых - выход.

Литература:

1. Калбалиев Ф.И., Вердиев Ч.М., Рагимов Ф.А. Нестационарные тепловые процессы при переходном режиме движения жидкости. // УШ Всесоюзная конференция «Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах», Ленинград, 1990 г. Т.2 г., с. 369-370

2. Калбалиев Ф.И., Вердиев Ч.М., Рагимов Ф.А. и др. Исследование особенностей теплоотдачи ароматических углеводородов в переходном области течения теплоносителя при сверхкритических давлениях в условиях высокочастотной термоакустической неустойчивости. // Изв. ВУЗ-ов “Нефть и Газ”, 1989, № 9, с. 65-70.
3. Рагимов Ф.А. Температурный режим парогенерирующих труб при сверхкритических давлениях вещества: Дис. канд. тех. наук. Баку, 2005, 188 с.

ПРОФИЛИ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К ИНТЕРВАЛУ ПЕРФОРАЦИИ СКВАЖИНЫ

Алишаев М.Г.

ФБГУН Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Россия, Махачкала; 367030, пр. И. Шамиля, 39 «а», alishaev@rambler.ru

Обсуждается задача распределения интенсивности притока жидкости вдоль интервала перфорации в скважину в большом по мощности артезианском бассейне или залежи нефти. Вдоль интервала притока давление в скважине принимается неизменным. Ищется интенсивность притока, которая слабо меняется вдоль интервала и возрастает к краевым точкам интервала. Задача некорректна, предложены некоторые возможные численные приближения решений.

Расставим вдоль интервала притока сферические стоки интенсивности $q(\xi)$ и для бесконечного по мощности и простиранию бассейна воспользуемся принципом суперпозиции решений. Пластовое давление в осесимметричных координатах (r,t) выразится интегралом по интервалу $(-h,h)$ от интенсивности притока $q(\xi)$ в зависимости от расстояния до стока, обратно пропорционально расстоянию [1,2], в виде

$$p(r,z) = p_\infty - \frac{\mu}{4\pi k}\int_{-h}^{h} \frac{q(\xi)}{\sqrt{r^2+(z-\xi)^2}} d\xi. \qquad (1)$$

На поверхности притока $r=R_c$, т.е. радиусу скважины, а формула (1) должна определять значение давления на забое, т.е. $p(R_c,z)=p_c$ при $-h<z<h$. В силу симметрии задачи относительно середины интервала притока интегральное уравнение для определения интенсивности притока вдоль интервала перфорации может быть представлено в безразмерных переменных

$$\int_0^1 \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2+(\zeta-\eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2+(\zeta+\eta)^2}} \right) \omega(\eta) d\eta = 1. \qquad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{R_c}{h}, \quad \zeta = \frac{z}{h}, \quad \eta = \frac{\xi}{h}, \quad \omega(\eta) = \frac{\mu \cdot q(z)}{4\pi k h (p_\infty - p_c)}. \qquad (3)$$

Здесь: ε отношение радиуса скважины к полудлине h интервала притока; ζ и η вертикальная и радиальная координаты; ω(η) - безразмерная интенсивность притока; k проницаемость пористой среды; μ вязкость жидкости; p пластовое давление, её индексы означают большую удалённость и поверхность скважины. По смыслу задачи, ω(η) есть чётная функция, её представление многочленом естественно рассматривать только чётной степени.

Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода (2) с симметричным ядром на отрезке [0,1] может быть решено приближённо [3-6], если заменить ω(η) полиномом. Наши попытки дали приемлемый результат для восьмой степени. Заменим искомую функцию полиномом $\omega(\eta) = a_0 + a_1\eta^2 + a_2\eta^4 + a_3\eta^6 + a_4\eta^8$. Подставим в (2), и получаем равенство, справедливое для всех ζ на отрезке [0,1]. Однако у нас всего пять искомых $a_i, i = 0,1,2,3,4$ и удовлетворить уравнению (1) можно лишь в 5 выбранных точках. Но выбор этот не является однозначным.

Выберем в качестве основных точек ζ=0.1; 0.3; 0.5; 0.7 и 0.9. Они не охватывают крайние точки интервала, но равномерно расположены внутри интервала. Если выбрать другие 5 точек интервала, результат будет другой. Задача в этом смысле является неопределённой, и вообще решение уравнения Фредгольма (1) считается некорректным. Но правдоподобный результат удаётся получить, и рекомендовать простую формулу для вычисления дебита скважины.

Подставив выражение полинома для интенсивности притока в (2), получаем

$$a_0 J_0(\zeta) + a_1 J_1(\eta) + a_2 J_2(\zeta) + a_3 J_3(\zeta) + a_4 J_4(\zeta) = 1, \quad 0 < \zeta < 1,$$

$$J_i(\zeta) = \int_0^1 \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + (\zeta - \eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + (\zeta + \eta)^2}} \right) \eta^{2i} d\eta, \quad i = 0,1,2,3,4. \tag{4}$$

Представленный здесь интеграл берётся в аналитическом виде и легко вычисляется в пакете Mathcad. Причём как для отмеченных значений ζ, так и для разных ε. Автор задавался значениями ε, в пакете Mathcad вычислял значения интегралов для пяти точек ζ (это 25 интегралов), формировал матрицу коэффициентов, обращался к процедуре решения системы линейных уравнений *lsolve*(M,v), находил значения коэффициентов a_i. В таблице 1 приводятся значения ε, формула для интенсивности безразмерного притока ω(η) к скважине, а также осреднённое значение притока. Интенсивности притока сосчитаны для ε=0.1; 0.05; 0.04; 0.02; 0.01; 0.005; 0.002 и 0.001. При радиусе скважины 0.1 м значения ε соответствуют интервалам притока в 1; 2: 2.5; 5; 10; 20; 50 и 100 метров.

Таблица 1.

Интенсивность притока к интервалу перфорации при кровле.

$\varepsilon=R_c/h$	Формула для интенсивности притока от глубины $\eta= z/h$	$\omega_{ср}$
0.1	$\omega0(\eta) = 0.1530 - 0.0128\eta^2 + 0.4816\eta^4 - 1.5584\eta^6 + 1.4999\eta^8$	0.1891
0.05	$\omega1(\eta) = 0.1287 + 0.0114\eta^2 + 0.1202\eta^4 - 0.3860\eta^6 + 0.4352\eta^8$	0.1493
0.04	$\omega2(\eta) = 0.1222 + 0.01236\eta^2 + 0.0845\eta^4 - 0.268\eta^6 + 0.3137\eta^8$	0.1398
0.02	$\omega3(\eta) = 0.1054 - 0.0113\eta^2 + 0.0332\eta^4 - 0.1038\eta^6 + 0.1368\eta^8$	0.1067
0.01	$\omega4(\eta) = 0.0924 + 0.0092\eta^2 + 0.0202\eta^4 - 0.0515\eta^6 + 0.0739\eta^8$	0.1003
0.005	$\omega5(\eta) = 0.0822 + 0.00745\eta^2 + 0.0121\eta^4 - 0.0278\eta^6 + 0.04439\eta^8$	0.0881
0.002	$\omega6(\eta) = 0.0716 + 0.0056\eta^2 + 0.0081\eta^4 - 0.0168\eta^6 + 0.0275\eta^8$	0.0757
0.001	$\omega7(\eta) = 0.0652 + 0.00464\eta^2 + 0.0061\eta^4 - 0.0118\eta^6 + 0.0202\eta^8$	0.0685

На рис.1 приведены графики интенсивности притока для некоторых значений ε. Видно по графикам, что при малых ε (большие *h*) хуже улавливается рост притока при η→1.

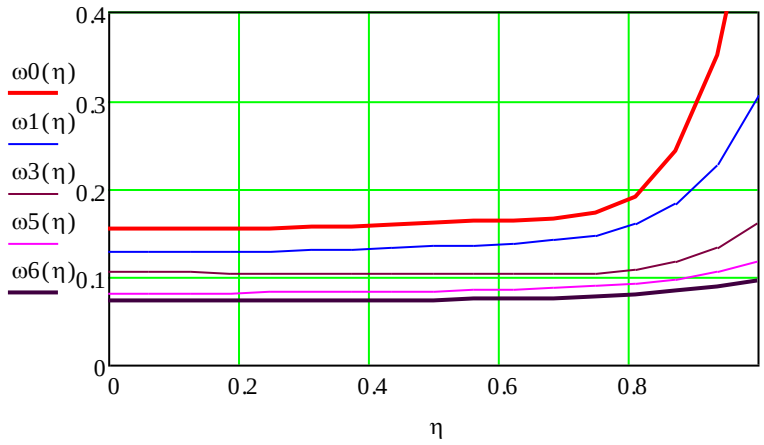


Рис. 1. Интенсивность притока для некоторых из значений параметра ε=0.1; 0.04; 0.02; 0.01 и 0.005.

Как видно из рисунка, точность вычислений нельзя признать достаточной, однако видно, что в основной части интервала перфорации интенсивность притока примерно одинакова. Лишь к свободному концу приток возрастает, это возрастание ослабевает со снижением ε. Средние значения притока $\omega_{ср}$, приведённые в таблице 1, если взять обратные их значения $1/\omega_{ср}$, хорошо укладываются в линейную зависимость от ln(1/ε), как это показано на рис. 2. Лишь одна точка отклонилась от прямой линии, она проверялась нами многократно.

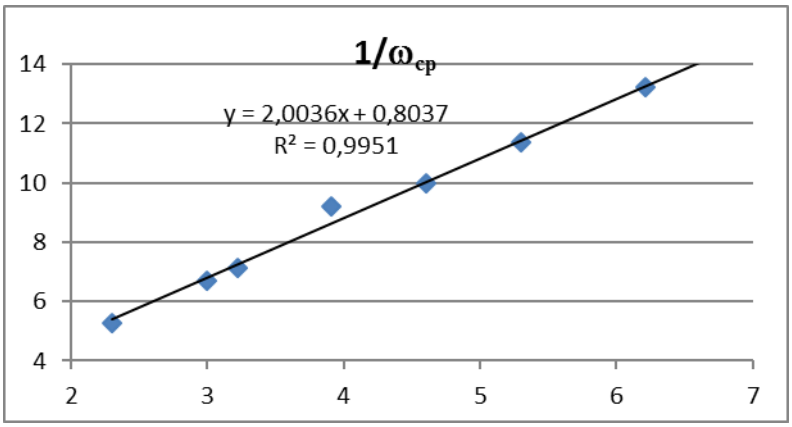


Рис. 2. Зависимость обратной величины средней интенсивности притока от ln(1/ε).

Полученная корреляция даёт основание предложить для определения средней интенсивности притока и дебита скважины следующие формулы

$$\omega_{ср} = \frac{0.4991}{\ln\dfrac{1.551}{\varepsilon}}, \quad Q = \frac{1.996\pi kh\left(p_\infty - p_c\right)}{\mu \ln\dfrac{1.551h}{R_c}} \approx \frac{2\pi kh\left(p_\infty - p_c\right)}{\mu \ln\dfrac{1.551h}{R_c}}. \qquad (5)$$

Формула дебита (4) весьма напоминает формулу Дюпюи. Разница лишь в том, что вместо радиуса питания R_k и постоянного давления p_k на контуре появилась длина интервал притока h, помноженная на коэффициент 1.551, и давление на бесконечном удалении. В отечественной литературе последняя известна как формула Н.К. Гиринского, под знаком логарифма вместо $1.6h$ у нас получилось $1.551h$.

Естественно, возникает желание прибегнуть ещё к другой возможности проверки результатов решения уравнения Фредгольма (1). В научной литературе предложена достаточно развитая теория и численные методы решения некорректных задач [4-8]. Замена интеграла суммой и последующее нахождение значений ω(η) на заданной равномерной сетке точек позволяют это сделать. Однако на практике дело ограничивается представлениями ω(η) в виде кусочно-постоянной функции [5,6] или равномерными сетками.

Разобьём интервал от 0 до 1 равномерной сеткой на n частей (например, n=16) и воспользуемся формулой трапеций. Уравнение (2) заменится линейным алгебраическим уравнением, приближенным с 2-м порядком аппроксимации относительно шага сетки $1/n$.

$$a_0(\zeta)\omega_0 + 2a_1(\zeta)\omega_1 + 2a_2(\zeta)\omega_2 + \ldots + 2a_{n-1}(\zeta)\omega_{n-1} + a_n(\zeta)\omega_n \approx 2n. \qquad (6)$$

Здесь коэффициенты есть функции безразмерной вертикальной координаты, т.е.

$$a_j(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + \left(\zeta - \eta_j\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + \left(\zeta + \eta_j\right)^2}}; \quad \eta_j = \frac{j}{n}; \quad j = 0,1,\ldots,n; \qquad (7)$$

Линейное уравнение, полученное для значений интенсивности притока ω_j, может быть удовлетворено только в (n+1) точке. Формируем систему уравнений для точек $\zeta_i = i/n$. Вводим матрицу линейных уравнений согласно формуле для её элементов

$$A_{i,j} = S_j \left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + \left(\zeta_i - \eta_j\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^2 + \left(\zeta_i + \eta_j\right)^2}} \right), \quad \zeta_i = \frac{i}{n}, \quad \eta_j = \frac{j}{n}, \quad i, j = 0,1,...,n \qquad (8)$$

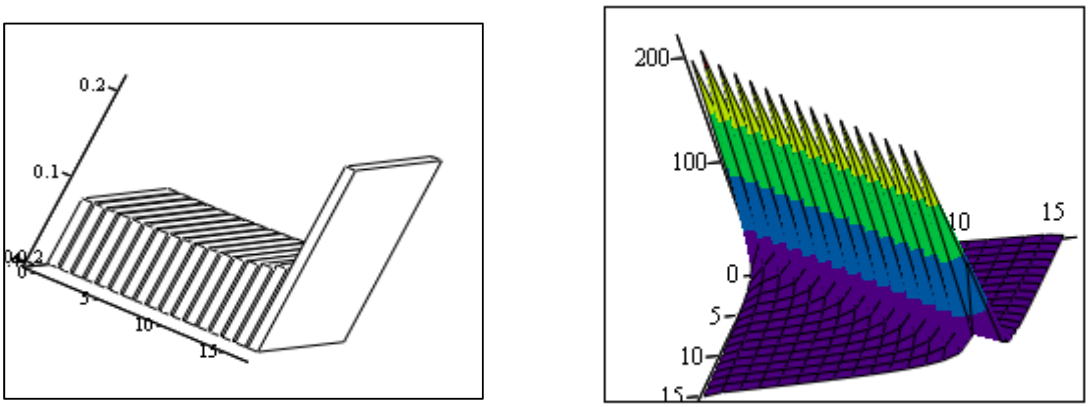
Здесь S_j есть коэффициенты формулы трапеций, $S_0 = S_n = 1$; $S_1 = S_2 = \ldots = S_{n-1} = 2$. Правую часть системы формируем в виде столбца с равными элементами $v_i = 2n$, $i = 0,1,\ldots,n$. И далее обращаемся к процедуре решения системы линейных уравнений пакета Mathcad. Получаем все ω_i. Решение представляем в виде таблиц значений для интенсивности притока в точках сетки для различных значений ε=0.05: 0.04; 0.02; 0.01; 0.005 и 0.002. При радиусе не обсаженной скважины 0.1 м эти значения соответствуют длинам интервала притока 2; 2.5; 5; 10; 20; 50 и 100 м. Элементы матрицы *A* имеют наиболее высокие значения при главной диагонали *i=j* (рис. 3). Это означает, что счёт будет достаточно устойчив, особенно для малых ε.

Таблица решений системы уравнений (5) нами были получены для случая *n*=16. Усреднённые по интервалу значения интенсивности притока приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Средние значения интенсивности притока для некоторых ε.

ε	0,05	0,04	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
ln(1/ε)	2,996	3,219	3,912	4,605	5,298	6,215	6,908
$\omega_{ср}$	0,1541	0,1435	0,1136	0,0836	0,0553	0,0276	0,01502
$\omega_{Гир}$	0,1443	0,1355	0,1141	0,0985	0,0867	0,0748	0,06777



sol A

Рис.3. Изображение решения sol и поверхности матрицы коэффициентов системы уравнений (6), ε=0.01.

По таблице 2 не удается для $\omega_{ср}$ получить формулу типа (5). Значения $1/\omega_{ср}$ не укладываются в прямую линию от ln(1/ε). Сравнение с формулой Гиринского, приведённое в таблице 2, показывает, что ошибки существенны, влияет на решение и подбор сетки интегрирования (η,ζ). Численное решение уравнения Фредгольма сведением к системе (6) не корректно, в том смысле, что выбор точек сетки заметно влияет на решение. Введением регуляторов по [7,8] для данной задачи никто не занимался, и в отечественной литературе попыток нахождения интенсивности притока вдоль интервала перфорации не было.

Как исправить формулу трапеций или формулу Симпсона, чтобы счёт был корректным и более устойчивым? Были опробованы неравномерные сетки. Без видимого успеха. Для ε>0.06 решение методом трапеций приводит к нарушению монотонности решения ω(ζ) вблизи 1. Автору так и не удалось найти удобное для применений решение уравнения (2), в науч-

ной литературе таких попыток тоже не было. Не был опробован метод Гаусса. Легче, как оказалось, поступить по-другому, уподобить интервал притока вытянутому сфероиду.

Рассмотрим интервал притока скважины у кровли залежи и уподобим его полу-сфероиду. Площадь поверхности её ($R<h$) составляет

$$S_{псф} = \pi R^2 + \frac{\pi R h}{\sqrt{1-R^2/h^2}} \arcsin\sqrt{1-R^2/h^2}. \qquad (9)$$

Площадь поверхности притока не обсаженной цилиндрической скважины радиуса R_c при той же кровли составит

$$S_{скв} = \pi R_c^2 + 2\pi R_c h. \qquad (10)$$

Приравниваем эти выражения, и после простых преобразований, получаем

$$\delta\left(\frac{R_c}{R}\right)^2 + 2\frac{R_c}{R} = \delta + \frac{\arcsin\sqrt{1-\delta^2}}{\sqrt{1-\delta^2}}, \quad \delta = \frac{R}{h}. \qquad (11)$$

уравнение для определения эквивалентного радиуса скважины, интервал притока которой совпадает с большей полуосью сфероида. Решение представлено в виде графика на рис. 4.

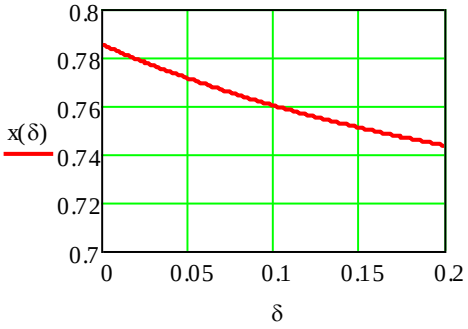


Рис. 4. Отношение эквивалентного радиуса скважины R_c к полуоси вращения сфероида R, $x=R_c/R$ для интервала отношения полуосей $\delta=R/h$ от 0 до 0.2.

Как видно из рис. 4, для малых значений δ эквивалентный радиус скважины надо брать примерно от $0.77R$ до $0.78R$. Это дает возможность подправить формулы для дебита скважины, который вскрыл пласт бесконечной мощности у самой кровли. Если интервал притока скважины заменяется эквивалентным полу-сфероидом, то радиальная полуось сфероида должна быть больше радиуса скважины, вместо R следует брать $R_c/0.77$ или $R_c/0.78$. Тогда формула дебита преобразуется «почти» в формулу Н.К. Гиринского

$$Q \approx \frac{2\pi k h(p_\infty - p_c)}{\mu \ln\dfrac{1.55h}{R_c}}. \qquad (12)$$

Отклонения средних значений интенсивности притока в таблице 2 от формулы Н.К. Гиринского подтверждает риски, связанные с применением численных методов для решения некорректных задач. Требуется развитие устойчивых к счёту корректных процедур для уравнения Фредгольма первого рода. И не только это. Геометрические приближённые методы, наподобие предложенной выше аналогии интервала притока вытянутому сфероиду, остаётся мало изученным вопросом. Трёхмерные задачи фильтрации всё ещё недостаточно изучены и проанализированы с точки зрения методов вычислений. Особенно решение интегральных уравнений Фредгольма первого рода, возникающих при моделировании интервалов притока точечными источниками, расположенными вдоль оси скважины. Формулы типа (12), выписанные для всех интервалов притока, являются пока достаточно хорошим средством уточнения дебитов скважин. Они вполне достаточны для имеющих место на практике значений параметра ε.

Что касается промысловой практики, существуют скважинные дебитометры, позволяющие измерить дебит в любой точке скважины. Они, в основном, используются, чтобы выявить приточные интервалы, и выявит приточные пласты и пропластки. Интенсивность притока определяют в среднем для приточного интервала, разделив весь приток на длину интервала. В осадочных толщах, где залежь имеет слоистое строение, интенсивность притока определяется проницаемостью пласта, которая является весьма изменчивой характеристикой, и портит значимость такого рода расчётов. Приведённые результаты скорее дают лучшее понимание, нежели практическое применение.

Литература:

1. *Полубаринова-Кочина П.Я.* Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1972. 684 с.
2. *Алишаев М.Г.* Моделирование и расчёт в прикладной механике и добыче нефти. Спецкурс для магистров. Махачкала: АЛЕФ, 2015. 288 с.
3. *Корн Г. и Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977. 832 с.
4. *Краснов М.Л.* Интегральные уравнения. Введение в теорию. М.: Наука, 1975. 302 с.
5. *Кошелев И.Е.* Численное решение линейного уравнения Фредгольма 1-го рода многосеточным методом// Известия ВУЗов. Математика. 1998, №2. С. 35-39.
6. *Латыпов А.Ф.* Численные методы решения линейных интегральных уравнений Фредгольма и Вольтерра 1-го рода// Международная конференция «Обратные и некорректные задачи математической физики», посвященная 75-летию академика М.М. Лаврентьева, 20-25 августа 2007 г., Новосибирск, Россия.
7. *Тихонов А.Н. Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 230 с.
8. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1986. 287 с.

УДК 532.13:536.22

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ «ИСТИ ИБАДИ» ЛЕНКЕРАНСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА

Мисирхан Талыбов

Азербайджанский Технический Университет, Баку, АЗЕРБАЙДЖАН,
E-Mail: misirkhan.talibov@yahoo.com; misirkhantalibov@gmail.com

В представленной работе теплофизические свойства геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана была изучена. Во время исследований *для* исследования химического состава воды атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой IRIS Intrepid II Optical Emission Spectrometer и *хроматограф DX-100 были использованы. А также* были выбраны высокоточная экспериментальная установка, реализующая метод плотномера с вибрационной трубкой DMA HPM и DSA 5000M для исследования плотности при высоких и атмосферных давления, установка Стабингера SVM 3000 для исследования вязкости, адиабатический калориметр для исследования теплоемкости, установки реализующие абсолютные и дифференциальные статические методы для определения давления насыщенных паров. Температурная зависимость полученных экспериментальных результатов были описаны с помощью различных эмпирических уравнений состояния.

Ключевые слова: термальные воды, плотность, теплоемкость, вязкость, измерительная ячейка, теплофизические свойства.

Введение

Последние десятилетия возник огромный интерес к альтернативной энергетике. В рамках Государственной Программы по использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии в Азербайджанской Республике, утвержденной распоряжением Президента Азербайджанской Республики от 21 октября 2004 года под номером 462 [1], в республике проводятся широкомасштабные работы по строительству ветряных, малых и больших гидротермальных и солнечных электростанций по использованию энергии биомассы, геотермальных вод и т.д.

Геотермальная энергия является частью альтернативной энергии и широко используются в мире для различных целей. В последние годы в связи с удорожанием традиционных источников энергии и их возможной нехваткой в будущем активно развиваются технологии, использующие термальные воды. До настоящего времени, исследования теплофизических свойств геотермальных и минеральных вод Азербайджана проводились в очень ограниченном интервале. В основном были изучены геологические и химические свойства этих вод [2-3]. Для использования геотермальных вод в различных энергетических установках необходимо знание их теплофизических свойств, которые почти не изучены. В течение последних нескольких лет в этом направлении ведутся работы на кафедре «Тепловая энергетика» Азербайджанского технического университета. В данной статье приводятся экспериментальные данные геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района, в южней части Азербайджана (Рис.1). Измеренный образец быль коллекционирован прямо из источника. Для измерения теплофизических свойств (кроме химического анализа) он быль подготовлен для измерений после фильтрование, удаление растворенных газов и воздуха с помощью вакуумного насоса.

Экспериментальная часть

Теплофизические свойства геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района изучены с использованием современных экспериментальных установок. Сначала была исследована химический состав воды в лабораториях кафедры Техническая Термодинамика Ростокского Университета Германии с использованием атомно-эмиссионного спектрометра [5] с индуктивно-связанной плазмой IRIS Intrepid II Optical Emission Spectrometer производства Великобритании и *хроматографа DX-100* [6-7], принципы работы которых приведены в предыдущих работах автора [6, 8]. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Рис. 1. Геотермальный источник «Исти Ибади», Ленкеран [4].

Таблица 1.

Химический состав геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

Анализ катионов					
минералы	**миллиграмм / литр**	**минералы**	**миллиграмм / литр**	**минералы**	**миллиграмм / литр**
Al 1670	0.01	Hg 1849	0.02	S 1820	14.3
As 1890	0.01	K 7664	5.59	Sb 2175	0.02
B 2089	3.88	Li 6707	0.18	Se 1960	0.02
Ba 2304	0.01	Mg 2790	0.59	Si 2124	13.0
Ca 3181	240	Mn 2939	0.06	Sn 1899	0.01
Cd 2288	0.01	Mo 2020	0.01	Ti 3349	0.024
Co 2286	0.01	Na 8183	958	Tl 1908	0.05
Cr 2055	0.01	Ni 2316	0.01	V 2924	0.01
Cu 3247	0.01	P 2136	0.01	Zn 2062	0.01
Fe 2599	0.141	Pb 2203	0.01	**Cəmi:**	1236.015
Анализ анионов					
Хлориды	794.1	**Нитраты**	2.4	**Сулфаты**	57.4

Для измерения плотности геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района при высоких давлениях и температурах была использована высокоточная экспериментальная установка, реализующая метод плотномера с вибрационной трубкой [9]. Данный метод в современной экспериментальной теплофизике отличается высокой точностью измерений, простотой, незначительными временными и экономическими затратами, а также возможностью автоматизации процесса измерений. Принцип работы экспериментальной установки приведен в работах [10-12]. Основной элемент экспериментальной установки плотномера с вибрационной трубкой DMA HPM фирмы Anton-Paar – это измерительная ячейка, внутри которой имеется вибрационная трубка Hastelloy C-276, изготовленная из сплавов нержавеющей стали на основе никеля, имеющих высокую стойкость к коррозии. Температура в измерительной ячейке поддерживается с точностью 0.01 К и измеряется с помощью платинового термометра сопротивления (ITS-90) Pt100 (Тип 2141) с погрешностью ±15 mK. Давление создается с помощью насоса HIP и измеряется с помощью сенсоров давления P-10 класса точности 0.1 % и HP-1 класса точности 0.5 % от максимально измеренного значения. Сигналы измерителей давлений также передаются на контрольно-вычислительную систему компьютера. Погрешность измерения плотности при данных условиях составила $\Delta\rho/\rho$ = ±(0.01 - 0.03) %. Измерения (p,ρ,T) зависимостей проводились по изотермам от минимально возможного давления для данной температуры, и далее увеличивая его с шагом примерно 10 МПа. Исследования проводились при температурах в интервале T=(274.15 до 413.15) К и давлениях до p=100 МПа. Полученные результаты плотности геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Экспериментальные значения давления *p*/МПа, плотности ρ/кг·м$^{-3}$, температуры *T*/K, вычисленные значения изотермического коэффициента сжимаемости κ_T/МПа$^{-1}$, изобарного коэффициента теплового расширения α_p/K^{-1}, разностей изобарной и изохорной теплоемкостей (c_p-c_v)/Дж·кг$^{-1}$·K^{-1}, термического коэффициента давления γ/МПа·K^{-1}, внутреннего давления p_{int}/МПа, изобарной теплоемкости c_p/Дж·кг$^{-1}$·K^{-1}, изохорной теплоемкости c_p/Дж·кг$^{-1}$·K^{-1}, скорости звука *u*/m·s^{-1} и изоэнтропного расширения κ_s геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

p	ρ	T	κ_T	α_p	c_p-c_v	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
0.101	1002.42	274.15	488.7	-85.7	4.1	-0.1754	-48.2	4073.73	4069.62	1429.41	20279.81
1.000	1002.86	274.15	487.4	-84.0	4.0	-0.1724	-48.3	4069.18	4065.22	1431.02	2053.791
5.032	1004.81	274.13	481.6	-76.8	3.3	-0.1594	-48.7	4048.97	4045.64	1438.12	413.012
10.002	1007.20	274.15	474.6	-67.0	2.6	-0.1413	-48.7	4024.33	4021.75	1446.79	210.798
19.956	1011.91	274.13	461.6	-48.8	1.4	-0.1057	-48.9	3976.18	3974.78	1463.35	108.590
29.957	1016.55	274.16	449.6	-29.7	0.5	-0.0661	-48.1	3929.28	3928.75	1479.31	74.262
39.945	1021.10	274.15	438.6	-11.4	0.1	-0.0260	-47.1	3883.93	3883.85	1494.37	57.085
50.023	1025.59	274.15	428.3	7.3	0.0	0.0171	-45.3	3839.65	3839.62	1508.85	46.676
60.002	1029.95	274.16	418.9	26.0	0.4	0.0621	-43.0	3797.41	3796.98	1522.50	39.788
69.945	1034.21	274.15	410.3	44.5	1.3	0.1085	-40.2	3756.68	3755.40	1535.39	34.856
79.945	1038.40	274.15	402.3	63.5	2.6	0.1577	-36.7	3717.25	3714.61	1547.75	31.115
90.005	1042.52	274.17	394.8	83.1	4.6	0.2104	-32.3	3679.25	3674.65	1559.66	28.177
99.945	1046.50	274.15	388.0	102.2	7.1	0.2634	-27.7	3643.02	3635.97	1570.68	25.835
0.101	1002.67	278.35	481.2	-11.3	0.1	-0.0236	-6.7	4065.39	4065.32	1439.73	20577.84
0.750	1003.05	278.35	480.2	-10.2	0.1	-0.0213	-6.7	4062.34	4062.28	1440.94	2776.661
5.283	1005.12	278.37	473.6	-2.2	0.0	-0.0047	-6.6	4041.22	4041.21	1449.31	399.647
10.232	1007.37	278.39	466.8	6.4	0.0	0.0137	-6.4	4018.53	4018.51	1458.26	209.388
20.227	1012.09	278.37	453.8	22.7	0.3	0.0501	-6.3	3973.92	3973.60	1475.55	108.948
30.013	1016.61	278.36	442.1	38.8	0.9	0.0877	-5.6	3931.65	3930.72	1491.76	75.376
40.183	1021.20	278.35	430.9	55.4	1.9	0.1286	-4.4	3889.21	3887.27	1507.86	57.777
50.011	1025.42	278.37	420.9	72.0	3.3	0.1710	-2.4	3849.69	3846.35	1522.83	47.548
60.157	1029.74	278.38	411.3	88.9	5.2	0.2161	0.0	3810.47	3805.27	1537.56	40.467
69.986	1033.92	278.37	402.8	105.1	7.4	0.2610	2.7	3773.79	3766.40	1551.18	35.545
80.126	1038.13	278.36	394.6	122.0	10.1	0.3092	5.9	3737.44	3727.32	1564.62	31.715
89.997	1042.11	278.36	387.2	138.8	13.3	0.3585	9.8	3703.57	3690.28	1577.17	28.802
99.965	1046.04	278.36	380.2	156.0	17.0	0.4102	14.2	3670.87	3653.85	1589.32	26.432
0.101	1002.71	283.32	473.3	68.5	2.8	0.1447	40.9	4057.64	4054.84	1452.20	20932.88
0.712	1002.99	283.30	472.4	69.1	2.9	0.1462	40.7	4055.04	4052.19	1453.33	2974.886
4.584	1004.79	283.30	466.9	74.7	3.4	0.1600	40.7	4038.52	4035.15	1460.72	467.628
10.079	1007.27	283.31	459.3	82.8	4.2	0.1803	41.0	4015.47	4011.27	1471.02	216.241
20.606	1012.05	283.31	445.7	97.9	6.0	0.2196	41.6	3972.59	3966.57	1490.06	109.043
29.985	1016.18	283.32	434.6	111.4	8.0	0.2563	42.6	3935.76	3927.80	1506.36	76.901
40.157	1020.59	283.33	423.3	125.9	10.4	0.2975	44.1	3897.27	3886.87	1523.35	58.981
49.977	1024.82	283.33	413.3	139.9	13.1	0.3384	45.9	3861.50	3848.42	1539.08	48.575
60.101	1029.09	283.33	403.8	154.2	16.2	0.3819	48.1	3826.15	3809.94	1554.63	41.383
70.015	1033.19	283.33	395.1	168.3	19.7	0.4260	50.7	3792.90	3773.23	1569.30	36.341
79.927	1037.18	283.34	387.0	182.7	23.6	0.4720	53.8	3761.10	3737.54	1583.46	32.537
90.030	1041.20	283.34	379.3	197.3	27.9	0.5202	57.4	3730.10	3702.17	1597.31	29.507
99.758	1044.99	283.34	372.4	211.5	32.6	0.5681	61.2	3701.65	3669.07	1610.15	27.159
0.101	1001.16	293.14	461.2	203.5	26.3	0.4412	129.2	4047.21	4020.92	1476.40	21607.16
0.541	1001.35	293.20	460.5	204.7	26.6	0.4445	129.8	4045.55	4018.91	1477.45	4040.378
5.414	1003.58	293.18	453.7	209.3	28.2	0.4614	129.9	4028.09	3999.88	1487.24	410.017
10.189	1005.74	293.14	447.2	213.6	29.7	0.4776	129.8	4011.25	3981.52	1496.62	221.100
20.026	1010.10	293.14	434.6	223.3	33.3	0.5139	130.6	3977.54	3944.23	1515.62	115.869
29.987	1014.41	293.14	422.8	233.1	37.2	0.5515	131.7	3944.75	3907.60	1534.17	79.625
40.170	1018.72	293.14	411.6	243.1	41.3	0.5907	133.0	3912.61	3871.28	1552.46	61.125
50.004	1022.80	293.13	401.6	252.7	45.6	0.6292	134.4	3882.84	3837.28	1569.49	50.389
60.421	1027.03	293.13	391.7	262.9	50.4	0.6711	136.3	3852.77	3802.41	1586.91	42.808
70.041	1030.87	293.12	383.3	272.3	55.0	0.7104	138.2	3826.18	3771.18	1602.44	37.796
80.329	1034.91	293.12	374.8	282.5	60.3	0.7537	140.6	3799.09	3738.79	1618.54	33.752
89.997	1038.63	293.12	367.3	292.1	65.6	0.7952	143.1	3774.87	3709.31	1633.18	30.784
99.932	1042.40	293.13	360.1	302.2	71.3	0.8391	146.0	3751.28	3679.97	1647.80	28.324

Продолжение таблицы 2

p	ρ	T	κ_T	α_p	c_p-c_v	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
0.101	1000.00	298.15	456.7	262.5	45.0	0.5748	171.3	4043.79	3998.81	1487.99	21922.00
1.023	1000.42	298.15	455.4	263.2	45.4	0.5780	171.3	4040.72	3995.37	1489.91	2170.823
5.002	1002.21	298.14	449.8	266.3	46.9	0.5920	171.5	4027.52	3980.63	1498.12	449.692
10.006	1004.44	298.15	443.0	270.3	49.0	0.6102	171.9	4011.22	3962.26	1508.34	228.386
19.985	1008.82	298.15	430.2	278.1	53.1	0.6464	172.7	3979.71	3926.58	1528.11	117.878
29.935	1013.10	298.13	418.5	285.6	57.4	0.6826	173.6	3949.58	3892.20	1547.09	81.006
39.958	1017.33	298.16	407.4	293.7	62.1	0.7209	175.0	3920.56	3858.50	1565.69	62.412
50.001	1021.48	298.15	397.2	301.4	66.8	0.7589	176.3	3892.70	3825.93	1583.61	51.231
59.975	1025.52	298.15	387.7	309.2	71.7	0.7975	177.8	3866.27	3794.58	1600.85	43.817
69.938	1029.46	298.15	378.9	317.0	76.8	0.8365	179.5	3841.18	3764.38	1617.47	38.506
80.003	1033.36	298.14	370.6	324.8	82.1	0.8764	181.3	3816.95	3734.82	1633.74	34.472
89.957	1037.12	298.15	362.8	332.7	87.7	0.9170	183.5	3794.26	3706.54	1649.38	31.362
99.957	1040.82	298.15	355.6	340.7	93.5	0.9582	185.7	3772.64	3679.10	1664.59	28.850
0.101	994.92	313.15	449.3	408.5	116.9	0.9091	284.6	4039.67	3922.78	1517.75	22691.79
1.002	995.32	313.16	448.0	408.8	117.3	0.9124	284.7	4037.23	3919.89	1519.74	2294.229
5.004	997.10	313.15	442.4	409.6	119.1	0.9258	284.9	4026.52	3907.44	1528.43	465.494
10.003	999.28	313.14	435.6	410.6	121.3	0.9426	285.1	4013.40	3892.13	1539.12	236.652
19.985	1003.56	313.15	422.8	412.9	125.8	0.9765	285.8	3988.10	3862.29	1559.94	122.199
29.935	1007.73	313.15	411.0	415.2	130.3	1.0102	286.4	3964.00	3833.68	1579.99	84.040
40.003	1011.83	313.17	399.9	417.7	135.0	1.0445	287.1	3940.76	3805.72	1599.65	64.726
49.957	1015.82	313.15	389.7	420.0	139.5	1.0777	287.5	3918.79	3779.26	1618.38	53.260
59.985	1019.75	313.15	380.1	422.5	144.2	1.1115	288.1	3897.73	3753.53	1636.69	45.541
70.006	1023.60	313.15	371.2	425.1	148.9	1.1452	288.6	3877.72	3728.79	1654.42	40.023
79.958	1027.36	313.13	362.9	427.6	153.6	1.1783	289.0	3858.85	3705.30	1671.40	35.895
89.924	1031.03	313.15	355.0	430.4	158.4	1.2122	289.7	3841.02	3682.57	1688.00	32.670
99.995	1034.69	313.15	347.6	433.1	163.4	1.2461	290.2	3823.93	3660.59	1704.22	30.053
0.101	985.35	333.15	451.5	552.3	228.4	1.2232	407.4	4048.91	3820.50	1543.44	23240.36
0.578	985.55	333.17	450.8	552.2	228.7	1.2249	407.5	4047.89	3819.22	1544.53	4067.630
5.245	987.62	333.15	444.1	550.2	230.0	1.2390	407.5	4037.85	3807.88	1554.97	455.284
10.367	989.85	333.15	437.0	548.2	231.5	1.2546	407.6	4027.12	3795.62	1566.23	234.219
20.034	993.97	333.15	424.3	544.6	234.3	1.2836	407.6	4007.57	3773.25	1586.91	124.942
29.991	998.11	333.15	412.2	541.2	237.1	1.3127	407.3	3988.38	3751.26	1607.47	85.995
40.465	1002.37	333.15	400.5	537.7	240.0	1.3427	406.9	3969.19	3729.22	1628.31	65.679
50.003	1006.15	333.15	390.5	534.7	242.5	1.3694	406.2	3952.57	3710.12	1646.64	54.559
60.034	1010.05	333.15	380.7	531.8	245.0	1.3968	405.3	3935.96	3690.97	1665.27	46.657
70.016	1013.85	333.15	371.6	528.9	247.4	1.4234	404.2	3920.27	3672.87	1683.18	41.024
80.153	1017.64	333.15	362.9	526.2	249.8	1.4499	402.9	3905.18	3655.42	1700.76	36.725
89.990	1021.24	333.15	355.0	523.7	252.0	1.4749	401.4	3891.34	3639.38	1717.24	33.465
99.871	1024.80	333.15	347.6	521.2	254.1	1.4995	399.7	3878.20	3624.13	1733.25	30.826
0.101	973.43	353.15	464.9	660.1	340.0	1.4198	501.3	4076.85	3736.84	1552.66	23234.49
1.003	973.84	353.15	463.5	659.3	340.0	1.4223	501.3	4075.15	3735.11	1554.71	2346.818
5.006	975.64	353.14	457.4	655.6	340.1	1.4332	501.1	4067.64	3727.55	1563.74	476.568
10.004	977.85	353.15	450.1	651.2	340.2	1.4467	500.9	4058.58	3718.34	1574.74	242.389
19.957	982.16	353.16	436.5	642.7	340.3	1.4726	500.1	4041.20	3700.87	1595.99	125.356
30.002	986.42	353.15	423.7	634.5	340.2	1.4974	498.8	4024.53	3684.37	1616.58	85.922
40.004	990.56	353.13	412.0	626.6	339.8	1.5210	497.1	4008.77	3668.99	1636.28	66.297
49.957	994.57	353.15	401.1	619.2	339.4	1.5437	495.2	3993.99	3654.59	1655.11	54.537
60.008	998.53	353.15	390.9	611.9	338.8	1.5653	492.8	3979.80	3641.05	1673.41	46.597
69.959	1002.38	353.15	381.5	604.9	337.9	1.5856	490.0	3966.56	3628.64	1690.76	40.959
80.004	1006.19	353.15	372.6	598.0	336.9	1.6051	486.8	3953.93	3617.02	1707.62	36.673
89.924	1009.87	353.15	364.4	591.4	335.7	1.6232	483.3	3942.17	3606.44	1723.60	33.363
99.957	1013.53	353.15	356.5	584.9	334.4	1.6405	479.4	3930.98	3596.63	1739.13	30.668
0.101	959.79	373.15	488.0	748.0	445.7	1.5327	571.8	4122.07	3676.36	1547.16	22747.15
0.554	960.03	373.10	487.2	747.2	445.3	1.5336	571.6	4121.11	3675.81	1548.21	4153.741
5.293	962.20	373.15	479.5	740.9	443.9	1.5450	571.2	4112.77	3668.86	1558.71	441.666
10.421	964.57	373.12	471.4	733.9	441.9	1.5567	570.4	4103.79	3661.86	1569.85	228.108
20.141	968.90	373.17	457.2	721.6	438.6	1.5782	568.8	4087.77	3649.19	1590.17	121.643
30.022	973.24	373.15	443.8	709.3	434.7	1.5983	566.4	4072.21	3637.56	1609.98	84.028
40.013	977.51	373.13	431.3	697.4	430.5	1.6172	563.4	4057.42	3626.91	1629.03	64.831
49.978	981.67	373.13	419.7	686.1	426.3	1.6346	559.9	4043.57	3617.31	1647.15	53.291

Продолжение таблицы 2

p	ρ	T	κ_T	α_p	c_p-c_v	γ	p_{int}	c_p	c_v	u	κ_s
60.089	985.79	373.13	408.8	674.9	421.7	1.6508	555.9	4030.36	3608.61	1664.69	45.463
69.996	989.73	373.15	399.0	664.4	417.2	1.6654	551.4	4018.24	3601.07	1681.05	39.958
80.116	993.67	373.17	389.6	653.9	412.3	1.6787	546.3	4006.63	3594.36	1696.97	35.717
90.040	997.49	373.15	380.9	643.8	407.1	1.6902	540.7	3995.88	3588.78	1711.86	32.464
99.916	1001.22	373.13	372.9	634.0	401.7	1.7003	534.5	3985.86	3584.13	1725.98	29.851
0.199	944.80	393.15	520.6	829.1	549.4	1.5924	625.9	4181.19	3631.81	1529.84	11111.92
1.005	945.20	393.15	519.1	827.6	548.7	1.5941	625.7	4179.58	3630.88	1531.63	2206.323
5.053	947.18	393.14	511.8	820.0	545.3	1.6021	624.8	4171.60	3626.35	1540.47	444.830
10.009	949.56	393.15	503.2	811.0	541.1	1.6116	623.6	4162.19	3621.07	1551.00	228.223
20.005	954.27	393.16	487.0	793.5	532.7	1.6294	620.6	4144.14	3611.46	1571.38	117.787
30.006	958.86	393.15	472.1	776.8	524.0	1.6454	616.9	4127.21	3603.18	1590.69	80.858
40.007	963.32	393.17	458.5	760.9	515.4	1.6596	612.5	4111.47	3596.10	1608.91	62.330
49.968	967.68	393.15	445.9	745.6	506.4	1.6719	607.3	4096.72	3590.31	1626.10	51.208
60.003	971.97	393.15	434.3	730.7	497.3	1.6825	601.5	4082.89	3585.61	1642.45	43.699
69.986	976.12	393.17	423.6	716.4	488.1	1.6913	595.0	4070.14	3582.06	1657.71	38.328
79.936	980.21	393.15	413.7	702.5	478.6	1.6983	587.8	4058.22	3579.66	1672.09	34.285
89.957	984.23	393.15	404.4	688.9	468.8	1.7036	579.8	4047.11	3578.31	1685.68	31.090
99.938	988.16	393.15	395.8	675.7	458.9	1.7069	571.1	4036.87	3578.02	1698.35	28.521
0.362	928.57	413.13	564.3	917.8	664.1	1.6264	671.6	4255.70	3591.59	1503.75	5800.485
1.098	928.94	413.15	562.8	916.0	663.1	1.6276	671.4	4253.89	3590.79	1505.33	1917.123
5.396	931.17	413.16	553.9	905.4	656.6	1.6345	669.9	4243.10	3586.51	1514.51	395.823
10.504	933.81	413.13	543.8	892.9	648.7	1.6421	667.9	4230.57	3581.91	1525.15	206.790
20.138	938.59	413.19	526.2	870.8	634.5	1.6550	663.7	4208.66	3574.19	1544.10	111.123
30.037	943.45	413.16	509.6	849.0	619.5	1.6661	658.3	4187.43	3567.96	1562.47	76.679
40.164	948.28	413.13	494.0	827.7	604.2	1.6754	652.0	4167.30	3563.13	1580.02	58.941
50.021	952.85	413.12	480.3	808.0	589.4	1.6823	645.0	4149.18	3559.82	1595.93	48.517
59.954	957.35	413.11	467.5	788.9	574.4	1.6873	637.1	4132.23	3557.85	1610.86	41.435
69.972	961.76	413.13	455.8	770.3	559.3	1.6901	628.3	4116.47	3557.19	1624.78	36.285
79.903	966.05	413.16	445.1	752.5	544.2	1.6908	618.7	4102.01	3557.83	1637.54	32.421
89.994	970.34	413.15	435.0	734.8	528.5	1.6893	608.0	4088.41	3559.86	1649.52	29.338
100.021	974.55	413.12	425.7	717.6	512.8	1.6856	596.4	4075.95	3563.20	1660.47	26.865

Плотность и скорость звука при атмосферном давлении были измерены с помощью высокоточной установки DSA 5000M компании Anton Paar, Австрия [13]. DSA 5000M отлично зарекомендовала себя своими измерительными способностями и необычайно высокой уровнем надежности и комфортности для пользователя. Новые возможности обеспечивают полную уверенность в правильности заполнения и качестве получаемых результатов. Перед измерениями установка тщательно промывается с помощью воды и ацетона и продувается воздухом для осушения. Потом в дисплее DSA 5000M контролируется плотность и скорость звука воздуха при температуре окружающей среды, так как измерительная трубка имеет контакты с окружающей средой. После этого выбирается необходимый режим измерения. Метод измерения плотности приведен в [13].

Для определения скорости звука измеряется распределения звука с вычислением периода вибрации акустической ячейки. Волны звука с определенными частотами передается от одного ультразвукового передатчика, а на другой стороны принимается с помощью другого датчика. При наличии дистанции между обоими передатчиками, а также частоты звуковых волн, можно вычислить скорости звука с помощью нижеследующего уравнение:

$$v = \frac{\text{реальная растояния} \cdot (1+1.6\text{E-}5 \cdot \Delta_{\text{темп}})}{\dfrac{\text{Ps}}{\text{разделительный коэффициент}} - \text{TAU} \cdot f_3} \qquad (1)$$

здесь: реальная длина – реальная длина звуковых волн (примерно 5000 μm), $\Delta_{\text{темп}}$ – погрешность температуры при T=293.15 K, Ps – период принимающих звуковых волн, разделительный коэффицент – 512, TAU – постоянная установки, f_3 – коэффициент коррекции температуры. Коэффициенты TAU и f_3 секреты установки DSA 5000M фирмы Anton-Paar.

С помощью установки DSA 5000M можно измерить скорость звука в веществе при температурах 278.15 – 343.15 K, в интервале скорости звука 1000 - 2000 $m \cdot s^{-1}$ и с погрешностью 0.1 $m \cdot s^{-1}$. Как отметилась уже, во время подготовки пробы для измерения (кроме химического анализа), все растворимые газы были удалены из нее с помощью вакуума. Потому что, растворенные газы отделаются при высоких температурах и играют негативную роль для измерения теплофизических свойств. Потом с помощью шприца измеренная проба вводиться в установку.

Точность измерения для плотности была ± 0.000005 г/см^3, а для скорости звука ± 0.5 м/с. Полученные результаты плотности ρ/кг·м$^{-3}$ и скорость звука u/$m \cdot s^{-1}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при атмосферном давлении и температурах T=(278.15 – 343.172) К представлены в таблице 3, приведены на рисунках 1 и 2.

Таблица 3.

Экспериментальные значения температуры T/K, плотности ρ/кг·м$^{-3}$, вычисленные значения разности от плотности чистой воды IAPWS-95 (ρ-ρ_w)/kq·m^{-3}, дифференциала удельного объема от температуры (dv/dT)/m^3·kg^{-1}·K^{-1}, изобарного коэффициента теплового расширения $\alpha_p \cdot 10^6$/K^{-1}, скорости звука u/m·s^{-1}, адиабатического сжимаемости $\kappa_s \cdot 10^6$/MPa^{-1} геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

T	ρ	ρ- ρ_w	dv/dT	α_p	u	κ_s
278.131	1003.002	2.99	1.8093E-08	18.1	1435.67	483.71
283.151	1002.698	3.04	8.2628E-08	82.9	1451.22	473.54
293.141	1001.099	2.94	2.0050E-07	200.7	1479.71	456.22
298.150	999.902	2.88	2.5432E-07	254.3	1492.60	448.91
313.181	995.103	2.84	3.9462E-07	392.7	1524.74	432.26
333.181	986.010	2.82	5.3199E-07	524.5	1549.36	422.49
343.172	980.502	2.79	5.7952E-07	568.2	1552.47	423.16

При атмосферном давлении полученные значения плотности сравнивались со значениями плотности, измеренными на установке DSA 5000M. Полученные разными методами данные хорошо согласуются между собой в пределах $\Delta\rho/\rho$ = ±0.02 %.

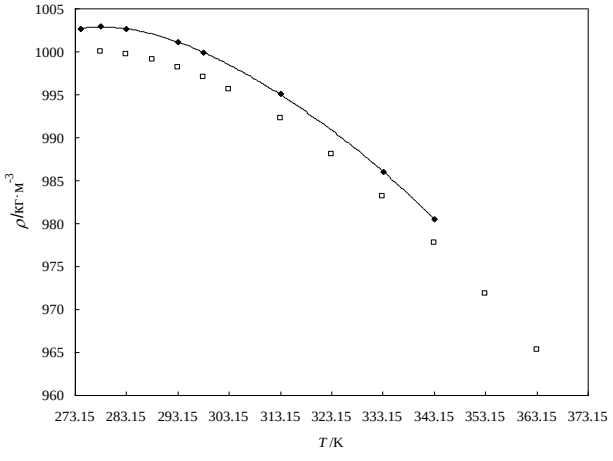


Рис. 2. Зависимость плотности ρ/(кг·м$^{-3}$) термальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана от температуры T/K: (◆, «Исти Ибади»; □, IAPWS-95 чистая вода [14]).

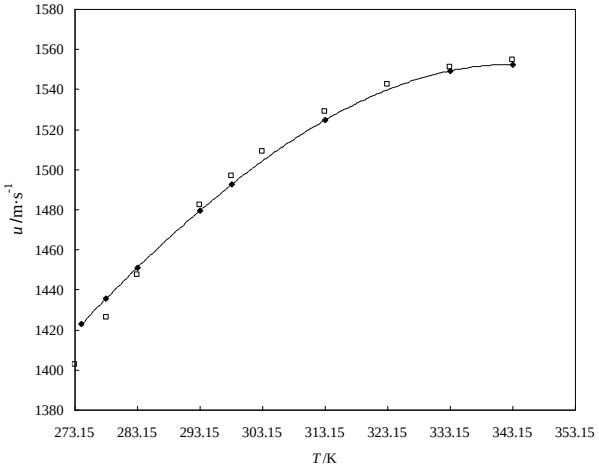


Рис. 3. Зависимость скорости звука u/m·s^{-1} термальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана от температуры T/K: (◆, «Исти Ибади»; □, IAPWS-95 чистая вода [14]).

Изобарная теплоемкость $c_p(p_0,T)$/Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при атмосферном давления и температурах T=(274.15 - 373.15) К, при давления насыщения и температурах T=(383.15 - 413.15) К были измерены с помощью адиабатического калориметра [15]. Полученные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Экспериментальные значения изобарной теплоемкости $c_p(p_0,T)$/Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при атмосферном давления и температурах T=(274.15 - 373.15) К, при давления насыщения и температурах T=(383.15 - 413.15) К.

T/К	$c_p(p_0,T)$
274.15	4074.01
278.15	4065.41
283.15	4057.92
293.15	4047.18
298.15	4042.72
303.15	4040.40
313.15	4038.26
323.15	4042.72
333.15	4049.50
343.15	4061.92
353.15	4076.56
363.15	4098.10
373.15	4121.52
383.15	4148.02
393.15	4182.03
403.15	4216.90
413.15	4255.96

Эксперименты по определению давления насыщенных паров геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана были проведены в лаборатории кафедры «Техническая термодинамика» Ростокского университета Германии на двух различных установок [16]:

- при T=(274.15 - 323.15) К - реализующий абсолютный и дифференциальный статический метод,
- при T=(323.15 - 413.15) К - реализующий абсолютный статический метод.

Полученные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Экспериментальные значения температуры T/К и давления насыщенных паров P/Па геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

T/К	P/Па	T/К	P/Па
274.17	809	343.15	35500
278.15	1069	353.15	53414
283.10	1492	363.15	78341
294.24	3012	373.15	112265
303.57	5179	383.15	157510
313.30	8760	393.15	216755
323.06	14304	403.15	293039
333.15	22939	413.15	389765

Эксперименты по определению динамической вязкости геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана были проведены с погрешностью 0.35 % на установке SVM 3000 Stabinger производства Австрии [17] в лаборатории «Техническая Термодинамика» Ростокского Университета Германии. Полученные данные приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Экспериментальные значения температуры *T*/K, динамической $\mu \cdot 10^6$/Pa·s и кинематической $\nu \cdot 10^6/m^2 \cdot s^{-1}$ вязкости геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

T	μ	ν	T	μ	ν
274.153	1.7313	1.72663	313.154	0.71246	0.71603
278.147	1.6042	1.59960	323.151	0.5520	0.55709
283.152	1.3579	1.35427	333.152	0.4710	0.47766
293.151	1.1067	1.10542	343.151	0.4082	0.41632
298.155	0.94988	0.94993			

Описание результатов исследование: Экспериментальные исследования проводиться в определенном интервале параметров состояния. Чтобы определить их ни свойства в любом значение этих состояний, нужно описывать экспериментальных значений с помощью уравнений состояния. Полученные результаты (p,ρ,T) зависимости геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при высоких давления и различных температурах были описаны следующим уравнением состояния [18]:

$$p/\text{МПа} = A(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^2 + B(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^8 + C(\rho/\text{г}\cdot\text{см}^{-3})^{12}, \quad (2)$$

здесь коэффициенты $A(T)$, $B(T)$ и $C(T)$ в уравнение (2) являются функциями температуры.

$$A(T) = \sum_{i=1}^{4} a_i T^i, \quad B(T) = \sum_{i=0}^{3} b_i T^i, \quad C(T) = \sum_{i=0}^{3} c_i T^i. \quad (3)$$

Полученные коэффициенты a_i, b_i и c_i в уравнение (3) представлены в таблице 7. Уравнения (2) и (3) хорошо описывают экспериментальные данные плотности измеренной пробы ±0.0049 %.

Таблица 7.

Значения коэффициентов a_i, b_i и c_i в уравнении (3).

a_i	b_i	c_i
$a_1 = -4.170289257$	$b_0 = 5791.3245545$	$c_0 = -2847.32627321$
$a_2 = 0.0164753649$	$b_1 = -43.94208988658$	$c_1 = 20.4246041544$
$a_3 = -0.378625567 \cdot 10^{-4}$	$b_2 = 0.1189249504$	$c_2 = -0.047513642$
$a_4 = 0.38644559781 \cdot 10^{-7}$	$b_3 = -0.98716093 \cdot 10^{-4}$	$c_3 = 0.306797841 \cdot 10^{-4}$

Зависимость разности экспериментальной плотности ρ_{exp}/кг·м$^{-3}$ от вычисленной с помощью уравнения состояния ρ_{cal}/кг·м$^{-3}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана от давления p/МПа показана на рис. 4.

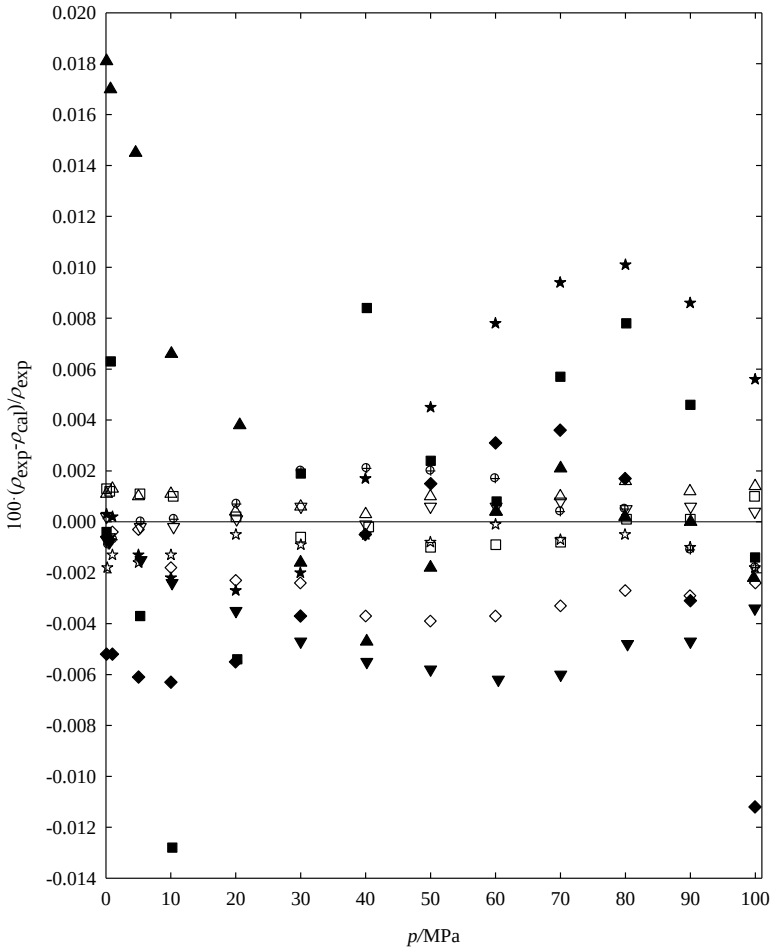


Рис.2: Зависимость разности экспериментальной плотности ρ_{exp}/кг·м$^{-3}$ от вычисленной с помощью уравнения состояния ρ_{cal}/кг·м$^{-3}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана от давления *p*/МПа: ◆, 274.15 K; ■, 278.36 K; ▲, 283.32 K; ▼, 293.14 K; ★, 298.15 K; ◇, 313.15 K; □, 333.15 K; △, 353.15 K; ▽, 373.14 K; ☆, 393.15 K; ⊕, 413.14 K.

Полученные данные плотности ρ/кг·м$^{-3}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при атмосферном давлении и температурах T=(278.15 – 363.15) К описаны в зависимости от температуры T/К с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$\rho = \sum_{i=0}^{4} d_i T^i , \qquad (4)$$

где: d_i - коэффициенты уравнение (4) и приведены в таблице 8.

Таблица 8.

Значения коэффициентов d_i в уравнении (4).

d_0	d_1	d_2
- 5479.14464858081	80.3506472850564	- 0.373248932619184
d_3	d_4	$\delta\rho/\rho$, %
$0.772914086460691\cdot10^{-3}$	$-0.60529403148046\cdot10^{-6}$	

Изобарический коэффициент термического расширения $\alpha_p\cdot10^6$/К$^{-1}$ для геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана была вычислена, с использованием нижеследующего термодинамического равновесия и также приведены в таблице 3:

$$\alpha_p = \frac{1}{v}\left(\frac{dv}{dT}\right)_p , \quad (5)$$

где: $v = \frac{1}{\rho}$, ($м^3 \cdot кг^{-1}$) специфический объем измеренного вещества.

Полученные данные скорости звука u/m·s^{-1} геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана в зависимости от температуры T/K при атмосферном давлении и температурах T=(278.15 – 343.27) К также описаны с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$u = \sum_{i=0}^{3} e_i T^i , \quad (6)$$

где: e_i - коэффициенты уравнения (6) приведены в таблице 9.

Таблица 9. Значения коэффициентов e_i в уравнении (6).

e_0	e_1	e_2	e_3
1710.39401740476	- 13.2893744923727	0.0735026204627127	$-0.10524883704699 \cdot 10^{-3}$

Полученные данные изобарной теплоемкости $c_p(p_0,T)$/Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана при атмосферном давления и температурах T=(274.15 - 373.15) K, при давления насыщения и температурах T=(373.15 - 413.15) K, также описаны с помощью полиномиального уравнения в нижеследующей форме:

$$c_p = \sum_{i=0}^{4} f_i T^i , \quad (7)$$

где: e_i - коэффициенты уравнения (7) приведены в таблице 10.

Таблица 10.

Значения коэффициентов f_i уравнение для описания экспериментальных значений изобарной теплоемкости c_{p0}/Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$ геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

f_0	f_1	f_2
8800.36522741802	42.8008975482715	0.141117327423316
f_3	f_4	$\delta c_{p_0}/c_{p_0}$, %
$-0.213006706858798 \cdot 10^{-3}$	$0.13979126622932 \cdot 10^{-6}$	0.0124

Полученные данные давления насыщенных паров P/Pa геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана были описаны с помощью уравнения Антуана в нижеследующей форме:

$\ln P$ = A-B/(T+C). (8)

здесь: P – давление пара в Pa, T – абсолютная температура в K, A, B и C – коэффициенты, которые приведены в таблице 11 вместе с погрешностью описания экспериментальных данных, которые были рассчитаны по формуле:

$$\delta p/p = (100/n) \cdot \sum_{i=1}^{n} \left[(P_{экс.} - P_{рас.})/P_{экс.} \right]. \quad (9)$$

где, $P_{экс}$ – экспериментальное давления насыщения, $P_{рас}$ – рассчитанная давления насыщения с помощью уравнении (8).

Таблица 11.

Значения коэффициентов *A, B, C* уравнение Антуана для описания экспериментальных значений давления насыщенных паров *P*/Pa геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

A	B	C	$\delta P/P$, %
23.1428	3799.91	-43.1289	0.0054

Полученные данные динамической вязкости $\mu \cdot 10^6$/Pa·s геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана были описаны с помощью уравнения в нижеследующей форме:

$$\ln(\mu) = \sum_{i=0}^{2} \frac{h_i}{(T - 43.15)^i}, \qquad (10)$$

где: h_i - коэффициенты уравнения (10) приведены в таблице 12.

Таблица 12.

Значения коэффициентов h_i уравнение для описания экспериментальных значений динамической вязкости $\mu \cdot 10^6$/Pa·s геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана.

h_0	h_1	h_2	$\delta\mu/\mu$, %
-2.58670181477147	-131.735954148249	199393.415004224	2.9875

Теплофизические свойства геотермальной воды «Исти Ибади» Ленкеранского района Азербайджана были исследованы впервые, поэтому сравнение их с литературными данными не представляются возможным. Полученные данные были сопоставлены с теплофизическими свойствами чистой воды и выявлено, что поведение исследованных свойств имеют схожие с водой известные аномалии.

Литература:

1. Государственная Программа по использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии в Азербайджанской Республике. Баку, 2004.
2. Гашкай М.А. Минеральные источники Азербайджана. Баку, 1952, 503 стр.
3. Тагиев И.И., Ибрагимова И.Ш., Бабаев А.М. Ресурсы минеральных и термальных вод Азербайджана. Баку, Чашыоглы, 2001, 168 стр.
4. GoMap, Online navigator.
5. http://www.thermoscientific.com
6. Талыбов, М.А. Химический состав (Катионы) геотермальных, минеральных и питьевых вод Ярдымлинского района Азербайджана, Мониторинг. Наука и технологии», 2012, №1 (10), 48-53.
7. DX-120 ion chromatograph operator's manual, ThermoFischer, 1998, 162 p.
8. Талыбов, М.А. Анализ анионов геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана, Журнал Научных трудов АзТУ, 2016, в печати.
9. Kratky, O., Leopold, H., Stabinger, H. H. Dichtemessungen an Flüssigkeiten und Gasen auf 10^{-6} g/cm^3 bei 0.6 cm^3 Präparatvolumen, *Z. Angew. Phys.*, 1969, *27*, 273-277.
10. Shahverdiyev, A.N., Safarov, J.T., Talibov, M.A., Aliyev, F.Sh. Vibration tube densimeter method for the measurements of (*p,ρ,T*) properties, Journal of Fundamental Sciences of Azerbaijan Technical University 2006, 5, 19, 21-22.
11. Abdulagatov, I. M., Aliyev, F. Safarov, J., Talibov, M., Shahverdiyev, A., Hassel, E. (*p,ρ,T*) Properties of 1-Propanol, Fluid Phase Equilibria 2008, 268, 21-33.

12. Safarov, J., Millero F.J., Feistel, R., Heintz, A. Hassel, E. Thermodynamic properties of standard seawater: extensions to high temperatures and pressures, Ocean Science 2009, 5, 235-246.
13. Талыбов, М.А. Плотность геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана, "Известия" НАН Азербайджана, Физика и астрономия, 2014, 34, 2, 130-136.
14. Wagner, W., Pruß, A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, Journal of Physical Chemistry Referent Data 2002 31, 387-535.
15. Талыбов, М.А. Изобарная теплоемкость алифатических спиртов и их бинарных смесей при высоких давлениях//Автореферат диссертации кандидата технических наук, 1996, 22 стр., Баку, АЗЕРБАЙДЖАН.
16. Талыбов, М.А. Давление насыщенных паров геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана, Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т.17, № 2, **114-118.**
17. Талыбов, М.А. Измерения вязкости геотермальных и минеральных вод Ярдымлинского района Азербайджана, Научно-технический журнал, Мониторинг, Наука и Технологии, 2014, №1 (18), стр. 82-89.

О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ ЖЕЛЕЗА ПРИ *P-T*-УСЛОВИЯХ ЯДРА ЗЕМЛИ

Магомедов М.Н.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля, д. 39а; e-mail: mahmag4@mail.ru

Исходя из парного межатомного потенциала Ми-Леннард-Джонса, получены уравнение состояния и барические зависимости теплофизических свойств для ОЦК и ГЦК фаз железа, работоспособные при высоких *P-T*-условий, присущих ядру Земли. Рассчитанная барическая зависимость температуры плавления для ГЦК и ГПУ фаз железа показала хорошее согласие с оценками других авторов. Показано, что общепринятое сейчас значение температуры на границе нижней мантии и внешнего ядра существенно ниже, чем температура плавления железа при давлении 1350 kbar.

Введение. При низких давлениях ($P \cong 0$) твердое железо может существовать в трех кристаллических модификациях [1-7]:

при температурах $T \leq 1185$ K стабильна фаза α-Fe с объемно центрированной кубической (ОЦК) структурой: $k_n = 8$, $k_p = 0.6802$, где k_n – первое координационное число, k_p – коэффициент упаковки структуры;

при 1185 K $\leq T \leq$ 1667 K стабильна фаза γ-Fe с гранецентрированной кубической (ГЦК) структурой: $k_n = 12$, $k_p = 0.7405$;

при 1667 K $\leq T \leq T_m = 1811$ K стабильна фаза δ-Fe с ОЦК структурой.

При изотермическом росте давления ОЦК-α-Fe переходит либо (при $T \leq 753$ K) в ε-фазу с гексагональной плотно упакованной (ГПУ) структурой, либо в ГЦК-γ-Fe. Тройная точка α-γ-Fe имеет координаты: $P = 105$ kbar, $T = 753$ K [6]; $P = 82 \pm 1$ kbar, $T = 678$ K [7]. При сжатии фазы ОЦК-δ-Fe она переходит в ГЦК-γ-Fe.

Зависимость свойств различных фаз железа от давления изучается уже давно, но и до сих осталась неясной зависимость решеточных свойств от величины гидростатического (всестороннего) давления (P) вдоль различных изотерм при высоких давлениях (при $P > 1000$ kbar = 100 GPa). Используемые для изучения, как уравнения состояния, так и свойств железа различные (как численные, так и аналитические) методы содержат в своем формализме под-

гоночные константы, которые лишены физического смысла, и поэтому предсказать их барическую зависимость вдоль изотермы при высоких давлениях очень затруднительно. Кроме этого такие методы дают результат только в численно-графическом виде, что делает эти результаты не удобными для дальнейших приложений. Между тем большое количество прикладных задач нуждаются в ясных аналитических зависимостях свойств от давления. В частности, для построения модели Земли необходимы аналитические зависимости свойств различных кристаллических модификаций железа от давления и температуры. В данной работе получены как уравнение состояния, так и барические зависимости решеточных свойств для ОЦК и ГЦК фаз железа, работоспособные при *P*-*T*-условиях ядра Земли, т.е. до $P \le 4000$ kbar = 400 GPa и $T \le 6000$ K. Используя эти результаты нами были оценены температуры плавления на границе нижняя мантия-внешнее ядро (раздел Gutenberg: глубина 2900 км, где P = 1350 kbar) и на границе внешнее-внутреннее ядро (раздел Lehmann: глубина 5100 км, где P = 3300 kbar).

1. Методика расчета. Представим парное межатомное взаимодействие в виде потенциала Ми–Леннард–Джонса, имеющего вид [8, гл. 3]:

$$\varphi(r) = \frac{D}{(b-a)}\left[a\left(\frac{r_o}{r}\right)^b - b\left(\frac{r_o}{r}\right)^a \right], \qquad (1)$$

где D и r_o – глубина и координата минимума потенциала, $b > a > 1$ – численные параметры.

Тогда температуру Дебая можно определить в виде [8, гл. 2; 9]:

$$\Theta = A_w\, \xi\left[-1+\left(1+\frac{8D}{k_B A_w\, \xi^2} \right)^{1/2} \right], \qquad (2)$$

где $k_B = 1.3807\times10^{-23}$ J/K – постоянная Больцмана, функция A_w возникает из-за учета энергии «нулевых колебаний» атомов:

$$A_w = K_R \frac{5k_n ab(b+1)}{144(b-a)}\left(\frac{r_o}{c}\right)^{b+2},\ K_R = \frac{\hbar^2}{k_B {r_o}^2 m},\ \xi = \frac{9}{k_n}, \qquad (3)$$

m – масса атома, $\hbar = 1.0546\times10^{-34}$ J·s – постоянная Планка, $c = [6\, k_p\, V / (\pi\, N)]^{1/3}$ – расстояние между центрами ближайших атомов, V и N – объем и число атомов в данном объеме кристалла.

Тогда, используя модель кристалла Эйнштейна (независимые гармонические осцилляторы) и приближение «взаимодействия только ближайших соседей», для удельной свободной энергии Гельмгольца можно принять [10]:

$$\frac{F}{N} = \left(\frac{k_n}{2}\right) D\cdot U(R) + 3k_B\Theta_E\left\{ \left(\frac{1}{2}\right) + \left(\frac{T}{\Theta_E}\right) \ln\left[1-\exp\left(-\frac{\Theta_E}{T} \right) \right] \right\}, \qquad (4)$$

где Θ_E – это температура Эйнштейна, которая связана с температурой Дебая: $\Theta = (4/3)\Theta_E$, функция потенциальной энергии, в соответствии с (1), имеет вид:

$$U(R) = \frac{aR^b - bR^a}{b-a},$$

где $R = r_o/c$ – линейная относительная плотность кристалла.

Исходя из выражений (2)-(4) можно рассчитать решеточные свойства кристалла простого одноатомного вещества при данных значениях V/N и T, если известны параметры потенциала (1) и структура кристалла. Именно таким путем нами были рассчитаны как уравнение состояния, так и барические зависимости для ОЦК-Fe [10], ГЦК-Fe [11], алмаза [12] и различных кристаллических модификаций кремния и германия [13]. В данной работе мы изучим свойства железа в области высоких давлений и температур, присущих ядру Земли.

2. Определение параметров межатомного потенциала для ОЦК и ГЦК железа. Параметры парного межатомного потенциала Ми-Леннарда-Джонса (1) для ОЦК-железа были определены по методу, описанному в работах [8, 10]. Они однозначно вычислялись из замкнутой системы четырех уравнений, в которую входили четыре экспериментально определенных при $T = 0$ K и $P = 0$ величины, которые для α-Fe равны: $V_0 = 7.0494$ cm^3/mol – молярный объем, $L_0 = 413.8$ kJ/mol – удельная энергия атомизации, $\Theta_0 = 478$ K – температура Дебая и $\gamma_0 = -[\partial\ln(\Theta)/\partial\ln(V)]_T = 1.7$ – первый параметр Грюнайзена. Причем величина a была скорректирована по коэффициенту теплового расширения: $\alpha_p(P, T) = [\partial\ln(V)/\partial T]_P$, измеренному при $P = 0$ и $T = 300$ K. Для ОЦК-Fe значение $\alpha_p(0, 300\ \text{K})$ измерено с высокой степенью точности и равно [14]: $\alpha_p(0, 300\ \text{K}) = 3.6\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$.

Для ГЦК фазы железа потенциальные параметры r_o, D и a были переопределены с учетом свойств γ-Fe. Значение r_o определялось из известной зависимости межатомного расстояния от структуры кристалла [15, стр. 141]: если при полиморфном превращении координационное число k_n возрастает в последовательности: 3 (структура A9) → 4 (A4) → 6 (A5) → 8 (A2) → 12 (A1), то длина межатомной связи возрастает в последовательности:

$$1.00 \rightarrow 1.02 \rightarrow 1.09 \rightarrow 1.11 \rightarrow 1.14.$$

Отсюда легко получить: $r_o(12) = r_o(8)(1.14/1.11) = 2.5445\times10^{-10}$ m.

Так как для железа при переходе от ОЦК к ГЦК структуре значение энергии межатомной связи кристалла перераспределяется от $k_n = 8$ к связям с $k_n = 12$, то величина глубины парной межатомной связи для ГЦК железа была переопределена по формуле: $D(12) = (8/12)D(8)$.

Значение a(γ-Fe) – степень притяжения потенциала (1) для ГЦК-γ-Fe определяли путем подгонки под величину: $\alpha_p(0, 1200\ \text{K}) = 6.75\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ [14].

Рассчитанные таким путем параметры парного межатомного потенциала (1) для ОЦК и ГЦК-Fe ($m = 55.847$ amu) представлены в табл. 1. Там же показаны значения: $V_0 = N[\pi/(6k_p)]r_o^3$, $\rho_0 = m/V_0$ – плотность, Θ – температура Дебая, $\gamma = -[\partial\ln(\Theta)/\partial\ln(V)]_T$ – первый, $q = [\partial\ln(\gamma)/\partial\ln(V)]_T$ – второй, $z = -[\partial\ln(q)/\partial\ln(V)]_T$ – третий параметры Грюнайзена, рассчитанные при $V/V_0 = 1$, т.е. при $P \cong 0$.

Таблица 1.

Параметры потенциала (1) и рассчитанные из них значения свойств при $V/V_0 = 1$

Структура	r_o 10^{-10} m	D/k_B K	b	a	V_0 cm^3/mole	ρ_0 g/cm^3	Θ(1) K	γ(1)	$q(1)\times10^3$	$z(1)$
ОЦК	2.4775	12576.7	8.26	2.95	7.0494	7.922	408.073	1.702	7.874	1.718
ГЦК	2.5445	8384.467	8.26	2.12	7.01506	7.961	313.568	1.704	6.038	1.716

Отметим, что известные из литературы оценки данных параметров равны:

<u>для ОЦК-Fe:</u> Θ/[K] = 420 ÷ 478 [8, стр. 52], 404 [5], γ = 1.4 ÷ 1.81 [8], 1.736 [5],
$q\times10^3 = 1000$ [1, 5], $z = 0$ [1];

<u>для ГЦК-Fe:</u> Θ/K = 296 [5], γ = 1.2 ÷ 2.1 [1], 2.203 [5],
$q\times10^3 = 1000 \div 1700$ [1], 10 [5], $z = 0$ [1];

3. Результаты расчетов. Уравнение состояния и свойства ОЦК и ГЦК-Fe были нами подробно изучены в работах [10, 11], где было получено хорошее согласие с экспериментом. Здесь мы изучим область высоких P-T-условий.

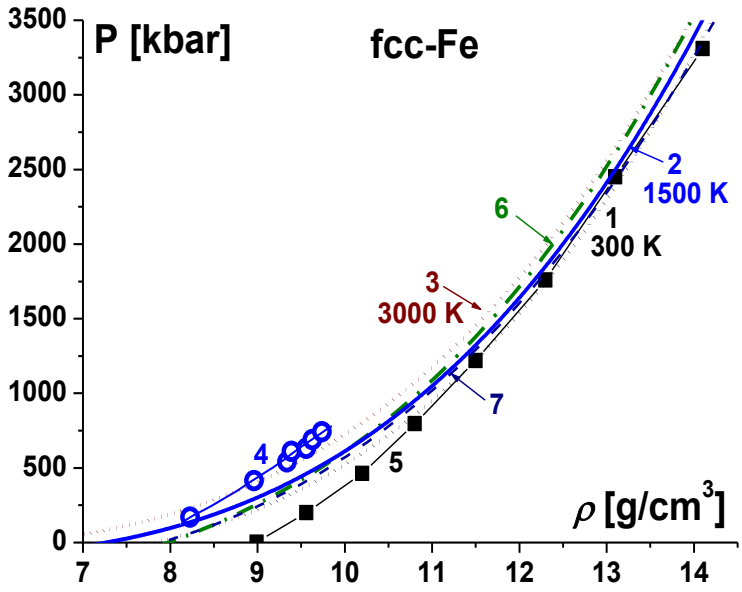


Рис. 1. Изотермы уравнения состояния ГЦК-Fe: линии *1-3* – наши расчеты при *T* = 300, 1500, 3000 K, соответственно.

На рис. 1 показаны изотермы уравнения состояния $P(T, \rho)$ для ГЦК-Fe. Линии *1-3* – наши расчеты: точечная линия *1* – изотерма 300 K, сплошная линия *2* – изотерма 1500 K, точечная линия *3* – изотерма 3000 K. Тонкая сплошная линия *4* – изотерма 298 K рассчитанная в [4, рис. 10]. Кружки – результаты ударного сжатия γ-Fe из [4, 16]. Тонкая сплошная линия с квадратами *5* – расчеты упругой изотермы *T* = 0 K из [17]. Штрихпунктирная линия *6* – упругая изотерма *T* = 0 K для ГЦК-γ-Fe из обзора А.И. Фунтикова [1, формула (5)]:

$$P = \frac{\rho_0}{n} C_0^{\,2} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \qquad (5)$$

где для ГЦК-γ-Fe (измерено до ~ 400 kbar): ρ_0 = 7.98 g/cm^3, C_0 = 4.57 km/s, n = 4.0. Отметим, что для ГПУ-ε-Fe (измерено до ~ 2500 kbar) параметры равны [1]:

ρ_0 = 8.3 g/cm^3, C_0 = 4.444 km/s, n = 4.88.

Штриховая линия *7* – зависимость, полученная в работе [18, tabl. 1] путем аппроксимации экспериментальных данных для ГЦК-γ-Fe (измеренных до 1 Mbar = 100 GPa) уравнением Birch-Murnaghan следующего вида:

$$P = 1.5 B_0 \frac{(1-x^2)}{x^7} \left[1 + \frac{3}{4} (B_0' - 4) \frac{(1-x^2)}{x^2} \right], \qquad (6)$$

где $x = (V/V_0)^{1/3} = (\rho_0/\rho)^{1/3}$, B_0 = 1330 ± 30 kbar, $B_0' = (\partial B_T/\partial P)_T$ = 5.

Как видно из рис. 1, наши зависимости *1-3* хорошо согласуются с зависимостями, полученными для ГЦК-γ-Fe в работах [1, 2, 4, 16-18].

Получив уравнение состояния, нами были рассчитаны барические зависимости следующих свойств: температура Дебая, первый, второй и третий параметры Грюнайзена, $B_T = -V(\partial P/\partial V)_T$ – изотермический модуль сжатия и $B'(P) = (\partial B_T/\partial P)_T$, C_v – изохорная теплоемкость и $C_v'(P) = (\partial C_v/\partial P)_T$, α_p – коэффициент теплового расширения и $\alpha_p'(P) = (\partial \alpha_p/\partial P)_T$, $C_p = C_v (1 + \gamma \alpha_p T)$ – изобарная теплоемкость, σ – удельная (на единицу площади) поверхностная энергия, $\sigma'(T) = (\partial \sigma/\partial T)_V$ и $\sigma'(P) = (\partial \sigma/\partial P)_T$. Расчеты были выполнены вдоль двух изотерм: 300 и 1500 K для ОЦК-Fe [10], 1500 и 3000 K для ГЦК-Fe [11].

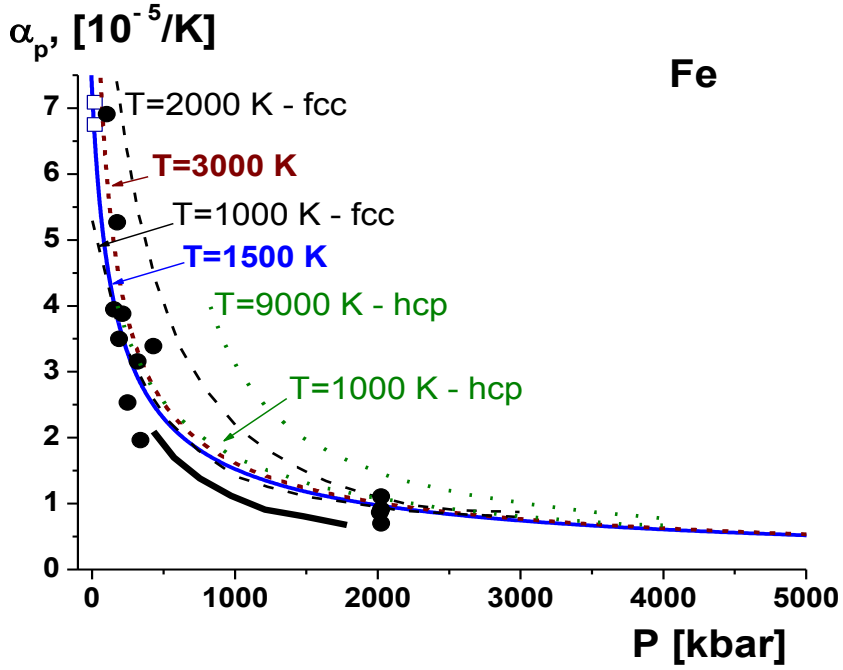


Рис. 2. Изотермы барической зависимости коэффициента теплового расширения для ГЦК и ГПУ-Fe. Квадратами около вертикальной оси показаны экспериментальные значения для ГЦК-Fe при 1200 K и P = 0: $\alpha_p/[10^{-5}\,K^{-1}]$ = 6.75 [14] ÷ 7.086 [19]. Две тонкие пунктирные линии на интервале P = 0 ÷ 3000 kbar – расчетные данные для ГЦК-Fe из [20]: верхняя кривая для 2000 K, а нижняя – для 1000 K. Две тонкие точечные линии на интервале 180 ÷ 4000 kbar – расчетные данные для ГПУ-ε-Fe из [21]: верхняя кривая для 9000 K, а нижняя – для 1000 K. Точки и нижняя толстая сплошная линия (для P = 430 ÷ 1780 kbar) – экспериментальные оценки, полученные при T = 1000 ÷ 5200 K (см. обзор в [20, 21]). Наши расчетные изотермы показаны сплошной (1500 K) и пунктирной (3000 K) линиями для всего интервала давлений.

Оказалось (см. рис. 2), что зависимости $B'(P)$, $C_p(P)$, $\alpha_p(P)$ и $\sigma'(P)$ хорошо (с коэффициентом достоверности $R_{cor} > 0.998$) описываются функцией экспоненциального распада второго порядка:

$$y(P) = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{P}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{P}{t_2}\right). \qquad (7)$$

Поэтому мы аппроксимировали полученные в графическом виде барические зависимости указанных свойств под функцию (7). Данная функция удобна тем, что из нее путем дифференцирования или интегрирования легко получить барические зависимости для других свойств, например для функций: $B_T(P)$, $C_p'(P)$, $\alpha_p'(P)$, $\sigma(P)$ и $\alpha_p \cdot B_T = (\partial P/\partial T)_V$.

Таблица 2.

Коэффициенты аппроксимации (7) для четырех барических зависимостей и R_{cor} – коэффициент достоверности аппроксимации на интервале 0 ÷ 4000 kbar для ОЦК-Fe. В первой строке коэффициенты для изотермы 300 K, а во второй строке – для 1500 K.

Коэффициент / Функция	y_0	A_1	t_1, kbar	A_2	t_2, kbar	R_{cor}
$B'(P)$	4.09963	0.81989	242.75123	0.81352	1921.5053	0.99957
	4.1009	0.93838	201.06319	0.84481	1729.67095	0.99936
$\alpha_p(P)$ / $[10^{-5}/K]$	0	2.20234	288.59919	1.27398	2854.89129	0.99827
	0.37883	2.43035	179.27698	1.85185	1397.10008	0.99937

$C_p/(Nk_B)$	0.89803	1.80784	6049.05945	0.1144	268.19568	0.99984
	2.93827	0.23102	2021.48787	0.19737	129.65397	0.99777
$\sigma'(P)$ / [10^{-3} J/(m^2·kbar)]	– 0.68498	0.88991	217.8023	0.77121	1493.32792	0.99961
	– 0.67386	1.14752	177.75653	0.9043	1317.98288	0.99944

Таблица 3.

Коэффициенты аппроксимации (7) для четырех барических зависимостей и R_{cor} – коэффициент достоверности аппроксимации на интервале 0 ÷ 4000 kbar для ГЦК-Fe. В первой строке коэффициенты для изотермы 1500 K, а во второй строке – для 3000 K.

Коэффициент / Функция	y_0	A_1	t_1, kbar	A_2	t_2, kbar	R_{cor}
$B'(P)$	4.04858	0.80614	122.83534	0.78231	959.36543	0.99956
	4.0558	1.16939	69.78074	0.90118	685.42345	0.9989
$\alpha_p(P)$ / [10^{-5}/K]	0.672073	3.47825	112.96816	2.95072	821.11655	0.99955
	0.832673	6.83283	61.02518	4.54639	538.91133	0.99895
$C_p/(Nk_B)$	3.00125	0.2864	122.98692	0.24956	1092.36868	0.9994
	3.11677	1.05802	61.79922	0.69745	556.43107	0.9989
$\sigma'(P)$/[10^{-3} J/(m^2·kbar)]	– 0.61309	1.47225	111.06562	1.26112	774.20283	0.99959
	– 0. 55118	2.89187	60.68517	1.97104	518.6625	0.99903

В таблицах 2 и 3 представлены значения коэффициентов функции (7) для зависимостей $B'(P)$, $\alpha_p(P)$, $C_p(P)/(Nk_B)$ и $\sigma'(P)$ как для ОЦК, так и для ГЦК-Fe. Из (7) видно, что при $P \to \infty$ функции $B'(P)$, $C_p(P)/(Nk_B)$, $\alpha_p(P)$ и $\sigma'(P)$ стремятся к постоянным величинам равным y_0 из табл. 2 и 3. Это означает, что при $P \to \infty$ функции $B_T(P)$, и $\sigma(P)$ изменяются по линейной зависимости, а функции $C_p'(P)$ и $\alpha_p'(P)$ стремятся к нулю.

4. Расчет температуры плавления. Для изучения зависимости температуры плавления (T_m) от давления используем формулу Линдеманна. Тогда при $T_m >> \Theta$, для зависимости T_m от относительного объема (V/V_0) можно получить выражение вида [22]:

$$T_m = T_m(0)\left(\frac{V}{V_0}\right)^{2/3}\left[\frac{\Theta(V/V_0)}{\Theta(1)}\right]^2 = T_m(0)\left(\frac{V}{V_0}\right)^{-b/3}, \qquad (8)$$

где $T_m(0)$ – температура плавления при $P = 0$, $\Theta(1) = \Theta(V/V_0 = 1)$.

Из экспериментально определенного выражения (5) легко получить:

$$\frac{V}{V_0} = \left(1 + \frac{nP}{\rho_0 C_0^2}\right)^{-1/n}. \qquad (9)$$

Если вести отсчет давления от координат тройной точки δ-γ-liquid железа (которые определены достаточно точно [1, 3]: P_{t1} = 52 kbar, $T_m(P_{t1})$ = 1991 K), из (8) и (9) можно получить:

$$T_m(P) = T_m(P_{t1})\cdot[F(P-P_{t1})]^{b/3}, \text{ где } F(P-P_{t1}) = \left[1 + \frac{n(P-P_{t1})}{\rho_0 C_0^2}\right]^{1/n}. \qquad (10)$$

При учете увеличения объема кристалла с ростом функции $T_m(P)$ вместо формулы (10) получим интегральное уравнение вида:

$$T_m(P) = T_m(P_{t1})\cdot[F(P-P_{t1})]^{b/3}\left\{1 + F(P-P_{t1})\int_{T_m(P_{t1})}^{T_m(P)} \alpha_p(T,P)\,dT\right\}^{-b/3}. \qquad (11)$$

Полагая что, второе слагаемое в фигурных скобках много меньше единицы, и используя теорему о среднем интегрального исчисления, из (11) можно получить выражение:

$$T_m(P) = T_m(P_{t1}) \frac{[F(P-P_{t1})]^{b/3}\left\{1+\left(\frac{b}{3}\right)\cdot\overline{\alpha_p}\cdot T_m(P_{t1})\cdot F(P-P_{t1})\right\}}{\left\{1+\left(\frac{b}{3}\right)\cdot\overline{\alpha_p}\cdot T_m(P_{t1})\cdot[F(P-P_{t1})]^{1+(b/3)}\right\}}, \qquad (12)$$

где $\overline{\alpha_p}$ – среднее значение коэффициента теплового расширения $\alpha_p(T, P)$ на интервале от $T_m(P_{t1})$ до $T_m(P)$. Легко видеть, что при $\overline{\alpha_p} = 0$ формула (12) переходит в (10). Величина $\overline{\alpha_p} = 0$ определит верхнюю границу для зависимости $T_m(P)$, т.е. MAX[$T_m(P)$], а величина $\overline{\alpha_p} = \alpha_p(P = 0, T = 1200\ \text{K}) = 7\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ определит ее нижнюю возможную границу, т.е. MIN[$T_m(P)$] для ГЦК-Fe.

Для определения величины $\overline{\alpha_p}$ на интервале усреднения от P_1 до P_2 используем следующее выражение:

$$\overline{\alpha_p} = \frac{1}{P_2 - P_1}\int_{P_1}^{P_2} \alpha_p(T,P)dP\ .$$

Подставляя сюда для функции $\alpha_p(T, P)$ полиномиальную зависимость (7), легко получить:

$$\overline{\alpha_p} = y_0 + \frac{A_1 t_1}{\Delta P}\left[\exp\left(-\frac{P_1}{t_1}\right) - \exp\left(-\frac{P_2}{t_1}\right)\right] + \frac{A_2 t_2}{\Delta P}\left[\exp\left(-\frac{P_1}{t_2}\right) - \exp\left(-\frac{P_2}{t_2}\right)\right], \qquad (13)$$

где $\Delta P = P_2 - P_1$ – величина интервала давления, по которому усредняем.

В таблице 4 представлены значения $\overline{\alpha_p}$ для ГЦК-Fe, полученные для разных интервалов усреднения (от P_{t1}) вдоль двух изотерм, при использовании полиномиальных зависимостей (7) для $\alpha_p(T, P)$ из табл. 3. Из табл. 4 и рис. 2 видно, что при расчете зависимости $T_m(P)$ по формуле (12), можно принять:

$\overline{\alpha_p} = 3\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ – для ГЦК-γ-Fe на интервале от тройной точки δ-γ-liquid [1, 3]: P_{t1} = 52 kbar и $T_m(P_{t1})$ = 1991 K до тройной точки γ-ε-liquid [3]: P_{t2} = 985 ± 50 kbar, $T_m(P_{t2})$ = 3712 ± 200 K;

$\overline{\alpha_p} = 1.57\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ – для ГПУ-ε-Fe на интервале от тройной точки δ-γ-liquid [1, 3]: P_{t1} = 52 kbar и $T_m(P_{t1})$ = 1991 K до P = 3300 kbar (давление на границе внешнее-внутреннее ядро Земли (раздел Lehmann), глубина 5100 км). При этом мы учли, что при высоких давлениях зависимость $\alpha_p(P)$ слабо зависит от температуры, и для ГПУ-Fe мало отличается от барической зависимости для ГЦК-Fe (см. рис. 2).

Таблица 4.

Значения $\overline{\alpha_p}$, полученные для разных Δ*P* вдоль двух изотерм для ГЦК-Fe.

P_1, kbar	P_2, kbar	Изотерма	$\overline{\alpha_p}$, $10^{-5}\ \text{K}^{-1}$
52	985	1500 K	2.59
52	985	3000 K	2.99
52	3300	3000 K	1.57

На рис. 3 показаны барические зависимости для температуры плавления железа: сверху – на интервале 0 ÷ 1400 kbar, снизу – на интервале 0 ÷ 4000 kbar. Верхняя и нижняя сплошные линии указывают верхнюю (при $\overline{\alpha_p} = 0$) и нижнюю (при $\overline{\alpha_p} = 7\times10^{-5}\ \text{K}^{-1}$) границу для зависимости $T_m(P)$ ГЦК-Fe. Толстые линии – экспериментальные зависимости для ГЦК-γ-Fe (сплошная линия) и для ГПУ-ε-Fe (пунктир), которые авторы [3] аппроксимировали формулой Simon-Glatzel:

$$T_m(P) = T_m(P_{t1})\left[1+\frac{(P-P_{t1})}{273.9}\right]^{1/2.38}$$ для ГЦК-γ-Fe: P_{t1} = 52 kbar, $T_m(P_{t1})$ = 1991 K, (14)

$$T_m(P) = T_m(P_{t2})\left[1+\frac{(P-P_{t2})}{1612}\right]^{1/1.72}$$ для ГПУ-ε-Fe: P_{t2} =985 kbar, $T_m(P_{t2})$ =3712 K. (15)

Кружками на рис. 3 показаны тройные точки на линии плавления железа, оценки *P-T*-условий на границе нижней мантии и внешнего ядра Земли (P = 1350 kbar) и область разброса оценок для T_m на границе внешнего и внутреннего ядра Земли (при P = 3300 kbar) по данным различных авторов (см. обзор в [1, 3-5]):

1 – δ-γ-liquid [1, 3]: P_{t1} = 52 kbar, $T_m(P_{t1})$ = 1991 K;
2 – γ-ε-liquid из [1]: P_{t2} = 600 kbar, $T_m(P_{t2})$ = 2800 K;
3 – γ-ε-liquid из [3]: P_{t2} = 985 kbar, $T_m(P_{t2})$ = 3712 K;
4 – γ-ε-liquid из [5]: P_{t2} = 1065 kbar, $T_m(P_{t2})$ = 3787 K;
5 и *6* – оценки T_m для γ-Fe при P = 1350 kbar [5]: T_m = 3500 ± 100 K;
7 – расчеты авторов [5] для ε-Fe: P_{t2} = 3289 kbar, T_m(3289) = 5882 K;
8 и *9* – оценки T_m(3300) для ε-Fe из [4, 5]: P = 3300 kbar, T_m = 5300 ÷ 7300 K.

Отметим, что в литературе до сих пор нет единого мнения о координатах тройной точки γ-ε-liquid-Fe, например, в [4] брали: P_{t2} = 810 kbar, $T_m(P_{t2})$ = 2800 K. Как видно из верхнего рис. 3 точка *2* лежит ниже линии MIN[$T_m(P)$], что указывает на некорректность данной оценки координат точки γ-ε-liquid.

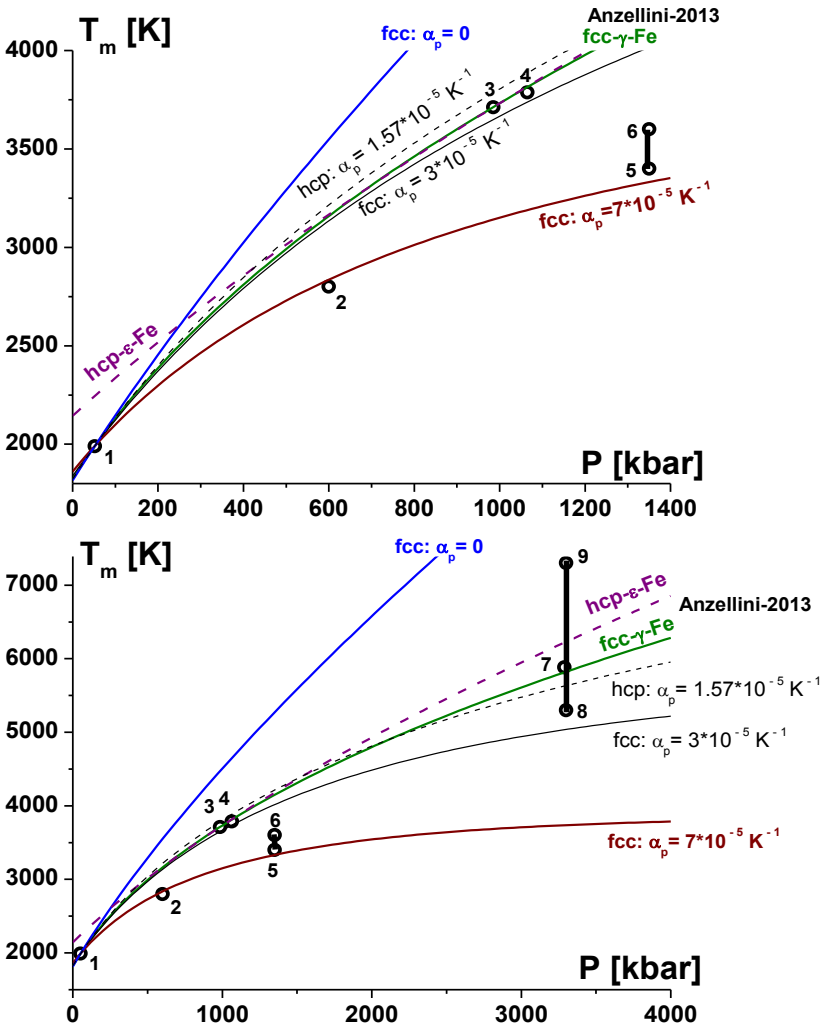


Рис. 3. Зависимость температуры плавления железа от давления: сверху – на интервале 0 ÷ 1400 kbar, снизу – на интервале 0 ÷ 4000 kbar.

Наши расчеты зависимости $T_m(P)$ показаны тонкими линиями, рассчитанными по (12) при b = 8.26, P_{t1} = 52 kbar, $T_m(P_{t1})$ = 1991 K: сплошная линия – для ГЦК-Fe при $\overline{\alpha_p} = 3\times10^{-5}$ K^{-1}, пунктирная линия – для ГПУ-Fe при $\overline{\alpha_p} = 1.57\times10^{-5}$ K^{-1}. Как видно из рис. 3 наши расчетные зависимости достаточно хорошо согласуются с зависимостями $T_m(P)$, полученными в [3, 5]. Вместе с тем, как видно из рис. 3, значение температуры плавления железа при P = 1350 kbar лежит много выше, чем общепринятое сейчас значение температуры на границе нижняя мантия-внешнее ядро Земли: T_m = 3500 ± 100 K. Это может быть обусловлено эффектом барической фрагментации железа при P-T-условиях раздела Гутенберга, о чем нами было подробно написано в работах [23, 24].

Выводы. Определены параметры парного потенциала межатомного взаимодействия Ми-Леннард-Джонса для ОЦК и ГЦК фаз железа. На основе этих параметров рассчитаны уравнения состояния и барические зависимости теплофизических свойств для ОЦК и ГЦК фаз железа, работоспособные при высоких P-T-условий, присущих ядру Земли. Исходя из упругой изотермы T = 0 K уравнения состояния получено выражение для барической зависимости температуры плавления. На основе этого выражения оценены верхняя и нижняя граница для зависимости $T_m(P)$ для ГЦК-Fe. Рассчитана барическая зависимость температуры плавления для ГЦК и ГПУ фаз железа, которая показала хорошее согласие с оценками других авторов вплоть до P = 4000 kbar. Показано, что температура плавления железа при P = 1350 kbar лежит существенно выше, чем общепринятое сейчас значение температуры на границе нижняя мантия-внешнее ядро Земли: T_m = 3500 ± 100 K, что может быть обусловлено эффектом барической фрагментации железа при P-T-условиях на разделе Гутенберга.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 16-03-00041_а и Программы Президиума РАН (программа № I.11П(1)).

Литература:

1. *Фунтиков А.И.* Фазовая диаграмма и кривая плавления железа, полученные по данным статических и ударно-волновых измерений // Теплофизика Высоких Температур. 2003. Т. **41**. № 6. С. 954 – 969. doi: 10.1023/B:HITE.0000008344.89730.69
2. *Nishihara Y., Nakajima Y., Akashi A., Tsujino N., Takahashi E., Funakoshi, K. Higo Y.* Isothermal Compression of Face-Centered Cubic Iron // American Mineralogist. 2012. V. **97**. P. 1417 – 1420. doi: 10.2138/am.2012.3958
3. *Anzellini S., Dewaele A., Mezouar M., Loubeyre P., Morard G.* Melting of Iron at Earth's Inner Core Boundary Based on Fast X-ray Diffraction // Science. 2013. V. **340**. № 6131. P. 464 – 466. doi: 10.1126/science.1233514
4. *Медведев А.Б.* Широкодиапазонное многофазное уравнение состояния железа // Физика Горения и Взрыва. 2014. Т. **50**. № 5. P. 91 – 108. doi: 10.1134/S0010508214050141
5. *Dorogokupets P.I., Dymshits A.M., Litasov K.D., Sokolova T.S.* Thermodynamics and Equations of State of Iron to 350 GPa and 6000 K // Scientific Report. 2017. V. **7**. 41863 (1-10). doi: 10.1038/srep41863
6. *Swartzendruber L.J.* The Fe (Iron) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1982. V. **3**. № 2. P. 161 – 165. doi: 10.1007/BF02892374
7. *Klotz S., Le Godec Y., Strassle T., Stuhr U.* The α–γ–ε Triple Point of Iron Investigated by High Pressure – High Temperature Neutron Scattering // *Applied Physics Letters*. 2008. V. **93**. № 9. P. 091904 (1-3). doi: 10.1063/1.2976128
8. *Магомедов М.Н.* Изучение межатомного взаимодействия, образования вакансий и самодиффузии в кристаллах. Москва: Физматлит, 2010. 544 с.
9. *Магомедов М.Н.* О температуре Дебая и параметрах Грюнайзена для ГПУ кристаллов из молекул p-H_2 и o-D_2 // Журнал Технической Физики. 2013. Т. **83**. № 9. С. 56 – 62. doi: 10.1134/S106378421309020X

10. *Магомедов М.Н.* Изменение теплофизических свойств ОЦК-железа при изотермическом сжатии // Журнал Технической Физики. 2015. Т. **85**. № 11. С. 48 – 54. doi: 10.1134/S1063784215110195
11. *Магомедов М.Н.* Изменение решеточных свойств и температуры плавления гранецентрированной кубической структуры железа при сжатии // Журнал Технической Физики. 2017. Т. **87**. № 4. С. 549 – 556. doi: 10.1134/S1063784217040156
12. *Магомедов М.Н.* Изменение теплофизических свойств алмаза при изотермическом сжатии // Журнал Технической Физики. 2017. Т. **87**. № 5. С. 643 – 650. doi: 10.1134/S1063784217050176
13. *Магомедов М.Н.* Об уравнении состояния и свойствах различных полиморфных модификаций кремния и германия // Физика Твердого Тела. 2017. Т. **59**. № 6. С. 1065 – 1072. doi: 10.1134/S1063783417060142
14. *Новикова С.И.* Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974. 294 с.
15. *Бацанов С.С.* Структурная химия. Факты и зависимости. Москва: Диалог-МГУ. 2000. 292 с.
16. *Chen G.Q., Ahrens T.J.* High Pressure and High Temperature Equation-of-State of Gamma and Liquid Iron // In «High-Pressure Materials Research» (Warrendale, PA, 1998). P. 41–61 (Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 499). doi: 10.1557/PROC-499-41
17. *Asker C., Kargen U., Dubrovinsky L., Abrikosov I.* Equation of State and Elastic Properties of Face-Centered Cubic FeMg Alloy at Ultrahigh Pressures from First-Principles // Earth and Planetary Science Letters. 2010. V. **293**. № 1-2. P. 130 – 134. doi: 10.1016/j.epsl.2010.02.032
18. *Campbell A., Danielson L., Righter K., Seagle C.T., Wang Y., Prakapenka V.* High Pressure Effects on the Iron-Iron Oxide and Nickel-Nickel Oxide Oxygen Fugacity Buffers // Earth and Planetary Science Letters. 2009. V. **286**. P. 556 – 564. doi: 10.1016/j.epsl.2009.07.022
19. *Liu Y.C., Sommer F., Mittemeijer E.J.* Calibration of the Differential Dilatometric Measurement Signal upon Heating and Cooling; Thermal Expansion of Pure Iron // Thermochimica Acta. 2004. V. **413**. P. 215 – 225. doi: 10.1016/j.tca.2003.10.005
20. *Wasserman E., Stixrude L., Cohen R. E.* Thermal Properties of Iron at High Pressures and Temperatures // Physical Review B. 1996. V. **53**. № 13. P. 8296 – 8309.
21. *Belonoshko A.B.* Equation of State for ε-Iron at High Pressures and Temperatures **//** Condensed Matter Physics. 2010. V. **13**. № 2. P. 23605 (1-11).
22. *Магомедов М.Н.* О критерии фазового перехода кристалл-жидкость // Физика Металлов и Металловедение. 2008. Т. **105**. № 2. С. 127 – 136.
23. *Магомедов М.Н.* О поверхностных свойствах и барической фрагментации железа // Поверхность. Рентген., синхротр., и нейтрон. исслед. 2012. № 5. С. 59 – 71. doi: 10.1134/S1027451012050151
24. *Магомедов М.Н.* О наноструктурировании и пластичности кристалла при сжатии // Журнал Технической Физики. 2016. Т. **86**. № 5. С. 84 – 91. doi: 10.1134/S1063784216050145

УДК 532.546:536.423

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ГЕОТЕРМАЛЬНОМ ПЛАСТЕ

М.М. Рамазанов, Д.А. Алхасова, Г.М. Абасов, Н.С. Булгакова

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля, д. 39а

Решена нестационарная нелинейная задача о тепломассопереносе в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси. Численно, конечно разностным методом, изучено влияние теплообмена пласта с кровлей и подошвой на режим тепломассопереноса в окрестности добывающей скважины. Приведена диаграмма различных режимов тепломассопереноса с поправкой на теплообмен. Показано, что теплообмен приводит к некоторому увеличению температуры (давления) фазового перехода и изменению водонасыщенности теплоносителя в пласте вокруг скважины. После выхода на стационарный режим это изменение сводится к дополнительному парообразованию. Однако на нестационарной стадии на отдельных отрезках времени на некоторых участках теплообмен может привести, напротив, к частичной конденсации пара, т.е. к росту водонасыщенности. Как при отсутствии теплообмена пласта с кровлей и подошвой, так и при его наличии характер эволюции распределения водонасыщенности таков, что оно стремится к стационарному распределению, совершая затухающие колебания во времени.
Ключевые слова: геотермальный пласт, пароводяная смесь, фазовый переход, тепло - и массообмен, режимы течений, радиальная модель, численное решение.

Введение. Известно, что наиболее эффективные технологии добычи геотермального тепла связаны с извлечением теплоносителя из высокотемпературных коллекторов. Приток теплоносителя в скважину может сопровождаться сложными физико-химическими процессами, обусловленными фазовыми переходами, выпадением солей в осадок, выделением растворенных газов и т.д. Вопросам, связанным с извлечением и использованием геотермальной энергии посвящены монографии, обзоры и статьи [1-20]. Математическим моделированием процессов связанных с движением жидкостей и газов в геотермальных системах на основе уравнений баланса массы, энергии и закона Дарси для двухфазной фильтрации занимались многие авторы [3], [7-15]. Краткий критический обзор этих работ дан в [7], в которой наиболее последовательно и строго поставлена задача о двухфазном течении с фазовыми переходами в пористой среде.

В зависимости от давления, температуры и других параметров при извлечении теплоносителя в высокотемпературном геотермальном пласте могут реализоваться различные режимы тепломассопереноса. Одним из возможных режимов является режим с образованием фронта кипения разделяющего области чистого пара и воды [3], [7,8],[11-12]. Во многих случаях геотермальный пласт содержит пароводяную смесь, находящуюся в термодинамическом равновесии [2]. Изучению тепломассопереноса такой смеси посвящены работы [16-20]. В [7] приводится диаграмма различных режимов тепломассопереноса с фазовыми переходами в геотермальном пласте в рамках плоских одномерных автомодельных решений. Аналогичная диаграмма для радиально-симметричной задачи, которая не допускает автомодельного решения, получена в [9]. В [7-8] и [19] рассмотрены также задачи о движении пароводяной смеси в пласте в линейном приближении соответственно для плоского одномерного автомодельного случая и случая радиально симметричного притока теплоносителя к скважине с учетом теплообмена пласта с кровлей и подошвой. В [8]-рассмотрена так же и нелинейная задача в автомодельной постановке, однако теплообмен пласта с непроницаемыми породами не учитывался.

В [20] рассмотрена математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте насыщенном пароводяной смесью при извлечении теплоносителя одиночной скважиной. Получено точное решение стационарной и квазистационарной нелинейных задач. Показаны характерные распределения водонасыщенности, температуры и давления вокруг добывающей сква-

жины. Найдены условия существования указанного режима тепломассопереноса, при нарушении которых у скважины формируется область, насыщенная либо чистой жидкостью, либо чистым паром. В настоящей работе рассмотрена аналогичная задача с учетом теплообмена с кровлей и подошвой. Найдено численное решение нестационарной нелинейной задачи конечно-разностным методом. При этом точное решение [20] использовалось как тестовое.

Постановка и метод решения задачи. Предположим, что в начальный момент времени геотермальный пласт, насыщенный пароводяной смесью, имеет давление P_0, температуру насыщения $T_0 = F(P_0)$ и водонасыщенность S_0. В результате эксплуатации скважины ее давление падает до значения P^0. Это приведет к изменению водонасыщенности в окрестности скважины. Причем необязательно к дополнительному парообразованию. Как показали расчеты, водонасыщенность в результате теплообмена с кровлей и подошвой на некоторых участках пласта, на некоторых отрезках времени в зависимости от параметров задачи может и увеличиться. Пласт обменивается теплом с непроницаемыми подошвой и кровлей. Необходимо найти распределения термомеханических полей в окрестности добывающей скважины, изучить их свойства и характер эволюции. Выявить влияние эффекта теплообмена пласта с окружающими породами на свойства указанных полей. Далее полагаем, что условия задачи таковы, что можно пренебречь гравитационными эффектами [7].

Выпишем систему уравнений, описывающую тепломассоперенос в пласте, заполненном пароводяной смесью, находящейся в термодинамическом равновесии, следуя [7].

$$
\begin{aligned}
&m\frac{\partial}{\partial t}S\rho_w + \operatorname{div}\rho_w v_w = M \\
&m\frac{\partial}{\partial t}(1-S)\rho_v + \operatorname{div}\rho_v v_v = -M \\
&\frac{\partial}{\partial t}(\rho e)_m + \operatorname{div}(\rho_w h_w v_w + \rho_v h_v v_v) = \operatorname{div}(\lambda_m \operatorname{grad} T) \\
&v_j = -\frac{k}{\mu_j} f_j(S)\operatorname{grad} P, \qquad j = w, v \qquad (1) \\
&\rho_w = \rho_{w0}\left(1+\alpha(P-P_0)-\beta(T-T_0)\right) \\
&P = \rho_v RT,\ \ln\frac{P}{P_a} = A + \frac{B}{T},\ e_j = h_j - \frac{P}{\rho_j} \\
&dh_w = C_w dT + \frac{1-\beta T}{\rho_w}dP,\ dh_v = C_{vp}dT,\ de_s = C_s dT \\
&\lambda_m = mS\lambda_w + m(1-S)\lambda_v + (1-m)\lambda_s \qquad (2) \\
&(\rho e)_m = mS\rho_w e_w + m(1-S)\rho_v e_v + (1-m)\rho_s C_s
\end{aligned}
$$

Здесь первые два уравнения это уравнения неразрывности для обеих фаз смеси, третье - уравнение переноса тепла для смеси, четвертое - обобщенное уравнение Дарси для фаз, далее уравнения состояния фаз и уравнение равновесия фаз, и наконец, известные термодинамические соотношения и определение эффективных теплофизических коэффициентов.

После исключения скоростей фильтрации фаз из системы (1)-(2) и задания граничных и начальных условий, полученная задача решалась численно конечно-разностным методом. Для построения равномерной разностной сетки, отрезок $r_0 \le r \le r_p \equiv r_L / r_c$, разбивался на N равных частей с шагом $h = (r_p - r_0)/N$. В узловых точках $r_0 = 1,\ r_i = r_0 + ih;\ i = \overline{1, N}$. Для решения задачи была использована устойчивая неявная схема, имеющая второй порядок аппроксимации по пространственной переменной r и первый порядок аппроксимации по времени t. Полученные разностные уравнения решены методом итераций на каждом временном шаге [20]. Приводимые расчеты проводились при $h = 0{,}1$ с постоянным временным шагом

$\tau = 0,05$. Уменьшение шагов по времени и пространству приводило к изменению результатов менее чем 0,5%. Расчеты проводились для функций относительной проницаемости фаз простейшего вида $f_w(S) = S, \quad f_v(S) = 1 - S$. Для теплофизических коэффициентов использовались следующие значения: $A = 12.512;\ B = -4611.73;\ \rho w = 800;\ \rho s = 2000;\ \lambda w = 0,58;$ $\lambda s = 2;\ \lambda v = 0,02;\ \mu w = 1,1*10^{-4};\ \mu v = 1,72*10^{-5};\ Cw = 4,2*10^3;\ Cs = 0,9*10^3;\ Cp = 2,3*10^3;$ $q = 1.85*10^6;\ R = 461$.

Обсуждение результатов. В [19] рассмотрена задача аналогичная данной, но в линеаризованной постановке, т.е. на основе системы уравнений полученной после линеаризации. При этом учитывался теплообмен пласта с кровлей и подошвой. Результаты этой работы справедливы лишь, когда возмущенные поля мало отличаются от начальных полей. Как в последующем показали сравнения с решением нелинейной задачи наиболее чувствительно к нарушению этого условия распределение водонасыщенности, которое зависит от давления (температуры) существенно нелинейным образом. В этой связи, если распределения давления и температуры дают только количественные ошибки, сохраняя качественные особенности, то водонасыщенность в рамках линеаризованной модели может иметь качественно неправильное распределение.

Настоящая работа является продолжением работ [19, 20] и основной ее целью является исследование эффекта влияния теплообмена пласта с кровлей и подошвой на решение нелинейной нестационарной задачи, т.е. на распределение искомых полей вокруг добывающей скважины. При этом точное решение, полученное в [20] использовалось как тестовое решение, которое подтвердило высокую точность обсуждаемого численного решения задачи.

Рис.1 иллюстрирует диаграмму различных режимов тепломассопереноса. Линиями показаны кривые, полученные в [20] без учета теплообмена с кровлей и подошвой. Из этого рисунка видно, что если давление в скважине больше критического (при фиксированных прочих параметрах), образование чистого пара у скважины не возможно ни при каких проницаемостях. Знаком плюс обозначены точки, рассчитанные численно с учетом указанного теплообмена. Из рисунка следует, что правая граница соответствующая большим проницаемостям практически не зависит от теплообмена. Левая же граница соответствующая малым проницаемостям при теплообмене заметно сдвигается влево, расширяя область пароводяной смеси за счет области воды.

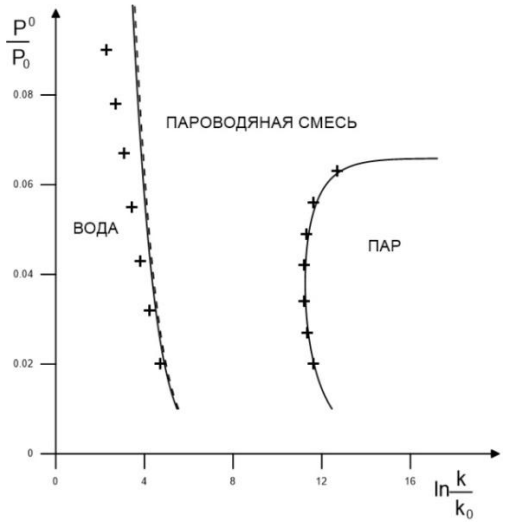


Рис. 1. Критические проницаемости в зависимости от отношения давления в скважине к пластовому давлению, $k_0 = 10^{-19}\,м^2$, $P_0 = 15 МПа$, $S_0 = 0.2$. Линии – аналитическое решение без учета теплообмена пласта с кровлей и подошвой [20]; Знаком плюс обозначены точки, рассчитанные численным методом с учетом указанного теплообмена.

На рис.2 показаны распределения водонасыщенности отнесенной к ее невозмущенному значению вокруг добывающей скважины в различные моменты времени. Показаны случаи наличия (выделены знаком плюс) и отсутствия теплообмена пласта с кровлей и подошвой. В начальный момент времени относительная водонасыщенность во всей рассматриваемой области равна единице. Из рисунка видна дальнейшая эволюция этого поля. Эти рисунки, прежде всего, показывают существенную нелинейность распределения водонасыщенности в окрестности скважины. Как это видно у всех кривых на рис.2 имеется минимум водонасыщенности. Окрестность этих минимумов есть область, где наиболее вероятно выпадение солей в осадок, ухудшая проницаемость пласта [8]. Однако, как показывают расчеты, для других параметров задачи указанного минимума может и не быть.

Далее интересно отметить, что на нестационарной стадии эволюции распределение водонасыщенности со временем может меняться немонотонным образом. Так из рис.4 видно, что в случае отсутствия теплообмена кривая 3 ниже кривой 2, а кривая 4 выше кривой 3. Другими словами на этой стадии водонасыщенность со временем сначала существенно уменьшается, затем существенно увеличивается. Отметим, что такие колебания распределения водонасыщенности имеют место и при наличии теплообмена, однако они на рис.4 не видны из-за выбранных моментов времени. Эти колебания более мелкие по сравнению со случаем отсутствия теплообмена и наблюдаются при приближении к стационарному решению. Далее сравнивая кривые для случая наличия и отсутствия теплообмена, замечаем, что кривые со знаком плюс вокруг скважины расположены ниже, т.е. теплообмен приводит к дополнительному парообразованию. Однако на нестационарной стадии возможны инверсии. Это видно сравнивая кривые 3 и 3+. Вблизи скважины до некоторого расстояния теплообмен приводит к уменьшению водонасыщенности, а после этого расстояния – напротив к ее увеличению. Это связано с тем, что с одной стороны приток тепла тратится на увеличение температуры (давления) фазового перехода, что приводит к конденсации части пара, а с другой на парообразование. Эта конкуренция и приводит к пересечению указанных кривых. Однако, как показывают расчеты, на стационарной стадии распределений (кривые 4 и 4+) во всей рассматриваемой в задаче области теплообмен приводит к уменьшению водонасыщенности, несмотря на некоторое повышение температуры и соответственно давления фазового перехода. Добавим, что проницаемость на рис.2 выбрана из соображений большей наглядности. Для бóльших проницаемостей картина качественно не меняется.

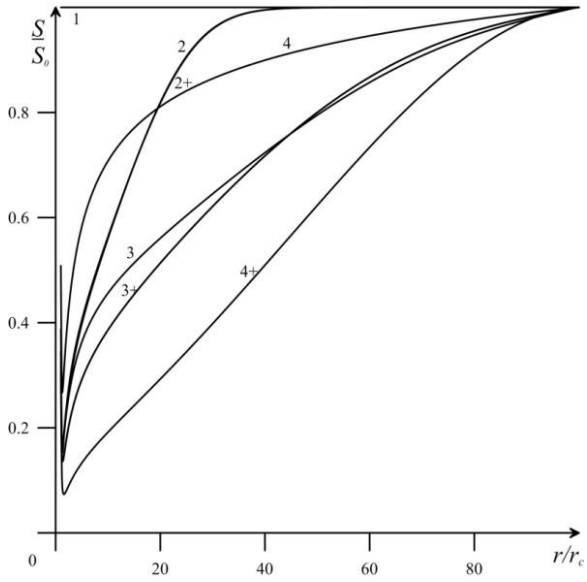


Рис. 2. Кривые для S/S₀: $k = 0.6 \cdot 10^{-16} м^2$ **; 1 - t=0; 2 - t=5*10⁴; 3 - t=5*10⁵; 4 - t=6,5*10⁶.**

Рисунок 3 иллюстрирует, что теплообмен пласта с кровлей и подошвой приводит с одной стороны к уменьшению полного массового притока пароводяной смеси в скважину, а с другой к увеличению соответствующего притока пара.

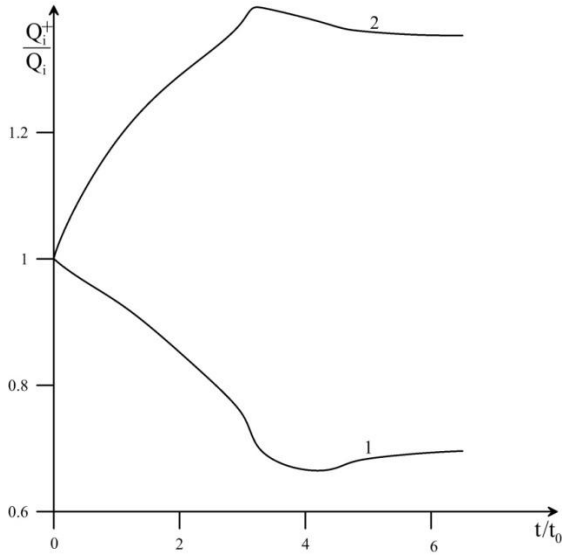


Рис. 3. Кривые зависимости отношения полных массовых притоков теплоносителя в скважину Q^+/Q (1) и соответствующих притоков пара Q_v^+/Q_v (2) в случаях наличия теплообмена пласта с кровлей и подушкой (знак +) и его отсутствия от безразмерного времени ($t_0 = 10^6 c$).

Заключение. Найдено численное конечно-разностное решение нестационарной нелинейной задачи о тепломассопереносе в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси. При этом учтен теплообмен пласта с окружающими породами. На основе сравнения результатов с результатами предыдущих исследований выявлено влияние эффекта теплообмена пласта с кровлей и подошвой на диаграмму различных режимов тепломассопереноса, свойства искомых термомеханических полей и характер их эволюции. Показано, что указанный теплообмен приводит к некоторому увеличению давления (температуры) фазового перехода и изменению водонасыщенности теплоносителя. На стадии выхода на стационарный режим это изменение сводится к уменьшению водонасыщенности, т.е. к дополнительному парообразованию. Однако на существенно нестационарной стадии картина сложнее, и на отдельных отрезках времени в некоторых участках пласта теплообмен приводит к уменьшению паросодержания теплоносителя (увеличению водонасыщенности). Кроме того, как в случае отсутствия теплообмена, так и при его наличии водонасыщенность выходит на стационарное решение, совершая затухающие колебания.

Литература:

1. **Elder J.** *Geothermal system*, New York: Acad. Press, 1981.
2. **Grant M. A., Donaldson I.J., Bixley P.F.** *Geothermal reservoir engineering*, New York: Acad. Press, 1982.
3. **Цыпкин Г.Г**. Математическая модель фазовых переходов вода-пар в гидротермальных пластах. *Изв. РАН МЖГ*. 1994. №6. С. 94-105.
4. **Alkhasov A.B., Ramazanov M.M., Aliyev R.M. Abasov G.M.** Complex heat exchange with current for phase transitions in secondary contour of geothermal power plant. *Renewable energy*. 2000. Vol.19. P. 155-161.

5. **O'Sullivan M.J., Pruess K., Lippmann M.J.** State of art of geothermal reservoir simulation. *Geothermics*. 2001.Vol.30. P. 395-429.
6. **Алхасов А.Б.**, *Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии,* Москва-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
7. **Цыпкин Г.Г.** *Течения с фазовыми переходами в пористых средах*, Москва-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
8. **Ричардсон К.Н., Цыпкин Г.Г**. Нелинейные явления при извлечении смеси вода-пар из геотермального резервуара. *ИФЖ.* 2004. Т. 77. № 2. 24-30.
9. **Алхасов А.Б., Рамазанов М.М.** Радиальная модель извлечения пара из высокотемпературного пласта одиночной скважиной. *ИФЖ*. 2014. Т. 87, №3. С. 539-548.
10. **Алхасов А.Б., Рамазанов М.М., Алхасова Д.А.** О фронтовом режиме теплопереноса в геотермальном пласте. *ИФЖ*. 2015. Т.88, №6. С. 1314-1321.
11. **Brownell D.H., Garg S.K., Pritchett J.W.** Covering equation for geothermal reservoirs. *Water Resour. Res*. 1977. V.13. P. 929-934.
12. **Веригин Н.Н., Голубев В.С.** О генерировании пара в подземных пластах-коллекторах. *ДАН СССР*. 1975. Т. 223, №6. С. 1355-1358.
13. **Garg S.K., Pritchett J.W.** Pressure interference data analysis for two-phas (water/steam) geothermal reservoirs. *Water Resour. Res*. 988. V. 24. P. 843-852.
14. **O'Sullivan M.J.** Geothermal reservoir simulation. *Energy Research*. 1985. V.9. P.313-332.
15. **Tsypkin G.G., Woods A.W.** Vapour extraction from a water saturated geothermal reservoir. *J. Fluid Mech*. 2004. V.506. P.315-330.
16. **O'Sullivan M.J.** A similarity method for geothermal well test analysis. *Water Resour. Res.* 1981. V.17. P.390 - 398.
17. **O'Sullivan M.J.**, **Pruess K**. Analysis of injection testing of geothermal reservoirs. *Trans. Geoth. Resour. Council*. 1980. V.4. P.401-404.
18. **Sorey M.L., Grant M.L., Bradford E.** Nonlinear effects in two-phase flow to wells in geothermal reservoir. *Water Resour. Res*. 1980. V.16. P.767-777.
19. **Рамазанов М.М., Алхасова Д.А.** Радиальная модель извлечения пароводяной смеси из геотермального пласта, *Материалы III Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э.Шпильрайна,* 6-8 октября 2014г. Махачкала, 2014. С. 120-126.
20. **Рамазанов М.М., Алхасова Д.А.** Математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси. *ТВТ*. 2017. Т.90. №3.С.640-648.
21. **Самарский А.А., Николаев Е.С.** *Методы решения сеточных уравнений*, Москва: Наука, 1978.

UDC [622.031:[556.3+553.982]]:536.71

ANALYSIS OF THE SURFACE TENSION COEFFICIENT OF HIGHLY MINERALIZED STRATAL WATERS WITH VARIOUS COMPOSITIONS OBSERVED IN THE OIL WELLS BORED IN THE GUNASHLI OIL FIELD

A.Q. Husseinov

Azerbaijan State Oil and Industry University
e-mail: avqust1955@mail.ru

The Republic of Azerbaijan is famous for its oil and gas reserves. It's no coincidence that the first petroleum well of the world was bored here in the year 1888. Despite the 125 years passed since that year, no analysis has ever been made for the study of such state parameters of oil wells' highly mineralized stratal waters, like temperature related physical parameters and following coefficients: σ – surface tension coefficient, ρ - density, η - viscosity, λ - coefficient of heat conductivity, C_p – heat capacity, a – coefficient of heat transmission [1]. Increase of a liquid's polarity in the air-liquid interface also leads to increases in molecular pressure and surface tension coefficient.

Water is a liquid with relative polarity. Under the temperature of $t=20^0C$ water's electrical permittivity is $\varepsilon=81$, while the surface tension in the air-water interface reaches a very high value σ = 72.75 mN/m. The surface tension coefficient's value depends on the polarity difference between air and water in the air-water interface. Polarity varies depending on the variability of stratal waters' composition. Then it follows as a logical consequence that surface tension coefficients of oil and oil products depends much on the chemical composition of stratum waters. For example, lubricating oils have greater surface tension coefficient in comparison with water, as water and lubricating oils have very different polarities. When two liquids come in contact, one of them starts to dissolve in other, while the phase balance is achieved at a relatively slow rate and as a consequence, surface tension hinders this solution process for awhile.

During the time interval, when the balance between the two states (phases) of matter (air and water) isn't yet established, the interfacial tension is called dynamic surface tension. According to G. Antonov, the interfacial surface tension between two liquid phases is calculated as follows is the surface tensions of saturated solutions of these liquids are known [2]:

$$G_{AB} = G_A - G_B$$

where G_A and G_B are surface tensions of saturated solutions of the liquids A and B accordingly.

As you know, oil is a very complicated system consisting of hydrocarbon compositions belonging to different carbon series (methane, napthene, aromatic (benzene) hydrocarbons and etc.) and different compounds (naphthenic acid, asphaltene, resin, oxygen and nitrogen compounds). Various oils have different thicknesses (densities) as well as various surfaces. Sometimes in inner phase the density is less than or equal to the surface density [3,4].

Analysis of the contacts f stratum waters with various phases (gas, liquid or solid) may reveal and explain the mechanism of action observed during such contacts as well as the absorption, qualitative and quantitative composition of polar liquids and the increases in the intensity of capillary forces. From this point of view, the experimental study of surface tension coefficients of oil and stratal waters assumes great importance. The influence of temperature and pressure on the surface tension coefficient may help to explain the molecular mechanism of free-surface energy and surface tension coefficient from the energy point of view.

The analysis of chemical composition of stratal waters

Well №	pH	degree Beaume	Hardness	Na+K	Ca	Mg	Cl	SO_4	HCO_3	NT	HB_4O_7
132	6.6	2.01	27.02	4.0	0.3	0.12	4.91	1.8	1.2	0.1	0.08
157	6.0	3.69	23.2	18.20	0.4	0.06	25.6	0.7	0.6	1.5	0.5

The values of surface tension coefficient of the stratum water with the density of $C = 11.2\,g/l.$

σ = atto – Newton/cm

P, mPa	T, ^{0}K									
	298.15	323.15	348.15	373.15	397.15	423.15	448.15	473.15	523.15	576.15
5	7.42	6.40	5.86	5.08	4.30	3.52	2.74	1.96	1.18	
10	6.91	5.12	5.35	4.57	3.79	3.01	2.23	1.46	0.67	
20	6.40	5.62	4.87	4.07	3.33	2.53	1.76	0.99	0.22	
30	6.01	5.24	4.77	3.70	2.93	2.16	1.39	0.962		
	5.06	4.29	3.52	2.75	1.98	1.21	0.782	0.844		

The values of surface tension coefficient of the stratum water with the density of $C = 48.06\,g/l.$

σ = atto – Newton/cm

P, mPa	T, ^{0}K									
	298.15	323.15	348.15	373.15	397.15	423.15	448.15	473.15	523.15	573.15
5	7.11	6.34	5.57	4.80	4.03	3.26	2.49	1.78	0.95	
10	6.61	5.84	5.04	4.30	3.53	2.76	1.99	1.24	0.45	
20	6.11	5.34	4.57	3.80	3.03	2.26	1.49	0.78	0.12	
30	5.71	4.94	4.17	3.40	2.63	1.86	1.09	0.906		
40	4.80	4.03	3.26	2.49	1.72	0.65	0.612	0.180		

The results of the analysis show that the surface tension coefficient decreases with the increase of the temperature, while such dependence is also observed in connection with pressure and the density of stratum water. The results of analysis are shown to the tolerance of 0.56%.

SUMMARY

For the first time the dependence of surface tension coefficient of highly mineralized stratal waters (c =11,2 g/l and 48,06 g/l) on temperature, pressure and density was analyzed using spot-test method and taking into account a wide range of state parameters [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию поверхстного натяжения на модеранизировной установке P-V-T методом компенсации при высоких параметрах состоянии высокоминерализованных пластовых вод, при концентрациях с=11,2 г/л и с=48,06 г/л. Исследование указанных пластовых вод показало, что с увеличением температуры уменьшается поверхностное натяжение данных раствор. Это явление также характерно для воды. Полученные данные оцениваются с погрешностью около 0,56 %.

Lıterature:
1. Sh. K. Gimatudinova “Oil reservoir physics”, Moscow, 1963.
2. V.Levil “The course of Theoretical Physics”, 1972.
3. I.V.Savelyev “The course of General Physics”, publishing house “Nauka”, Moscow, 1973.
4. A.A.Amiraslanov “The Practical Course of General Physics”, publishing house “Maarif”, 1978.
5. “Neftin və qazın fizikası və böhran halının termodinamikası” lab. Hesabat 2012.

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ ДВУХФАЗНЫХ ФЛЮИДОВ

Алхасова Д.А.[1], Зайченко В.М.[2], Рамазанов М.М[1].,Торчинский В.М.[2]

[1]*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;*
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru
[2] *Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская 13/2,Москва, Россия*

Аннотация. Рассматриваются вопросы возникновения автоколебаний при фильтрации газожидкостных смесей в пористом пространстве. Для случая изотермической фильтрации газоконденсата приводятся результаты физического и математического моделирования условий, при которых возможно возникновение автоколебаний расхода флюида. Обсуждается возможность возникновения подобных режимов течения в отсутствие фазового равновесия (эффект «газового подшипника»). Исследование полной системы уравнений фильтрации, включающей уравнение энергии и эффект образования микрозародышей газа, может обнаружить эффект возникновения автоколебаний при фильтрации геотермальных вод.

Введение. В статье рассматриваются вопросы возникновения автоколебаний при фильтрации газожидкостных смесей в пористом пространстве. Автоколебания могут иметь различную природу: механическую, тепловую, электромагнитную, химическую, тем не менее, можно представить схему, общую для всех автоколебательных систем, качественно описывающую этот механизм. Автоколебательная система является открытой, т.е. энергию для возникновения и поддержания автоколебаний она должна получать из внешнего источника. Таким образом, система должна содержать источник постоянного (непериодического) воздействия, нелинейный регулятор, преобразующий постоянное воздействие в переменное (например, в прерывистое во времени), которое и «раскачивает» осциллятор - колеблющийся элемент (элементы) системы, при этом колебания осциллятора через обратную связь управляют работой регулятора, задавая фазу и частоту его действия. Диссипация (рассеивание энергии) в автоколебательной системе возмещается за счёт поступления в неё энергии из источника постоянного воздействия, благодаря чему автоколебания не затухают. Особенностью автоколебаний является то, что их частота и амплитуда, в отличие от вынужденных колебаний, определяются параметрами самой колебательной системы, а не внешним воздействием. При этом наличие в системе нелинейного элемента имеет принципиальное значение, так как именно он ограничивает процесс нарастания амплитуды колебаний и делает колебательную систему устойчивой.

Неустойчивости решений уравнения фильтрации (линейные приближения)

При фильтрации многофазных многокомпонентных смесей через пористое пространство в природных и лабораторных условиях иногда наблюдаются пульсации давления, состава и расхода смеси [1,2] удовлетворительное описание которых до недавнего времени отсутствовало. Выводы ряда отечественных исследователей о возможности пульсаций при отборе флюидов из пласта и цикл исследований по проблеме устойчивости газоконденсатных течений вызывали в свое время широкую дискуссию [3-6]. В работе [3] авторы дают описание этого эффекта в рамках имеющихся моделей фильтрации без привлечения дополнительных физических механизмов.

Рассматривается система уравнений [7]

$$m\frac{\partial}{\partial t}(Nz_i) = \nabla(k\beta_i\,\nabla P)\; i = 1, \ldots\ldots, l,$$

$$\beta_i = \frac{f_г \rho_г y_i}{\mu_г M_г} + \frac{f_ж \rho_ж x_i}{\mu_ж M_ж}, N = \frac{S\rho_ж}{M_ж} + \frac{(1-S)\rho_г}{M_г}, z_i = Vy_i + (1-V)x_i \qquad (1)$$

Здесь P – давление, $\rho_{г,ж}$,,$\mu_{г,ж}$, ,$f_{г,ж}$,,$M_{г,ж}$ – соответственно плотности, вязкости, относительные проницаемости и молекулярные веса газовой и жидкой фаз, S – насыщенность среды жидкостью, x_i, y_i, z_i – доля в жидкости, газе и в смеси i-того компонента, V – мольная доля газа.

Система уравнений (1) совместно с уравнениями состояния фаз и условием их равновесия описывает равновесную изотермическую фильтрацию l-компонентной смеси с фазовыми переходами. Для случая двухкомпонентной смеси авторы [3] исследовали устойчивость решения системы в линейном приближении. Было показано, что в однофазном случае и для течения нескольких несмешивающихся флюидов решение системы (1) всегда устойчиво. Причиной возникновения неустойчивости стационарных режимов служит наличие падающих участков зависимости эффективной плотности Nот давления. Подобное явление может возникнуть при фильтрации газированных жидкостей и газоконденсатных смесей. Таким образом, показано, что появление зависимости $N(P)$ с падающей ветвью в крупномасштабном приближении теории многокомпонентной фильтрации приводит к разрывным по времени (релаксационным) колебаниям в распределенной системе.В работе [4] в линейном приближении сделана оценка периода возникающих автоколебаний T

$T \sim \sqrt{\tau_f \tau_r}$

где τ_r – время релаксации в двухфазной системе и τ_f – время конвективного переноса.

Простейшим примером плотности с падающей ветвью является гипотетическая двухфазная система, в которой (при фиксированном суммарном составе) плотности фаз $\rho_{г,ж}$ меняются с изменением давления слабее, чем насыщенность жидкостью S.

Из определения $N = \frac{S\rho_ж}{M_ж} + \frac{(1-S)\rho_г}{M_г}$и условия $\rho_ж > \rho_г$ следует, что участки убывания N с ростом Pотвечают областям ретроградной конденсации при фильтрации газоконденсатных смесей и неравновесного испарения (запаздыванию образования газовых пузырьков) при фильтрации газированных жидкостей.

Автоколебательный режим фильтрации газоконденсатных смесей

В ОИВТ РАН проведен цикл работ по физическому и математическому моделированию фильтрации газоконденсатных смесей. Газоконденсат – один из видов углеводородного сырья, представляет собой смесь углеводородов метанового ряда (метан + высшие производные). Используется газоконденсат как топливо в энергетических установках, так и, в основном, как ценное сырье для нефтехимической промышленности. Особенностью газоконденсатной смеси является наличие на фазовой диаграмме так называемой ретроградной области. Ретроградная область характеризуется тем, что в отличие от обычного поведения, когда при снижении давления в двухфазной области происходит испарение жидкости вплоть до пограничной кривой, в части фазовой диаграммы, начиная от пограничной кривой до давления максимальной конденсации, происходит конденсация углеводородов, а при дальнейшем снижении давления – испарение. Этот эффект иллюстрирует фазовая диаграмма двухкомпонентной смеси, представленная на рис. 1.

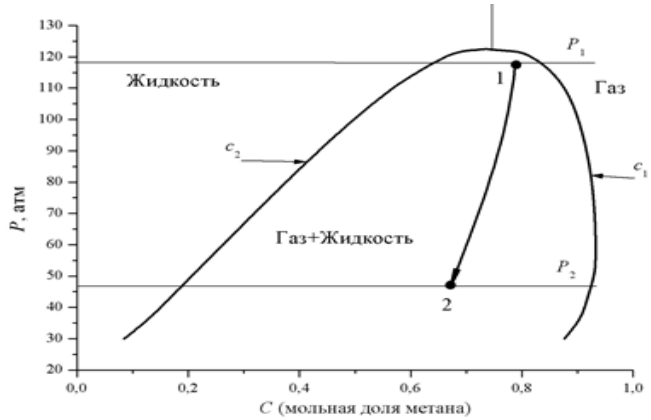


Рис. 1. Фазовая диаграмма бинарной смеси метан–н-бутан при температуре 310 К: $c_1(P)$ – кривая равновесных концентраций в газе; $c_2(P)$ – кривая равновесных концентраций в жидкости; 1 – 2 – совокупность состояний смеси заданного состава

Ретроградные явления проявляются при наличии следующих условий: температура углеводородной смеси находится в диапазоне между критическими температурами компонентов, пластовое давление выше давления начала конденсации, молярная концентрация более летучего компонента (метана) выше ее значения в критической точке (при заданной температуре) и меньше максимального значения, при котором еще сосуществуют две фазы.

Моделирование двухфазной фильтрации в поровом пространстве смесей с ретроградной областью фазовой диаграммы

Для понимания основных физических закономерностей, определяющих процессы фильтрацию смеси, и их численных оценок, в качестве объекта исследований использовались простейшие двух и трехкомпонентные углеводородные системы, теплофизические и термодинамические свойства которых хорошо изучены.

Следует отметить, что наряду с нетипичной фазовой диаграммой, для подобных смесей характерны дополнительные особенности в поведении функций относительных фазовых проницаемостей, которые проявляются при фильтрации двухфазной смеси через пористую среду. Значения функций относительных фазовых проницаемостей и для газовой, и жидкой фаз могут иметь близкие к нулю значения при различных значениях газосодержания.

Физическое моделирование

Экспериментальные исследования фильтрации смесей углеводородов метанового ряда (метан – н-бутан, метан -- пропан – бутан, метан – пентан) проводились в термодинамических условиях, соответствующих ретроградной области фазовой диаграммы [2]. В результате экспериментов была обнаружена область параметров фильтрации, в которой возможно возникновение автоколебательного режима при постоянном перепаде давления (рис.2).

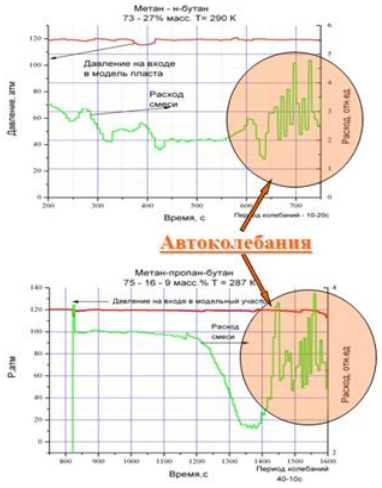


Рис. 2. Результаты физического моделирования

Математическая модель

В дальнейшем была создана математическая модель фильтрации и программа «Plast» для выполнения численных расчетов [8]. В гидродинамическом блоке программы рассчитывается одномерная нестационарная фильтрация двухфазной двухкомпонентной системы (метан–н-бутан) в изотермических условиях в предположении равенства давления в фазах при условии фазового равновесия (характерные времена фазовых переходов существенно меньше гидродинамических). Термодинамический блок рассчитывает состав газовой и жидкой фаз и отношение жидкость-газ в каждой точке пространства. Процесс фильтрации при допущениях о химической нейтральности компонентов в одномерном случае описывается уравнениями баланса массы для каждого компонента, записанными в дивергентной форме относительно молярных плотностей.

$$m\frac{\partial}{\partial t}\left(\sum_j c_{ij} n_j s_j\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\sum_j c_{ij} n_j U_j\right)=0 \quad , \qquad (2)$$

где m – пористость; индекс iсоответствует компоненту(CH_4, C_4H_{10}); индекс j соответствует фазе (1 – газ, 2 – жидкость); c_{ij} – мольная доля i-го компонента в j-ой фазе двухфазной смеси; n_j – молярная плотность j-ой фазы; s_j – объемная доля j-ой фазы в смеси; U_j – скорость j-ой фазы; t – время; x – координата.

Уравнения сохранения импульса записываются в приближении закона Дарси

$$U_j=-k\frac{f_j(s_j)}{\mu_j}\frac{\partial P}{\partial x} \quad , \qquad (3)$$

где k – абсолютная проницаемость; μ_j – коэффициент динамической вязкости j-ой фазы; P – давление; f_j – функция относительной фазовой проницаемости j-ой фазы.

Запишем уравнения состояния для газовой и жидкой фаз, выраженные через коэффициенты сжимаемости.

$$P=n_j z_j RT \quad , \qquad (4)$$

где z_j – коэффициенты сжимаемости j-ой фазы; R – газовая постоянная; T – температура смеси.

Равновесные концентрации компонент в обеих фазах зависят от давления и удовлетворяют условию

$$\sum_i c_{ij}(P)=1 \quad . \qquad (5)$$

Объемные доли фаз связаны соотношением

$$\sum_j s_j=1. \qquad (6)$$

Система уравнений дополняются граничными и начальными условиями.

Результаты численных расчетов представлены на рис.3,4.

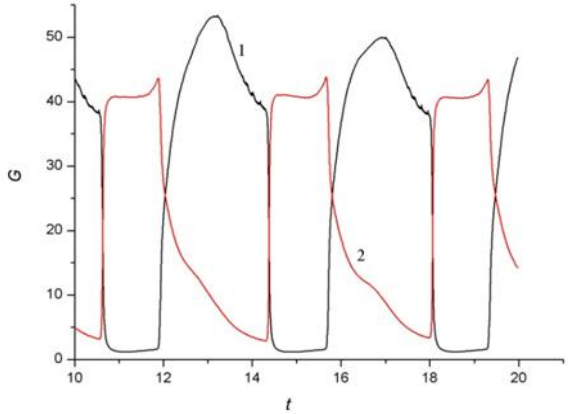


Рис. 3. Зависимость расхода газовой (1) и жидкой (2) фазы (отн. ед.) на выходе из участка (x=L) смеси метан–н-бутан

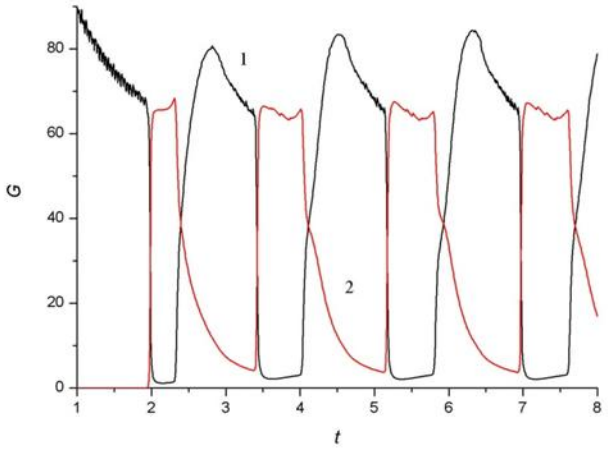


Рис. 4. Зависимость расхода газовой (1) и жидкой (2) фазы (отн. ед.) на выходе из участка ($x=L$) смеси метан–пропан

Рассмотрим возможные режимы фильтрации. Движение в системе осуществляется за счет заданного перепада давления, конкретные значения давления определяют участок фазовой диаграммы и все остальные свойства колебательной системы. За счет внутренних свойств системы происходит уменьшение расхода (выпадение конденсата в ретроградной области, уменьшение значения фазовой проницаемости газа) и уменьшение проводимости выше по потоку или уменьшение расхода за счет уменьшения градиента давления. Газовая фаза останавливается, давление перед выпавшей жидкой фазой возрастает. Хотя плотность жидкой фазы выше газовой, скорость ее движения существенно ниже скорости газовой фазы, поэтому энергия системы уменьшается и достигает некоторого минимального значения, при этом $\Delta E_{out}^{\max}$ – максимальное количество отданной энергии за период. Конденсат, в отличие от нормального двухфазного флюида, испаряется при повышении давления в ретроградной области фазовой диаграммы (эффективная плотность флюида N уменьшается с повышением давления). Вследствие этого начинается испарение выпавшего конденсата, увеличение расхода (увеличение фазовой проницаемости газа и увеличение проводимости выше по потоку). Энергия системы начинает возрастать за счет вовлечения в движение остановившейся газовой фазы (стадия отбора энергии из внешнего источника) и достигает некоторого максимального значения, при этом $\Delta E_{in}^{\max}$ – максимальное количество подведенной энергии из внешней системы за период. Если

$$\Delta E_{out}^{\max} - \Delta E_{in}^{\max} > 0, \quad (7)$$

то в течение каждого периода колебаний энергия у системы отбирается и происходят затухающие колебания. Если наоборот,

$$\Delta E_{out}^{\max} - \Delta E_{in}^{\max} < 0, \quad (8)$$

то энергия системы возрастает и колебания возрастают.

При

$$\Delta E_{out}^{\max} = \Delta E_{in}^{\max} \quad (9)$$

система в установившемся режиме находится в условиях периодических колебаний с постоянной амплитудой.

Таким образом, система представляет автоколебательную систему осцилляторного типа [9].

Режимы фильтрации газожидкостных смесей в пористом пространстве. Фильтрация системы вода – пар

К такому же представлению о механизме возникновения автоколебаний при двухфазной фильтрации можно прийти, рассматривая работу гейзера. В этом случае происходит фильтрация воды, у которой нет ретроградных областей на фазовой диаграмме, но присутствует неоднородное температурное поле, которое, по сути, является аналогом этой ретроградной области: при заполнении устья гейзера водой жидкость под землей вблизи горячей части потока испаряется и появляется возможность возникновения автоколебаний. По аналогии мы предполагаем, что неоднородное температурное поле ответственно также и за механизм «снарядного» режима кипения в трубах. Неоднородное температурное поле вдоль пути фильтрации геотермальных вод может вызвать автоколебательный режим в результате увеличения газонасыщенности на участке, где температура повышается. При изотермической фильтрации двухфазнойгазожидкостной смеси в пористом пространстве появляется некая обратная связь из-за нелинейности коэффициентов фазовой проницаемости. Но при этом обратная связь положительна, т.е. в двухфазной области при увеличении давления при постоянной температуре увеличивается количество жидкости, и, соответственно, растет сопротивление фильтрации. Это в стационаре проводит либо к постоянному расходу только жидкой фазы (при недостаточном градиенте давлений), либо к стационарному расходу газовой и жидкой фазы при достаточно большом перепаде давлений на входе и выходе рассматриваемого участка**.** При наличии вдоль пути фильтрации местных источников тепла и, следовательно, локального повышения температуры, появляются области с падающей ветвью зависимости плотности флюида от давления. Возникновение в дальнейшем автоколебательного режима обусловлено длиной пути фильтрации, проницаемостью пласта, вязкостью жидкости, ее минерализацией и т.д. Для учета влияния каждого из этих параметров необходимо численное решение уравнений фильтрации с учетом уравнения энергии для фильтрующегося потока.

Отметим, что такие решения для области геотермального пласта вокруг добывающей скважины даны в работах [10-12]. При этом наиболее близкой к рассматриваемой тематике является статья [12]. В ней рассматривается осесимметричная нестационарная задача о притоке пароводяной смеси в скважину при фиксированном перепаде давлений с учетом теплообмена пласта с кровлей и подошвой. Один из результатов иллюстрирует рис. 5. На нестационарной стадии эволюции распределение водонасыщенности со временем может меняться немонотонным образом. Видно, что в случае отсутствия теплообмена кривая 3 ниже кривой 2, а кривая 4 выше кривой 3. Другими словами на этой стадии водонасыщенность со временем сначала существенно уменьшается, затем существенно увеличивается. Такие колебания распределения водонасыщенности имеют место и при наличии теплообмена, однако они на рис.5 не видны из-за выбранных моментов времени. Эти колебания более мелкие по сравнению со случаем отсутствия теплообмена и наблюдаются при приближении к стационарному решению. Далее, сравнивая кривые для случая наличия и отсутствия теплообмена, замечаем, что кривые со знаком плюс вокруг скважины расположены ниже, т.е. теплообмен приводит к дополнительному парообразованию. Однако на нестационарной стадии возможны инверсии. Это видно сравнивая кривые 3 и 3+. Вблизи скважины до некоторого расстояния теплообмен приводит к уменьшению водонасыщенности, а после – напротив к ее увеличению. Это связано с тем, что с одной стороны приток тепла тратится на увеличение температуры (давления) фазового перехода, что приводит к конденсации части пара, а с другой на парообразование. Эта конкуренция и приводит к пересечению указанных кривых. Однако, как показывают расчеты, на стационарной стадии распределений (кривые 4 и 4+) во всей рассматриваемой в задаче области теплообмен приводит к уменьшению водонасыщенности, несмотря на некоторое повышение температуры и соответственно давления фазового перехода. Отметим, что в цитируемой работе не ставилась цель выявить автоколебательный режим, но колебатель-

ный характер выхода решения на стационар говорит о том, что в определенной области параметрического пространства такой режим возможен. Выявление всех возможных режимов тепломассопереноса в геотермальном пласте сохраняет свою актуальность, поскольку будет способствовать развитию технологий извлечения теплоносителя.

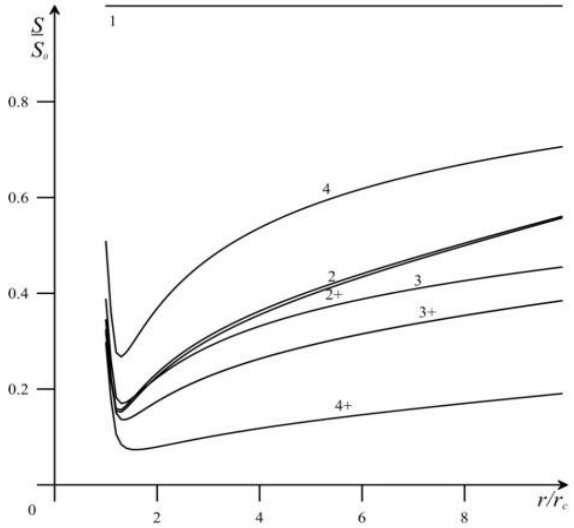


Рис.5. Кривые распределения приведенной водонасыщенности S/S_0 вокруг добывающей скважины в различные моменты времени: $k = 0.6 \cdot 10^{-16} м^2$; 1 - $t = 0$; 2 - $t = 5 \cdot 10^4$; 3 - $t = 5 \cdot 10^5$; 4 - $t = 6.5 \cdot 10^6$. Знаком + обозначены кривые, рассчитанные с учетом теплообмена пласта с кровлей и подошвой

Процессы самоорганизации в газожидкостных системах вблизи давления насыщения

Как следует из работы [13], экспериментальные и теоретические исследования, проведенные в последнее время с газосодержащими жидкостями, показали, что в предпереходных условиях (т. е. в области давлений, превышающих давление насыщения, но близких к нему) реологические и релаксационные свойства газожидкостных систем во многом определяются наличием «микрозародышей» – мельчайших газовых пузырьков, кооперативное действие которых проявляется при приближении к давлению насыщения. Естественно предположить, что зародыши новой фазы образуются не только в жидкостях с растворенным газом. Имеются результаты лабораторных исследований, которые показывают, что зародышеобразование имеет место и в газоконденсатных смесях: при приближении к давлению выпадения конденсата образуются зародыши жидкой фазы, существенно влияющие на фильтрационные характеристики пористых сред. При приближении к давлению насыщения возможно образование стабильныхмикрозародышей, которые адсорбируются на поверхности пористой среды. Появление этого слоя приводит (вследствие эффекта «газового подшипника») к снижению фильтрационных сопротивлений и росту расхода флюида, который достигает своего максимума при давлении, немного превышающем давление насыщения. В непосредственной близости от давления насыщения увеличение размеров зародышей приводит к возникновению дополнительных гидравлических сопротивлений за счет закупоривания микропор жидкостью, поэтому расход флюида начинает уменьшаться. Снижение давления до уровней, меньших давления насыщения, ведет к резкому увеличению фильтрационных сопротивлений. Автоколебания расхода в данном случае возможны при условии, что время жизни микрозародышей газа одного порядка с характерными временами фильтрации.

Эффекты зародышеобразования наиболее отчетливо проявляются при фильтрации многокомпонентных сред в пористых средах. Естественно предположить, что при двухфаз-

ной фильтрации геотермальных вод в неоднородном температурном поле этот эффект также может иметь место.

Выводы

- Автоколебательные процессы при фильтрации в пористых средах могут иметь различную физическую природу, но большая часть из них может быть описана системой уравнений, включающей уравнение неразрывности и уравнение движения. При исследовании этой системы обнаружены режимы автоколебаний и параметры фильтрации, при которых автоколебательный режим возможен.
- Исследование полной системы уравнений фильтрации, включающей уравнение энергии и эффект образования микрозародышей газа, может обнаружить эффект возникновения автоколебаний при фильтрации геотермальных вод.
- Выявление автоколебательных режимов тепломассопереноса в геотермальном пласте может способствовать развитию технологий извлечения теплоносителя.

Эта работа выполнена при поддержке гранта РНФ проект No. 14-50-00124.

Литература:

1. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. - М.: ОАО "Издательство "Недра", 2003. - 880 с.: ил. ISBN 5-247-03885-1
2. Л. Б. Директор, В.М. Зайченко, И.Л. Майков, В.М. Торчинский Особенности фильтрации углеводородных смесей в пористых средах. – М.: ОИВТ РАН, 2016. – 126 с.
3. Митлин В. С. Автоколебательные режимы течения двухфазных многокомпонентных смесей через пористые среды.– Докл. АН СССР, 1987, 296, 1323–1327 –РЖМех, 1988, 3Г350;
4. Макеев Б. В., Митлин В. С. Автоколебания в распределенных системах: фильтрация с фазовыми переходами.– Докл. АН СССР, 1990, 310, № 6, 1315–1319
5. OladyshkinS .Panfilov M. Streamline splitting between thermodynamics and hydrodynamic in compositional gas-liquid flow through porous media. ComptesRendusAcad. Sci., Mechanique, t. 335, № 1, 7-12. 2007
6. Зайченко В.М., Майков И.Л., Торчинский В.М. Особенности фильтрации углеводородных смесей в пористых средах//ТВТ, 2013, том 51, № 5, с. 1–9.
7. Розенберг М.Д., Кундин С.А. Фильтрация газированной жидкости и других многокомпонетных смесей в пластах. М.: Недра; 1969. 456 с.]
8. Майков И.Л., Зайченко В.М, Торчинский В.М. Программа расчета процессов двухфазной фильтрации смеси углеводородов с фазовыми переходами и наличием ретроградной области на фазовой диаграмме. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2012616011 от 29.06.2012 г.
9. Магнус К. Колебания. М: Мир, 1982, 304 с.
10. Алхасов А.Б., Рамазанов М.М.// Радиальная модель извлечения пара из высокотемпературного пласта одиночной скважиной// ИФЖ. 2014. Т. 87. №3. С.539-548.
11. Рамазанов М.М., Алхасова Д.А. Математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси// ТВТ, №2, 2017, С. 284-291.
12. Рамазанов М.М., Алхасова Д.А., Абасов Г.М. Течения и теплообмен в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси // ИФЖ, т.90, №3, 2017, С. 640-648.
13. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов Р.Н., Басниев Р.Н. Этюды о моделировании сложных систем нефтеотдачи. Нелинейность, неравновесность, неоднородность. Уфа: Голем, 1999, 464 стр.

ОСВОЕНИЕ ТЕПЛА СУХИХ ГОРНЫХ ПОРОД НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Алхасова Д.А., Алхасов Б.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru

Приведены эффективные технологии освоения тепла сухих горных пород низкого потенциала скважинными теплообменниками в комбинации с тепловыми насосами. Разработана технологическая схема тепло- и горячего водоснабжения с отбором петротермального тепла. В качестве рабочего тела в такой системе предложено использование низкокипящих рабочих агентов нового поколения. Изучены процессы тепломассопереноса в приведенных системах с проведением многовариантных оптимизационных расчетов и предложены режимы их эксплуатации по оптимальному съему тепла с горной породы.

Истощение запасов традиционных видов топлива и экологические последствия их использования обусловили значительный спрос на технологии освоения ВИЭ, где во многих странах достигнуты значительные успехи. Энергосберегающие технологии на основе геотермальной энергии являются важной составляющей в освоении возобновляемых энергетических ресурсов и успешно конкурируют с другими способами получения энергии. На сегодняшний день из пригодных для использования геотермальных ресурсов на долю гидрогеотермальных ресурсов приходится чуть более 1%, на долю петротермальных ресурсов около 99% [1]. Дальнейшее эффективное освоение ресурсов геотермальной энергии связано с освоением петротермальных ресурсов. Практическое использование огромных запасов петротермальных ресурсов связано с необходимостью решения ряда сложных научно-технических проблем. Создание технологий, сочетающих в себе условия для эффективного освоения тепла сухих горных пород, позволит более эффективно осваивать огромные запасы петротермальной энергии. Глобальное освоение геотермальных ресурсов возможно лишь при освоении колоссальных запасов петротермальной энергии.

В России имеются огромные ресурсы низкопотенциальных термальных вод, непосредственное использование которых ограничено из-за их низкой температуры. Однако использование таких вод в качестве низкотемпературного источника тепла в технологических схемах ТНУ позволит повысить их тепловой потенциал до необходимого уровня [2]. При отсутствии на небольших глубинах грунтовой или слаботермальной воды в ТНУ малой мощности можно использовать теплоту грунта земли. Этот экологически чистый источник тепла достаточно широко применяется в США, Дании, Германии, Швейцарии, Дании, Норвегии. Для отбора такого тепла служат грунтовые теплообменники [2]. Для широкой реализации ТСТ с скважинными теплообменниками необходимо разработать оптимальные конструкции теплообменников, исследовать вопросы взаимного влияния теплового насоса и грунтового теплообменника и оптимизировать режимы эксплуатации всей установки.

Известна система низкотемпературного отопления и горячего водоснабжения (разработчик ОАО «Инсолар-Инвест»), включающая скважину-теплообменник, тепловой насос, пиковый электродоводчик и контуры горячего водоснабжения и напольного отопления [1]. В такой системе промежуточный теплоноситель (вода) циркулирует в контуре «скважина-теплообменник - циркуляционный насос - испаритель теплового насоса», отбирая тепло в скважине от окружающей горной породы и передавая его в испарителе низкокипящему рабочему агенту. Теплоноситель в испарителе охлаждается на 4°С. Отбираемая от горной породы тепловая энергия в тепловом насосе с помощью компрессора переводится на более высокий температурный уровень (55°С) и через конденсатор передается в контуры горячего водоснабжения и низкотемпературного напольного отопления.

С точки зрения бесперебойного обеспечения потребителя энергией наиболее эффективны комбинированные технологические системы, использующие два и более вида ВИЭ. Для эффективного обеспечения теплом и горячей водой децентрализованных потребителей была разработана комбинированная солнечно-геотермальная система (рис.1) [3].

Система состоит из солнечных коллекторов (1), теплообменника (2), теплоизолированного бака-аккумулятора (3), контура горячего водоснабжения (7), теплового насоса (8), скважины-теплообменника (9) и контура напольного отопления (12). В этой системе теплоноситель нагревается в солнечных коллекторах (1) энергией солнца и отдает затем тепловую энергию воде через теплообменник (2), вмонтированный в бак-аккумулятор (3). В баке-аккумуляторе хранится горячая вода, поэтому он должен иметь хорошую теплоизоляцию. В первом контуре, где расположены солнечные коллекторы, может использоваться естественная или принудительная циркуляция теплоносителя. В бак-аккумулятор вмонтирован и электрический нагреватель (6). В случае понижения температуры в баке-аккумуляторе ниже установленной (продолжительная пасмурная погода или малое количество часов солнечного сияния зимой) электронагреватель автоматически включается и догревает воду до заданной температуры. Холодная вода по трубе (5) подается в бак-аккумулятор, а нагретая вода из бака по трубе (4) отводится к водоразборным устройствам контура горячего водоснабжения (7).

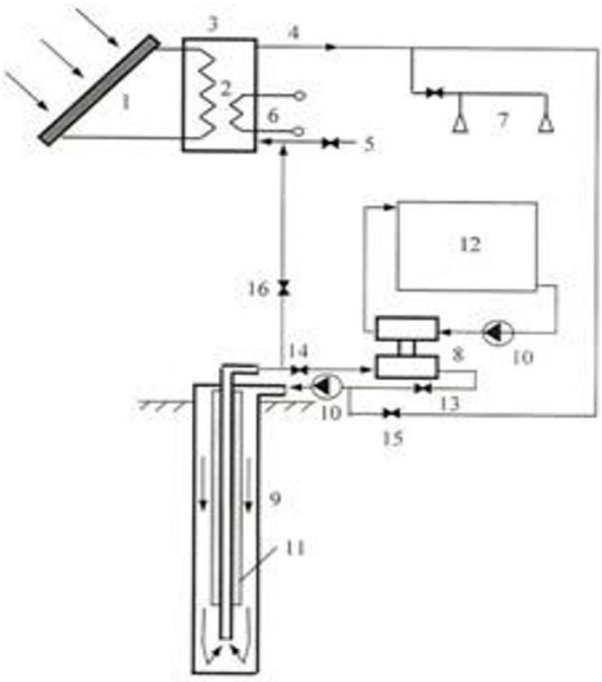


Рис. 1. Принципиальная схема гелио-геотермальной системы отопления и горячего водоснабжения

В цикле теплового насоса холодная вода с температурой 5°С опускается в межтрубном пространстве скважины-теплообменника и отбирает низкопотенциальное тепло с окружающей горной породы. Далее нагретая в зависимости от глубины скважины до температуры 10-15°С вода поднимается по центральной колонне труб на поверхность. Для предотвращения обратного оттока тепла центральная колонна снаружи теплоизолирована (11). На поверхности вода из скважины поступает в испаритель теплового насоса, где происходит нагрев и испарение низкокипящего рабочего агента. После испарителя охлажденная вода вновь направляется в скважину. За отопительный период при постоянной циркуляции воды в скважине происходит постепенное охлаждение горной породы вокруг скважины. В конденсаторе теплового насоса тепловая энергия высокого потенциала передается в систему напольного отопления (12).

Солнечные коллекторы устанавливаются из теплового расчета для зимнего периода эксплуатации системы, когда солнечное сияние минимальное, что приведет к некоторому

увеличению их площади. В летний период избыток тепловой энергии в виде горячей воды из бака-аккумулятора направляется в скважину для полного восстановления температуры в горной породе вокруг скважины. В межотопительный период вентили (13) и (14) закрыты, и при открытых вентилях (15) и (16) горячая вода из бака аккумулятора циркуляционным насосом закачивается в межтрубное пространство скважины, где по мере спуска происходит теплообмен с окружающей скважину горной породой. Далее охлажденная вода по центральной теплоизолированной колонне направляется обратно в бак-аккумулятор. В отопительный период, наоборот, вентили (13) и (14) открыты, а вентили (15) и (16) закрыты. Циркуляция теплоносителей осуществляется с помощью насосов (10).

В приведенной системе потенциал солнечной энергии используется максимальным образом, так как солнечные коллекторы эксплуатируются в течение всего года на подогрев воды в системе горячего водоснабжения и на нагрев горных пород вокруг скважины в системе низкотемпературного отопления. Регенерация тепла в горной породе позволяет поддерживать высокие значения коэффициента преобразования теплового насоса за отопительный период и эксплуатировать систему теплоснабжения в экономически оптимальном режиме.

На рис. 2 представлена разработанная схема тепло- и горячего водоснабжения с отбором петротермального тепла. В качестве рабочего тела в такой системе предложено использование озонобезопасных низкокипящих рабочих агентов нового поколения, обладающих хорошими теплофизическими и термодинамическими показателями. Низкокипящий жидкий теплоноситель опускается по межтрубному кольцевому пространству скважинного теплообменника и отбирает тепло от окружающей горной породы, далее в нагретом состоянии поднимается по внутренней теплоизолированной колонне (2). На поверхности рабочее тело в состоянии перегретого пара сжимается компрессором (3) до давления, которому соответствует более высокая температура насыщения, и поступает в конденсатор (4), где отдает воде системе теплоснабжения (5) теплоту перегрева и конденсации. В охладителе (6) температура рабочего агента снижается до более низкого значения за счет передачи тепла нагреваемой воде (8). В дросселе (7) параметры теплоносителя доводятся до исходных значений, цикл повторяется.

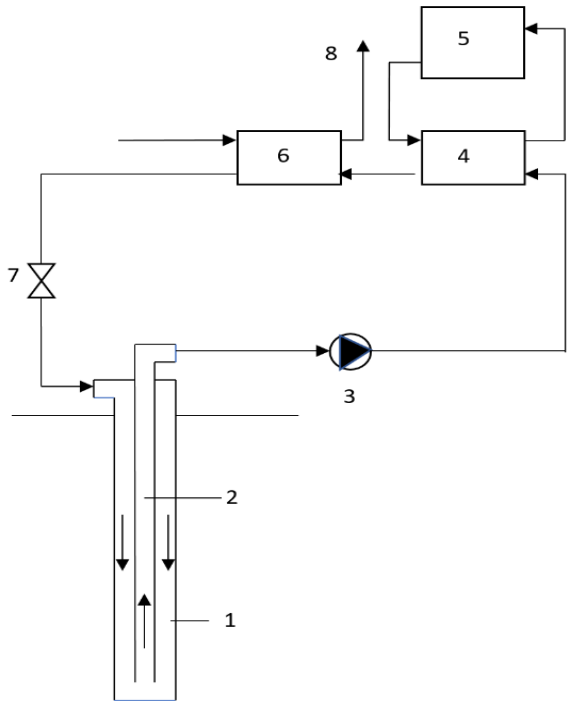


Рис. 2. Схема тепло- и горячего водоснабжения с отбором петротермального тепла. 1 – скважина-теплообменник; 2 – подъемная теплоизолированная колонна; 3 – компрессор; 4 – конденсатор; 5 – система низкотемпературного отопления; 6 – охладитель; 7 – дроссельный клапан; 8– на горячее водоснабжение

Использование низкокипящего рабочего тела в такой системе избавляет от необходимости установки испарителя на поверхности.

Для оценки тепломассопереноса в скважинном теплообменнике для съема тепла горной породы, конструкция которого подобна представленным в приведенных выше схемах, выпишем выражения для тепловых потоков. Тепловые потоки от горной породы в кольцевой зазор, а также из лифтовой колонны в кольцевой зазор

$$q_{T1}=\frac{2\pi\left(T_{\Gamma}-T_1\right)}{\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_1^e}{R_1^i}+\frac{1}{\lambda_{\Gamma}}\ln\frac{R(t)}{R_1^e}}\ ;\ q_{T2}=\frac{2\pi\left(T_2-T_1\right)}{\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_2^e}{R_2^i}+\frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}}{R_2^e}} \qquad (1)$$

где R_1^i, R_1^e - внутренний и внешний радиусы обсадной колонны, м; R_2^i, R_2^e - внутренний и внешний радиусы лифтовой колонны, м; R(t) – условный радиус температурного влияния скважины, м; z- вертикальная координата; T1(z)-средняя по кольцевому сечению температура, ^oC; T2(z)-средняя по круговому сечению температура, ^oC; H – глубина теплообменника, м; Г – геотермический градиент, ^oC/м; $\lambda_В$, $\lambda_Г$, $\lambda_{ИЗ}$ – коэффициент теплопроводности металла, горной породы, изоляционного материала, Вт/(м ^oC); $\delta_{ИЗ}$ – толщина изоляции, м.

После некоторых математических выкладок и упрощений получим выражения для профилей температуры теплоносителя в круговом и кольцевом зазорах.

$$T1(z)=\left(\frac{b-k1}{b}\right)C1e^{k1z}+\left(\frac{b-k2}{b}\right)C2e^{k2z}+\Gamma z+T0 \qquad (2)$$

$$T2(z)=C1e^{k1z}+C2e^{k2z}+\Gamma z+\frac{\Gamma}{b}+T0 \qquad (3)$$

$$a=\frac{2\pi\lambda_{\Gamma}}{\ln\frac{R(t)}{R_1^e}c_BQ}\ ;\ b=\frac{2\pi\lambda_{из}}{\ln\frac{R_2^e}{R_2^i}c_BQ};\ k1,2=\frac{-a}{2}\pm\sqrt{\frac{a^2}{4}+ab}$$

$$A=\left(\frac{b-k2}{b}\right)\left(\left(1-\frac{b}{b-k2}\right)e^{k2H}+\left(\frac{b}{b-k1}-1\right)e^{k1H}\right);$$

$$B=\frac{\Gamma}{b}+\left(\left(T_{зк}-T0\right)e^{k1H}\left(\frac{b}{b-k1}-1\right)\right)$$

$$C2=\frac{B}{A}\ ;\ C1=\left(\frac{b}{b-k1}\right)\left(\left(T_{зк}-T0\right)-\left(\frac{b-k2}{b}\right)C2\right)$$

Здесь T0- температура нейтрального слоя, ^oC; $T_{зк}$- температура теплоносителя на входе в теплообменник, ^oC; Q - объемный расход теплоносителя, $м^3$/сек.

На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости извлекаемой тепловой мощности от расхода теплоносителя (вода) для различных диаметров труб. При проведении расчетов принимались следующие значения величин: $T_{зк}$=5 ^oC; $\delta_{ИЗ}$=10 мм; R(t)=5 м; $\lambda_Г$=2,5 Вт/(м ^oC). Обозначение зависимостей на рис. 3-5 цифрами от 1 до 5 соответствует глубинам внутрискважинного теплообменника H =100, 200, 300, 400, 500 м.

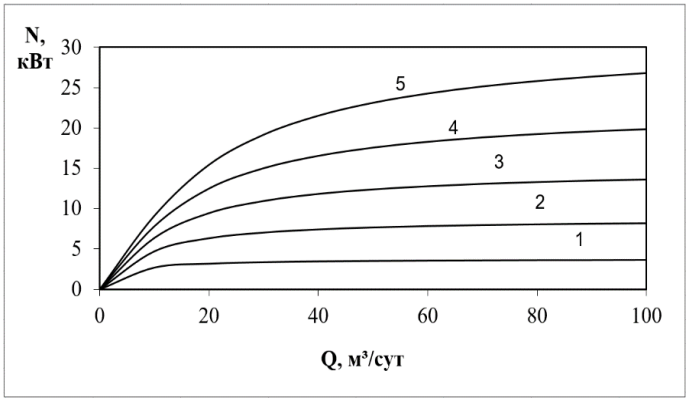


Рис. 3. Зависимость теплосъема от объемного расхода теплоносителя при различных значениях глубины скважинного теплообменника R_1^i =51,5 мм; R_1^e =57 мм; R_2^i =18 мм; R_2^e =21 мм

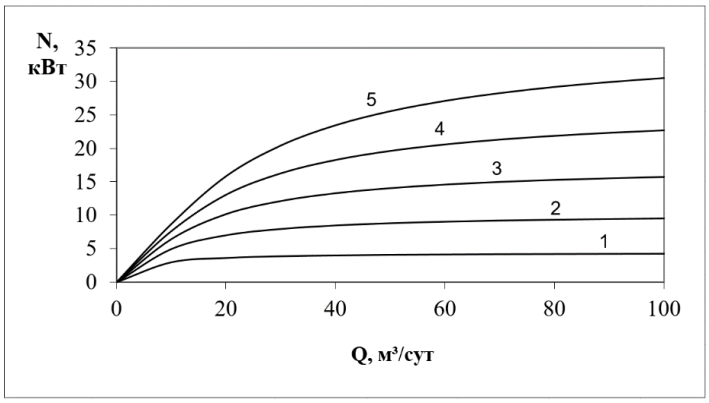


Рис. 4. Зависимость теплосъема от объемного расхода теплоносителя при различных значениях глубины скважинного теплообменника R_1^i =100,5 мм; R_1^e =109,5 мм; R_2^i =39,5 мм; R_2^e =44,5 мм

Увеличение площадей кольцевого и кругового сечений теплообменника приводит к уменьшению скорости теплоносителя. Малые скорости способствуют увеличению прироста температуры теплоносителя по высоте теплообменника, что в свою очередь приводит к росту тепловой мощности.

Необходимо отметить, что на процесс теплосъема влияют не только конструктивные параметры теплообменника, но и теплофизические параметры горных пород, слагающих массив. На рис. 5 показаны зависимости теплосъема при $\lambda_Г$=3,0 Вт/(м ºС).

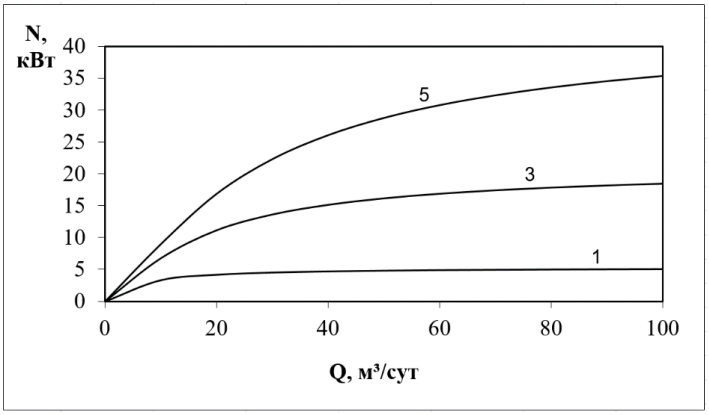


Рис. 5. Зависимость теплосъема от объемного расхода теплоносителя при различных значениях глубины скважинного теплообменника R_1^i =100,5 мм; R_1^e =109,5 мм; R_2^i =39,5 мм; R_2^e =44,5 мм; $\lambda_Г$=3,0 Вт/(м ºС)

Представленные результаты проведенных многовариантных расчетов дают возможность подбора оптимальных параметров исследуемой скважинно-пластовой системы. Можно отметить, что для извлечения тепла сухих горных пород низкого потенциала целесообразно обеспечивать малые расходы теплоносителя. Как видно из графиков (рис. 3-5) для глубин теплообменника H=100, 200 м наиболее оптимальным является расход воды Q=40-50 $м^3$/сут, дальнейшее увеличение расхода не приводит к существенному росту тепловой мощности. Увеличение глубины теплообменника приводит и к увеличению значения оптимального расхода, так при H=400 м значение оптимального расхода может колебаться в пределах Q=60-80 $м^3$/сут.

Окончательный выбор эксплуатационных характеристик системы по съему низкопотенциального тепла сухих горных пород зависит от технико-экономического обоснования с учетом капитальных и эксплуатационных затрат. С увеличением глубины скважины-теплообменника наряду с ростом извлекаемой тепловой мощности увеличиваются капитальные затраты, возрастают и эксплуатационные затраты, связанные с прокачкой теплоносителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-08-00529.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376с.
2. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Алхасова Д.А., Каймаразов А.Г., Рамазанов М.М.* Освоение низкопотенциального геотермального тепла. М.: Физматлит. 2012 г. 276 с.
3. Система теплоснабжения и горячего водоснабжения на основе возобновляемых источников энергии / Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. // Патент № 2445554. 2012 г.
4. *Алхасова Д.А.* Разработка технологий освоения геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии. // Материалы IV Междун. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2015. Том 1, вып.5.с. 322-326.
5. *Алхасова Д.А.* Разработка энергоэффективных технологий извлечения и использования петротермальной энергии для электроэнергетических нужд. // Материалы Международного Конгресса REENCON XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность». Москва. 2016. С. 86-90.
6. *Алхасова Д.А.* Разработка технологий освоения тепла сухих горных пород высокого потенциала для выработки электроэнергии. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и современной науки: теория и практика актуальных исследований» посвященной 80-летию Магомедова М-К.М. 19 - 21 октября 2016.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКВАЖИННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПУТЕМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

Алхасова Д.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru

Предложен способ интенсификации процесса теплообмена в скважинных теплообменниках продольным оребрением теплопередающей поверхности. Приведен метод расчёта конструктивных параметров скважинных теплообменников при их продольном оребрении для случая турбулентного и установившегося движения. Приведены значения прироста теплового потока при различных значениях параметров теплообменника с продольными ребрами.

При проектировании теплообменного аппарата выбирается форма рабочей поверхности, схема движения теплоносителей и их скорости, конструктивные параметры и проводится тепловой и гидравлический расчет нескольких вариантов аппарата с тем, чтобы выбрать наиболее эффективный.

При строительстве геотермальных скважин перспективным является установка в верхней их части теплообменников типа «труба в трубе» [1]. Внутрискважинные теплообменники проще в изготовлении, надежны в эксплуатации, капитальные затраты, связанные с их обустройством не превышают затрат по изготовлению кожухотрубных теплообменников.

Снижение массогабаритных характеристик теплообменных аппаратов является актуальной проблемой. Проблемы снижения массогабаритных характеристик теплообменного оборудования могут успешно решаться с помощью интенсификаторов теплоотдачи. К настоящему времени существует множество научных работ, где предложены и исследованы разнообразные методы интенсификации процесса теплообмена [2,3].

В качестве одного из способов интенсификации процесса теплообмена используется продольное оребрение (рис. 1) теплопередающей поверхности [4,5].

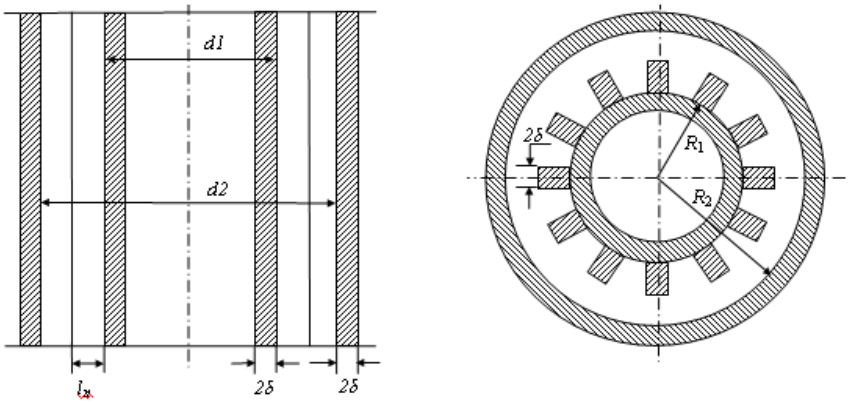


Рис. 1. Схема ребристой теплопередающей поверхности.
d_1- внешний диаметр внутренней трубы; d_2- внутренний диаметр наружной трубы; 2δ-толщина стенки внутренней и внешней трубы и ребра; l_p - высота ребра

В работе [6] предложен способ подогрева воды в скважинных теплообменниках с продольными ребрами. Сущность способа заключается в формировании потока с циркулирующим первичным теплоносителем (термальная вода), а также потока с циркулирующим по замкнутому контуру вторичным теплоносителем (сетевая вода), теплопередаче между этими потоками, подаче подогретой сетевой воды к отопительным приборам системы отопления. При этом вначале сетевая вода, опускаясь по наружному межтрубному кольцевому про-

странству в теплообменнике, установленном в нагнетательной скважине, и поднимаясь по внутреннему межтрубному пространству с продольными ребрами, предусмотренными на теплопередающей поверхности трубопровода, внутри которого циркулирует нагретая термальная вода, отбирает остаточную теплоту. На поверхности подогретая сетевая вода снова направляется в теплообменник добычной скважины, где также делает два захода, опускаясь по межтрубному пространству с продольными ребрами на теплопередающей поверхности, отбирая тепло от более нагретой термальной воды, а затем, поднимается по внешнему кольцевому пространству и направляется на вход теплового насоса, в котором ее температура доводится до более высокого значения. С помощью сетевого насоса нагретая сетевая вода подается на приборы системы отопления. Результаты экспериментального исследования эффективности способа подогрева воды и устройства для его осуществления позволили установить, что использование скважинных теплообменников с продольными ребрами на теплопередающих поверхностях позволило увеличить тепловой поток от первичного теплоносителя к вторичному до 2,92 раз.

Метод расчёта конструктивных параметров скважинных теплообменников при их продольном оребрении для случая турбулентного и установившегося движения предложен в [5]. Прирост передачи тепла рассчитывается введением температурных пристеночных слоев, толщина которых зависит от числа Нуссельта.

Общий поток тепла через трубу с продольными ребрами равен

$$q = \frac{\pi R_1 (T_1 - T_2)}{\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta}{\lambda_M}} \left[\left(1 - \frac{n\delta}{\pi R} \right) + \frac{n}{\pi R k} \frac{(1 - e^{-kl})(1 + Ae^{-kl})}{Ae^{-2kl} + 1} + \frac{n\delta}{\pi R} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}} \right] \qquad (1)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\lambda_B \delta}{\lambda_M \delta_T}}, \quad A = \frac{1 - \kappa}{1 + \kappa}, \quad k = \frac{\kappa}{\delta},$$

Отношение q к тепловому потоку без ребер q_0

$$\frac{q}{q_0} = \left(1 - \frac{n\delta}{\pi R} \right) + \frac{n}{\pi R k} \frac{(1 - e^{-kl})(1 + Ae^{-kl})}{Ae^{-2kl} + 1} + \frac{n\delta}{\pi R} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}} \qquad (2)$$

где λ_B - коэффициент теплопроводности воды, омывающей оребренную теплопередающую поверхность; λ_M - коэффициент теплопроводности металла, применяемого при изготовлении оребренной цилиндрической поверхности; 2δ - толщина стенок трубы и ребер, принимаемая одинаковой, n – количество ребер, l – высота ребра, δ_T - толщина температурного пристеночного слоя, образующегося на поверхностях труб; R_1 – внешний радиус оребренной трубы, T_1 – температура первичного теплоносителя, T_2 - температура вторичного теплоносителя, $T_1 > T_2$. Температура на внутренней поверхности внутренней трубы отличается от T_1, так как температурный пристеночный слой толщины δ_T оказывает тепловое сопротивление. Такой же толщины температурный пристеночный слой образуется и на внешней поверхности внутренней трубы, а также на поверхностях ребер.

После проведения многовариантных расчетов установлено, что передачу тепла в теплообменниках можно увеличить продольным оребрением в несколько раз; продольное оребрение более эффективно при малых скоростях потока жидкости; увеличение высоты ребер до 5-10 мм способствует росту передачи тепла, но при дальнейшем увеличении высоты рост прекращается; с увеличением числа ребер отвод тепла растет пропорционально их числу, однако увеличивается гидравлическое сопротивление; более теплопроводные материалы со-

здают возможности для большей эффективности отвода тепла; оптимальная высота рёбер колеблется в пределах от 5 до 15 мм, их число – от 16 до 32.

Полученные данные дают возможность подбора конструктивных параметров теплообменника. Варьируя параметрами теплопередающей поверхности, можно добиться увеличения теплового потока через оребренную поверхность в сравнении с не оребренной поверхностью до 4-5 раз. Однако следует отметить, что наличие оребрения существенным образом влияет на гидравлические сопротивления потоку. Графики зависимости приведённого перепада давления [5] (отношения к перепаду давления без рёбер) в зависимости от высоты ребер и для различного их числа показывают, что оребрение поверхности приводит к значительному росту перепада давления (в 5 раз и более) в зависимости от количества ребер и их высоты. В этой связи был сформулирован критерий оптимальности выбора числа рёбер и их высот. За такой критерий был принят максимум отношения приведенного теплового потока к приведенному дебиту скважины. Поскольку дебит пропорционален при развитом турбулентном движении корню квадратному от перепада давления, то был предложен максимум отношения выражения (2) к корню квадратному от выражения (3).

Отношение перепада давления для кольцевого сечения с ребрами к кольцевому сечению без ребер выражается в виде

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_к} = \left(1 + \frac{nl}{\pi(R_2 + R_1)}\right)\left(1 - \frac{nl\delta}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}\right)^{-3}, \qquad (3)$$

где R_1- внешний радиус внутренней оребренной трубы; R_2 - внутренний радиус наружной трубы.

На рис. 2 приведены эти подсчитанные отношения для случая стальной конструкции, когда λ_M =45 Вт/м·°С, 2δ=3мм, R_1=27мм, R_2=60мм при скоростях движения воды υ=1м/с, υ=0,5м/с, υ=0,2м/с.

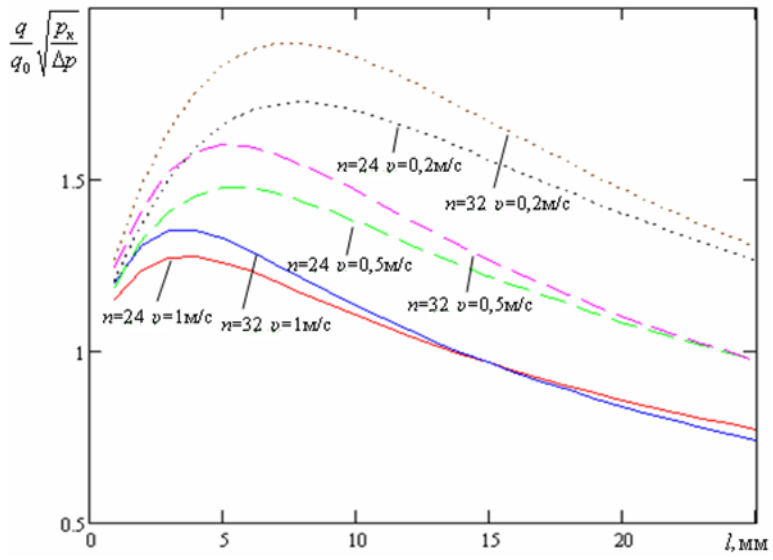


Рис. 2. К выбору критерия оптимальности для стальной конструкции теплообменника

На рис. 3 изображена противоточная схема движения теплоносителей в теплообменнике типа «труба в трубе». По внутренней трубе радиуса R_1 и толщиной 2δ в направлении оси Ox движется турбулентный поток горячей воды (первичный теплоноситель) с температурой $T_1(x)$. Снаружи по кольцевому зазору движется в противоположном направлении холодная вода (вторичный теплоноситель) с температурой $T_2(x)$.

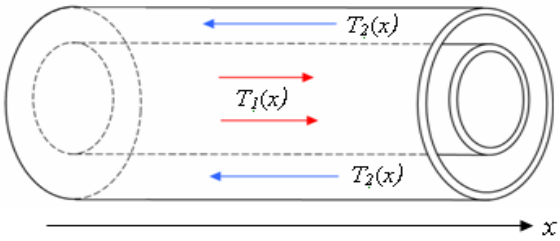


Рис. 3. Противоточный теплообменник

В обозначениях $T_1(0)$ и $T_1(L)$ есть температуры первичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника соответственно; $T_2(0)$ и $T_2(L)$ есть температуры вторичного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника соответственно.

Тепловой поток от первичного теплоносителя ко вторичному на единицу длины составит [7]

$$q = \frac{2\pi R_1 (T_1 - T_2)}{\frac{\delta_{T1}}{\lambda_B} + \frac{2\delta}{\lambda_M} + \frac{\delta_{T2}}{\lambda_B}}, \qquad (4)$$

Очевидно, что для оребренной трубы тепловой поток

$$q = \frac{\pi R_1 (T_1 - T_2)}{\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta}{\lambda_M}} \left[\left(1 - \frac{n\delta}{\pi R}\right) + \frac{n}{\pi R k} \frac{(1 - e^{-kl})(1 + Ae^{-kl})}{Ae^{-2kl} + 1} + \frac{n\delta}{\pi R} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}} \right]$$

Количество теплоты, отданное горячим теплоносителем (на единицу длины трубы) равно количеству тепла, воспринятому холодным теплоносителем (на той же единице длины) и равно количеству тепла, передаваемому горячим теплоносителем холодному.

$$q = -c_B q_{B1} \frac{dT_1}{dx} = -c_B q_{B2} \frac{dT_2}{dx},$$

q_{B1} и q_{B2} - объемный расход первичного и вторичного теплоносителей в теплообменнике (по внутренней трубе и кольцевому зазору); c_B - объемная теплоемкость воды.

Рассмотрим случай, когда расход первичного теплоносителя больше расхода вторичного теплоносителя, т.е. $q_{B1} > q_{B2}$.

Так как расходы теплоносителей не равны, то

$$-c_B q_{B1} \frac{dT_1}{dx} = \frac{2\pi R_1 (T_1 - T_2)}{\frac{\delta_{T1} + \delta_{T2}}{\lambda_B} + \frac{2\delta}{\lambda_M}}; \quad -c_B q_{B2} \frac{dT_2}{dx} = \frac{2\pi R_1 (T_1 - T_2)}{\frac{\delta_{T1} + \delta_{T2}}{\lambda_B} + \frac{2\delta}{\lambda_M}} \qquad (5)$$

Обозначим $\alpha = \dfrac{2\pi R_1}{c_B q_{B1_1} \left(\dfrac{\delta_{T1} + \delta_{T2}}{\lambda_B} + \dfrac{2\delta}{\lambda_M} \right)}$

Для оребренной трубы

$$\alpha = \frac{\pi R_1}{c_B q_{B1_1} \left(\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta}{\lambda_M} \right)} \left[\left(1 - \frac{n\delta}{\pi R}\right) + \frac{n}{\pi R k} \frac{(1 - e^{-kl})(1 + Ae^{-kl})}{Ae^{-2kl} + 1} + \frac{n\delta}{\pi R} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}} \right]$$

Тогда имеем следующую систему

$$\begin{cases} \dfrac{dT_1}{dx} = -\alpha(T_1 - T_2) \\ \dfrac{dT_2}{dx} = -\dfrac{q_{B1}}{q_{B2}}\alpha(T_1 - T_2) \end{cases}$$

После некоторых математических преобразований выражения для определения профилей температур теплоносителей в теплообменнике принимают вид

$$T_1(x) = \frac{q_{B1}T_1(0) - q_{B2}T_2(0)}{q_{B1} - q_{B2}} - \Delta T_0 \frac{q_{B2}}{q_{B1} - q_{B2}} \exp\left(\frac{q_{B1} - q_{B2}}{q_{B2}}\alpha x\right) \quad (6)$$

$$T_2(x) = \frac{q_{B1}T_1(0) - q_{B2}T_2(0)}{q_{B1} - q_{B2}} - \Delta T_0 \frac{q_{B1}}{q_{B1} - q_{B2}} \exp\left(\frac{q_{B1} - q_{B2}}{q_{B2}}\alpha x\right) \quad (7)$$

На рис. 4 приведены профили температур теплоносителей в противоточном теплообменнике с продольными ребрами. Для расчетов принимались следующие данные: n=16; l=10мм; λ_M =45 Вт/м·°С, 2δ=2мм, R_1=27мм, $\delta_{T1}=\delta_{T2}=\delta_T$=0,125мм; q_{B1}=200м^3/сут; q_{B2}=100м^3/сут. Для сравнения приведены профили температур при отсутствии ребер.

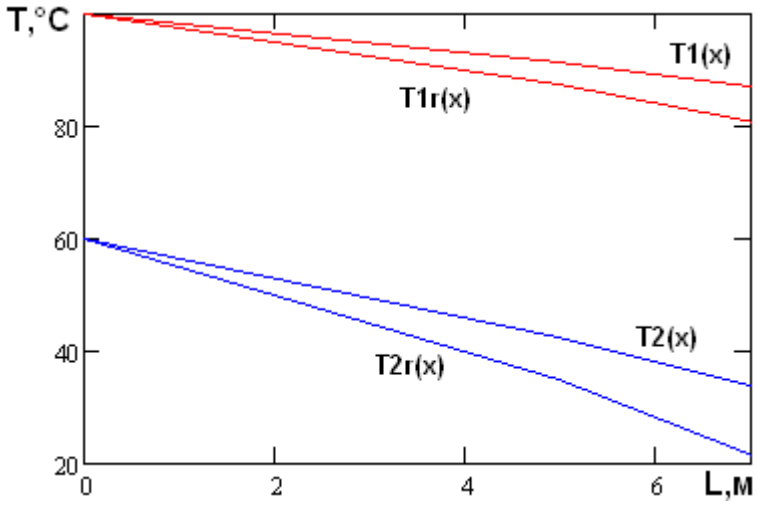


Рис. 4. Профили температур в противоточном теплообменнике.
T1r(x), T2r(x)-профили температур в оребренном теплообменнике,
T1(x), T2(x)-профили температур при отсутствии ребер

Как было отмечено ранее, продольное оребрение скважинных теплообменников более эффективно при малых скоростях потока жидкости (до 1,0-1,5 м/с). При использовании скважинного теплообменника типа «труба в трубе» в системах по освоению теплового потенциала термальных вод, для уменьшения осаждения солей во внутренней трубе теплообменника скорость потока должна быть высокой (до 2,5-3,0 м/с). Таким образом, необходимо определить и обеспечить оптимальные значения скоростей потока жидкости по внутренней оребренной трубе скважинного теплообменника, при которых наблюдается значимый прирост теплового потока, а осаждение солей сведено к минимуму.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит. 2008г. 376с.
2. *Гортышов Ю.Ф., Попов И.А.* Научные основы расчета высокоэффективных компактных теплообменных аппаратов с рациональными интенсификаторами теплоотдачи // Теплоэнергетика. 2006, №4. С.2-13.

3. *Дрейцер Г.А.* Проблемы создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 2006, №4. С.31-38.
4. *Мамаев Н.И., Алхасова Д.А.* Повышение эффективности теплообменных аппаратов путем интенсификации процесса теплообмена. // Материалы международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Т1. Махачкала. 2005. с.326-330
5. *Алхасова Д.А., Алишаев М.Г.* Расчет повышения эффективности скважинного теплообменника продольным оребрением теплопередающей поверхности. // Теплоэнергетика. №11, 2009 г. с.69-74.
6. Способ подогрева воды для отопления и установка для его осуществления./ *Н.И. Мамаев, Д.А. Алхасова* // Патент RU 2336466 C2. 2008. Бюл. №29.
7. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1973. 320 с.

ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА ТВЕРДОЕ ТЕЛО - ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

М. Г. Вердиев, С.А. Ниналалов

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля, д. 39а; said2706@gmail.com

Известны полуэмпирические методы расчета теплопереноса через границу раздела на основе метода разбиения его на области в соответствии с действующими в них механизмами теплопереноса, выраженными аппроксимационными соотношениями [1-8]. В кипении жидкости одновременно действует несколько механизмов теплопереноса [5-12]. Д.А. Лабунцов свел вклады механизмов к тепловому потоку, обусловленному кондуктивной передачей теплоты и испарением теплоносителя в паровой пузырь [13].

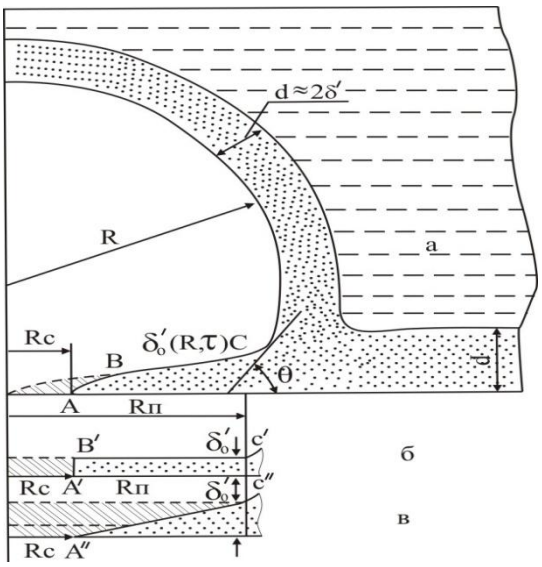
Влияние числа действующих центров парообразования на интенсивность процесса теплопереноса учитывается и в модели Г.Н. Кружилина[14]. В.И. Толубинский предложил модель, учитывающую число действующих центров парообразования, в виде критериального уравнения [9,15]. В [16] предложена модель процесса теплопереноса, включающая практически все механизмы, участвующие в теплопереносе при кипении теплоносителя, основанная на теории роста пузыря на поверхности теплоподвода [17].

Энергоподвод в пузырь, растущий на поверхности теплоподвода, осуществляется через его купол кондуктивным путем [18, 19], тепло подводится и через межфазную поверхность у периферии основания пузыря [20-22].

Модели роста парового пузыря на поверхности теплоподвода

При росте пузыря на поверхности теплоподвода под ним образуется микропленка жидкости и сухое пятно [18-33]. Процесс кипения в начинается после формирования пристенного перегретого слоя жидкости достаточной толщины *d*. На поверхности теплоподвода возникают зародыши критического размера, в основании которых образуется микропленка жидкости. С ростом радиуса пузыря поверхность купола вытесняет верхнюю прослойку пристенного перегретого слоя жидкости (рис. 1).

Микропленка жидкости под пузырем имеет сложное радиальное сечение Для упрощения расчетов будем рассматривать два предельных случая: A’B’C’ (рис. 1, б) – микропленка постоянной толщины, выпаривающаяся от центра основания пузырька; A”C” (рис. 1, в) – толщина оставшейся части микропленки линейно растет к периферии основания пузырька. Выпаривающаяся часть микропленки заштрихована.



Слой жидкости толщиной δ', примыкающий к куполу пузырька, охлаждается до температуры пара за счет испарения. Из экспериментальных данных [30] следует, что толщина δ' больше, чем толщина микропленки ((2-3) × 10^{-6}), а температурный напор на слое жидкости, примыкающем к межфазной поверхности купола пузыря, меньше чем на микропленке.

Рис. 1. Схематический разрез пузыря. Большая концентрация точек соответствует большей температуре: а – действительная форма микропленки; б, упрощенная модель.

Учитывая изложенное, уравнения баланса массы и энергии пара в пузыре и микропленке запишем в виде:

$$\rho' dV = \rho[2\pi R_c \delta dR_c + \pi(R_n^2 - R_c^2)d\delta], \tag{1}$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \delta} S_n = \rho' r' \frac{dV}{d\tau}. \tag{2}$$

Левая часть уравнения (1)представляет собой массу пара в пузыре, первый член справа обусловлен ростом сухого пятна, второй член учитывает изменение толщины оставшейся части микропленки. Величина:

$$S_n = \pi(R_n^2 - R_c^2) \tag{3}$$

является мгновенной площадью микропленки. Объем пузыря определяется формулой:

$$V = \frac{1}{4}\pi R^3 \psi(\theta), \tag{4}$$

где $\psi(\theta) = 2 + 3\cos\theta - \cos^3\theta$.

В предположении полусферической формы пузырька с неподвижным центром для радиуса внешней границы микропленки имеем:

$$R_n = R\sin\theta.$$

Начальные и граничные условия следующие:

$$R = r_0,\ \delta = \delta_0',\ T = T_{н,}\ R_c = 0 \text{ при } \tau = 0,$$

$$R = R_0,\ \delta = 0,\ T = T_c,\ R_c = R_n \text{ при } \tau = \tau_0.$$

В первой модели толщина микропленки постоянна. Тогда в уравнении (1) отбрасываем второй член справа. Из решения уравнений (1) и (2) для мгновенной площади микропленки и радиуса сухого пятна получим формулы:

$$\delta_0' = (Ja\rho'/2\rho)^{1/2}\sqrt{a\tau}, \tag{5}$$

$$R_c = \left(\frac{2\rho'}{8Ja\rho}\right)^{1/4} \sqrt{\psi(\theta)}\left[\varphi^3(Ja)\alpha\tau - r_0^3/\sqrt{\alpha\tau}\right]^{1/2} \tag{6}$$

Здесь δ_0' и R_c выражены в функции времени. Их зависимость от радиуса пузыря можно записать в виде:

$$\delta_0' = (Ja\rho'/2\rho)^{1/2}\, R/\varphi(Ja), \quad (5а)$$

$$R_c = \left[\psi(\theta)\rho' R^3/3\rho\delta_0'\right]^{1/2} \quad (6а)$$

В формуле (6а) отброшена малая поправка $r_0^3 \ /\sqrt{a\tau}$, здесь радиус пузыря принят равным [7]

$$R = \varphi(Ja)\sqrt{a\tau}, \quad (7)$$

где $\varphi(Ja) = 0.3Ja + \sqrt{0.09Ja^2 + 12Ja}$.

Во втором случае для R_c имеем:

$$R_c = \left[\frac{\psi(\theta)\rho'}{\delta_0'\rho}\left(R^3 - r_0^3\right) - 3R_n^2 \ /4\right]^{1/2} - \frac{R_n}{2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) получено исходя из предположения, что за время τ_0 происходит выпаривание кольцевой микропленки с сечением в виде усеченного конуса жидкости (рис. 1, в) с радиусом большого основания, равным R_n, и меньшего - R_c. Толщина микропленки в точке r:

$$\delta_0(r) = \delta_0'\,(R_n - r)/(R_n - R_c).$$

Анализ расчетных и экспериментальных данных

Для проверки полученных формул и их сопоставления с соотношениями, предложенными другими исследователями [25-27], расчеты сравнивались с экспериментальными данными из работы [26]. На рис. 2 представлены экспериментальные и теоретические значения толщины микропленки при кипении дихлорметана [26]. Здесь приведены расчетные графики по формулам, предложенным в работах [25] (прямая 1), [27] (прямая 2). Кривая 3 соответствует расчетным данным работы [26], кривая 4 - экспериментальным максимальным значениям толщины микропленки, прямая 5 - расчет средней толщины по формуле (5), и, наконец, штрихпунктирная линия описывает усредненные по площади экспериментальные значения микропленки [26]. Сплошными линиями показаны мгновенные профили микропленки в определенные моменты времени τ. Как видно из рисунка, формула (5) удовлетворительно описывает экспериментальные данные для средней толщины микропленки. Проверка соответствия формулы (5) экспериментальным результатам работ [28, 29] затруднена из-за отсутствия достаточного количества данных об условиях проведения экспериментов .

Следует отметить, что толщина микропленки жидкости также зависит от структуры поверхности теплоподвода. При шероховатой структуре толщина микропленки увеличивается пропорционально высоте микронеровностей. Радиус сухого пятна при этом уменьшается обратно пропорционально квадратному корню из δ_0'.

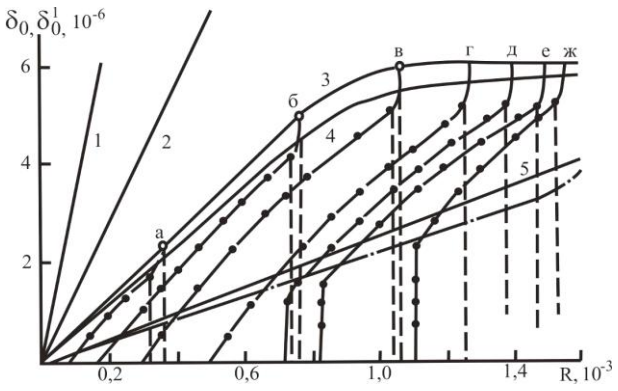


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений толщины микропленки под растущим пузырем - 1 : **расчет по формуле [25], 2 – [27], 3-[26], 4 – эксперимент [26], 5 – формула (5а). Экспериментальные значения мгновенных профилей микропленки жидкости при различных значениях времени роста пузыря отмечены точками: а – τ = 0,1 мс; б - 0,5; в - 1,3; г - 2,5; д - 3,7; е – 4,9; ж - τ =6,1 мс.** δ_0, δ_0', **м.**

При точных расчетах величин: R_c и δ_0', в интервале плотностей тепловых потоков близких к критическим, необходимо учитывать и часть теплоты поступающего в пузырь через сухой участок поверхности, под пузырем [16-14]. Это обусловлено тем, что при больших температурных напорах перегрев сухих участков достигает ощутимых значений [30].

Толщина δ' охлажденного слоя жидкости, примыкающего к куполу пузыря, гораздо больше толщины микропленки δ_0'. Воспользуемся формулой для толщины перегретого слоя жидкости из работы [34]: $d = 2.88(a_\nu \ /\Delta T\beta g)^{1/2}$. Формула верна при больших перегревах и дает заниженные значения *d* при малых перегревах на поверхности теплоподвода, в этом случае можно применить формулу, предложенную в работе [35], которая дает большие значения *d.* Величину δ' принимаем приближенно равной половине толщины пристенного теплового слоя, примыкающего к куполу пузырька.

Отрывной радиус пузыря определяется по формуле: [36]

$$R_0 = k\left[\sigma\left(C_\rho T_H/\rho' r'\right)^{5/2} \ /g(\rho-\rho')\right]^{1/2}$$

где $k = 2.325*10^{-4}$ для воды, $k = 0.75*10^{-4}$ для других жидкостей. Перегрев стенки принят равным 1 и 5 К, кипение полагается устойчивым. Как видно из таблицы, величина δ' на порядок превышает толщину микропленки. Следовательно, тепловое сопротивление микропленки гораздо меньше сопротивления охлажденного слоя.

На рис. 3. приведены результаты расчета радиуса сухого пятна при кипении дихлорметана по формулам (6а) и (8) и по соотношению Двайера [12].

Для радиуса пузыря (кривая 1) использована формула из работы [9]. Кривая 2 соответствует экспериментальным значениям радиуса сухого пятна. Подстановка в формулу Двайера [20] значения толщины микрослоя по формуле Купера – Ллойда [8] дает заниженные значения радиуса сухого пятна (кривая 3). Формула (6) дает завышенный результат (кривая 4). Предполагая толщину микропленки постоянной во времени и равной значению, соответствующему времени отрыва $\tau_0 = 6$ *мс,* для радиуса сухого пятна получим кривую 5. Подстановка в формулу Двайера δ_0' из (5) (кривая 6) дает результаты, очень близкие к (8) (кривая 7).

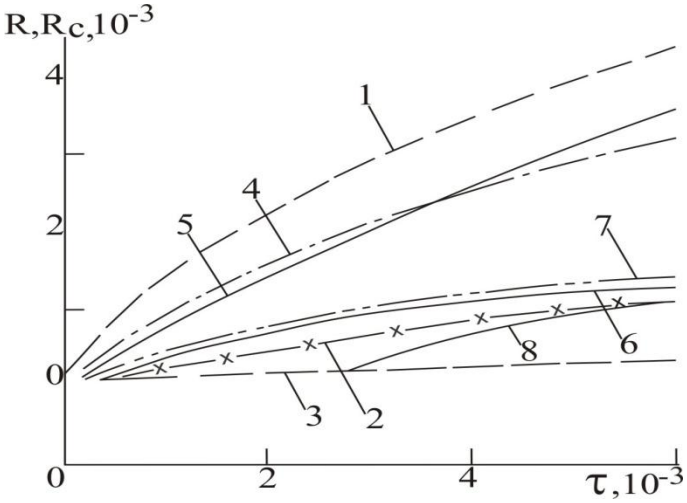


Рис. 3. Расчетные зависимости радиуса пузыря и сухого пятна от времени для дихлорметана. 1- радиус пузыря; 2- экспериментальные значения радиуса сухого пятна [26]; 3-соотношение Двайера с толщиной микропленки по [25]; 4 – формула (6а); 5 – формула (6а) с $\tau_0 = 6$ мс; 6-соотношение Двайера [12] с δ_0' по (5а); 7 – формула (8); 8 - формула (8) **с $\tau = 6$ мс,** τ, *с;* R, R_c, *м*.

Кроме того, на рис. 3 приведена кривая радиуса сухого пятна 8 с учетом τ_0. В период от 0 до 2,2 *мс* R_c < 0. Это, по-видимому, можно объяснить подтеканием жидкости под пузырь при скоростях подпитки микропленки, превышающих относительную скорость роста пузыря, за счет действия сил поверхностного натяжения.

Модель процессов теплопереноса

Критериальное уравнение подобно уравнению математической теории разбиения единицы [37], которое для процесса теплопереноса при кипении теплоносителя на поверхности теплоподвода принимает вид [11]

$$1=\sum_{i=1}^{9}\eta_i\,\chi_i\,\xi_i\,\omega_i\,, \qquad (9)$$

здесь η_i, χ_i, ξ_i, ω_i - соответственно относительные безразмерные; коэффициент теплопередачи, часть поверхности действия, температурный напор и время протекания i-о механизма теплопереноса.

Уравнение (9) с использованием критериев Нуссельта Nu_i, для всех учтенных – составляющих механизмов теплопереноса можно привести к следующему виду:

$$Nu_\Sigma = Nu_1\chi_1\xi_1\omega_1 + Nu_2\chi_2\xi_2\omega_2 + Nu_3\chi_3\xi_3\omega_3 + Nu_4\chi_4\xi_4\omega_4 + Nu_5\chi_5\xi_5\omega_5 + Nu_6\chi_6\xi_6\omega_6 + Nu_7\chi_7\xi_7\omega_7 +$$
$$+ Nu_8\chi_8\xi_8\omega_8 + Nu_9\chi_9\xi_9\omega_9\,, \qquad (10)$$

где: Nu_Σ, Nu_i, χ_i, ξ_i, ω_i - соответственно критерии Нуссельта для суммарного и составляющих механизмов теплопереноса, относительные безразмерные: температурный напор, часть поверхности теплоподвода и время действия *i*-о механизма теплопереноса.

Критерии Nu_1, Nu_2, Nu_3, Nu_5 могут быть представлены в следующем виде:

$$Nu_1 = 2/3Fo_1, \quad Nu_2 = 2/3Fo_2Ja, \quad Nu_3 = 1/Fo_3, \quad Nu_5 = 1/Fo_5\,. \qquad (11)$$

В этих соотношениях безразмерные параметры Fo_i выражаются следующим образом:

$$Fo_1 = \lambda'\tau\, r_c\,/\,c'\rho'R^2R_b\psi(\theta),\ Fo_2 = \lambda\tau\, r_c\,/\,c\rho R^2R_b\psi(\theta),\ Fo_3 = \lambda\tau/c\rho\bar{\delta}'R_b,$$
$$Fo_5 = \lambda\tau_0/c\rho\bar{\delta}'R_b\,. \qquad (12)$$

Процесс кипения теплоносителя переходит в режим кризиса, когда частота отрыва пузырей возрастает, и время ожидания пузырей стремится к нулю $\tau_0 \to 0$. Из этого условия получаем первый критерий кризиса кипения. Расстояние между центрами парообразования уменьшается, и часть суммарной безразмерной поверхности ξ_8, свободная от пузырей и занятая конвективным механизмом теплопереноса приближается к нулю при наступлении режима кризиса кипения. Этому условию соответствует второй и основной критерий кризиса кипения, вытекающий из уравнения (10):

$$\xi_8 = 1-\pi(R+\bar{\delta}')^2b^2N = 0\,. \qquad (13)$$

При этом параметр влияния пузыря *b* стремится к единице. Из соотношения (13) в качестве критерия кризиса кипения получаем значение плотности потока пузырьков $N_{\text{кр}}$ соответствующее этому режиму

$$N_{\text{кр}} = 1/\pi b^2(R+\bar{\delta}')^2 \qquad (14)$$

Таким образом, из теории, изложенной в [2], кризис кипения наступает при выполнении следующих условий;

$$\tau_0 \to 0,\ \xi_8 = 1-\pi(R+\bar{\delta}')^2b^2N = 0,\ b = 1,\ N_{\text{кр}} = 1/\pi b^2(R+\bar{\delta}')^2\,. \qquad (15)$$

Анализ результатов

Все перечисленные критерии кризиса кипения автоматически вытекают из единого уравнения теплопереноса (9 или 10) и они должны одновременно выполняться в комплексе. В частности, Кутателадзе С.С. предложил в качестве критерия кризиса кипения использовать

соотношение:

$$\mathrm{N}_{\text{кр}} = C/4R^2. \qquad (16)$$

где для постоянной C приведено условие $C<1$ без указания интервала изменения ее численного значения [38]. Это условие автоматически выполняется для соотношения (14), вытекающего из уравнения (10), поскольку $1/\pi b^2(R+\bar{\delta}')^2 < 1/4R^2$, и при первом кризисе кипения $b\to 1$. Розенау и Гриффитс на основе анализа экспериментальных данных в качестве критерия кризиса кипения предложили соотношение:

$$\mathrm{N}_{\text{кр}} = 1/\mathrm{D}^2. \qquad (17)$$

Это условие также выполняется для соотношения (16), вытекающего из уравнения (10), поскольку $1/\pi b^2 \le 1/4$. Здесь b коэффициент гидродинамического влияния или просто коэффициент влияния пузыря удовлетворяющее неравенству $1 \le \mathrm{b}$.

Для анализа величины масштаба гидродинамического влияния пузыря безразмерная поверхность, занятая механизмом влияния пузырей в уравнении (10) обозначим через b_0^2, поскольку она удовлетворяет условию $0 \le \mathrm{b}_0$:

$$\xi_4 = \pi(R+\bar{\delta})^2(b^2-1)N = b_0^2. \qquad (18)$$

Тогда для масштаба гидродинамического влияния пузыря получим соотношение:

$$b = \sqrt{\frac{b_0^2}{\pi(R+\bar{\delta}')^2 N}+1}. \qquad (19)$$

Как следует из результатов экспериментальных исследований [12, 21, 39, 40] масштаб гидродинамического влияния пузыря является переменной величиной зависящей от технологических режимов протекания процесса. Условие: $\xi_4 = \pi(R+\bar{\delta})^2(b^2-1)N < 1$ является критерием перехода к пленочному режиму теплопереноса.

При выполнении условий кризиса кипения (18) для соответствующих параметров в уравнении (2) получим следующее критериальное уравнение

$$K_{\kappa\text{р}} = Sr_1'\xi_1' + \xi_2' + Sr_3\,\xi_3'\,\rho/\rho'. \qquad (20)$$

Здесь $K_{\kappa\text{р}} = q_{\kappa\text{р}}/\rho' r\, f\, R$, $Sr_1' = c'\Delta T_1'/r$, $Sr_3 = C\Delta T_3/r$, $\xi_1' = \xi_2' = \pi R^2\psi^2(\theta)N/3$, $\xi_3' = \pi\delta[(R+\bar{\delta})^2 - r_c^2]N/R$

где Sr_1 - относительный перегрев пара в пузыре, Sr_3 - относительный перегрев жидкости у периферии основания пузыря, ξ_1', ξ_2' и ξ_3' части безразмерных поверхностей, занятых пузырями и слоем перегретой жидкости у периферии основания пузыря. Уравнение подобия В.И. Толубинского для критического теплового потока имеет вид [9]:

$$K_{\kappa\text{р}} = 7\sqrt{Fo\,\rho/\rho'} \quad \text{или} \quad q_{кр} = 7\sqrt{af\rho\rho'} \qquad (21)$$

Расчеты по (9) сравнивались с экспериментальными данными по зависимости коэффициента теплопереноса при кипении воды на горизонтальной поверхности теплоподвода в широком интервале температурного напора при атмосферном давлении и температуре насыщения (рис. 4).

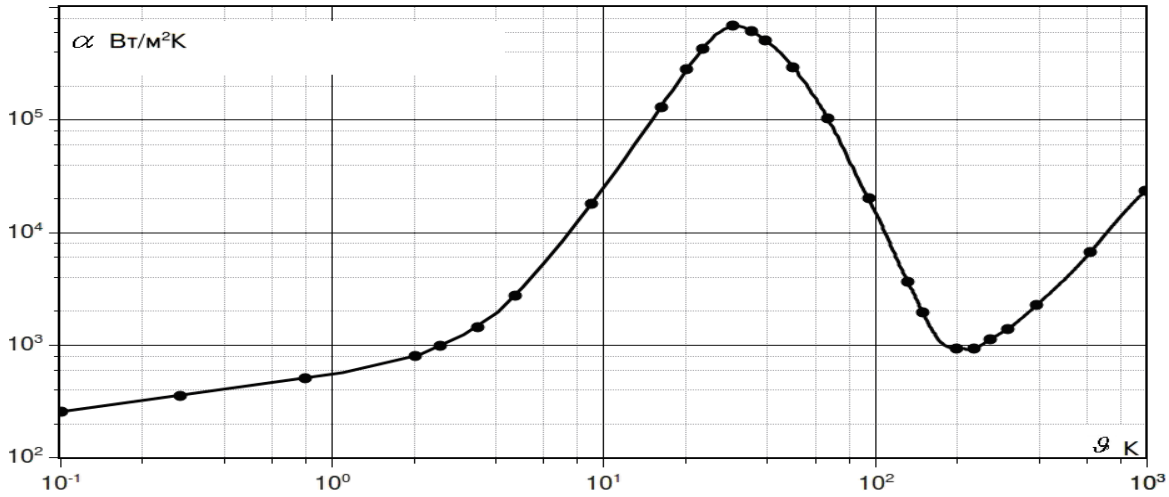


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора для воды (расчет по (10)).

Литература:

1. Ройзен Л. И. и Дулькин И. Н. Тепловой расчет оребренных поверхностей. М.:, Энергия, 1977, 256 с.
2. Керн Д.И Краус А.Р. Развитые поверхности теплообмена. М.:, Энергия. 1977, 464 с.
3. Haley K. W., Wastewater J. W. Proc. III Intern. Heat Transfer Conf., Chicago, 1966. 3. p. 245.
4. Дулькин И. Н. и др. Теплообмен при кипении воды и фреона-113 на неизотермической поверхности // ИФЖ.1978. Т 19, № 4. С. 637 –645.
5. Теория теплопереноса. Под ред. Леонтьева А.И. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
6. Исаченко В.П., Сукомел А.С., Осипова В.А. Теплопередача: Учебник для вузов. - 4-е изд. М.: Энергоиздат, 1981.
7. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б.С. Петухов и др. – М.: МЭИ, 2003. – 548 с.
8. Тиктин С.А. Вапотронная техника. – Киев: Техника, 1975.
9. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова думка, 1980.
10. Тонг Л.С. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. Под ред. Аладьева И.Т. М.: МИР, 1969. – 344 с.
11. Теплопередача при низких температурах. Под ред. Фроста У., Анфимова Н.А. М.: МИР, 1977. –392 с.
12. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. М.: МИР, 1980. – 516 с.
13. Лабунцов Д.А. Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей// Теплоэнергетика. 1972. № 9. С. 14.
14. Кружилин Г.Н. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции.//Известия АН СССР, ОТН, 1949, № 5, с. 701.
15. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло - и массообмена. М.: -Л., Госэнергоиздат, 1961. 680 с.
16. Вердиев М. Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Махачкала, Институт проблем геотермии РАН 1997. 530 с.
17. Вердиев М. Г., Ниналалов С.А. Радиус сухого пятна и толщина микропленки под паровым пузырем.//ИФЖ.1991. Т61, №1. С. 92-97.
18. Плесет М.С., Цвик С.А. // Вопросы физики кипения. М., 1964. С. 189-211.
19. Форстер Г., Зубр Н. // Вопросы физики кипения. М., 1969. С. 212-225.
20. Лабунцов Д.А. // ИФЖ. 1963. Т. 6, № 4. С. 33-39.
21. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. Киев, 1980.

22. Ильин И.Н., Яундалгер С. Р., Хасин М. И. // Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. Материалы Всесоюзн. конф. Рига, 1982, т. 1. Пузырьковое кипение. Ч. 2. Рига, 1985. С. 103-119.
23. Справочник по теплообменникам. В 2 т. М., 1987. Т. 1.
24. Ягов В.В. Исследование кипения жидкостей в области низких давлений: Автореф. дис. канд. техн. Наук. М., 1971.
25. Cooper M.G., Lloyd A. J. L. // Int. J. Heat Mass Transf. 1969. Vol. 12. P. 895-913.
26. Воутсинос, Джад // Теплопередача. 1975. № 1. С. 89-94.
27. Олэндер, Уоттс // Теплопередача. 1969. № 1. С. 149-156.
28. Jawurek H.H. // Int. J. Heat Mass Transf. 1969. Vol. 12. P. 843-848.
29. Sharp. The Nature of Liquid Film Evaporation during Nucleate Boiling // NASA TN D-1997, 1964.
30. Афган Н. Перегрев кипящих жидкостей. М., 1979.
31. Вердиев М.Г. Физика процессов тепломассообмена в зонах испарения и конденсации, замкнутых испарительно-конденсационных устройств теплопереноса. Махачкала, 1988. Деп. в ВИНИТИ 26.05.88, № 3978-В88.
32. Вердиев М.Г. Физическая и математическая модели процессов тепломассообмена при кипении жидкости. Махачкала, 1988. Деп. в ВИНИТИ 27.06.88, № 5124-В88.
33. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А. // Использование банков данных при региональных исследованиях: Тез. докл. Междунар. семинара. Махачкала, 1988.
34. Леонтьев А. И., Кирдяшкин А. Г. // ИФЖ. 1969. Т. 16 , № 6. С. 1110-1115.
35. Ilyin I. N., Grivtson V.P., Jaundalddere S.R. // Proc. 7-th Int. Heat. Trans. Conf. Munich. 1982. Vol. 4. P. 55-59.
36. Розенов В. // Теплопередача при низких температурах. М., 1977. С. 122-160.
37. Эндрюс Г. Теория разбиения единицы. М.: Наука, 1982. – 255 с.
38. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979.
39. Rohsenow W.M., Griffith P., Correlation of Maximum – Heat – Flux Data for Boiling of Saturated Liquids, Chem. Engineering Progress Symposium Series, Amer. Inst. Of Chem. Ing., New York, Vol. 52, No. 18, 1956, p. 47.
40. Чеканов В.В. Взаимодействие центров при пузырьковом кипении. //Теплофизика высоких температур. 1977. Т. 15, № 1, С 121-128.

КРИТЕРИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА КОНЦЕ КОНУСА ТЕЙЛОРА

Вердиев М.Г.[1], Ниналалов С.А.[1], Набиев Ш.Ш.[2], Азизов А.А.[1], Вердиева З.М.[3]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии, [2]ООО «ТЕХН»,
[3]Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана, Россия. 367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, п/о № 30, а/я № 7 E-mail: mikail_verdiev@mail.ru,

Дисперсные потоки жидкостей широко используются в технологии очистки жидкостей методом испарения и последующей ее конденсации в геотермальной энергетике. При этом скорость выпаривания жидкости в электрическом поле резко возрастает так как размеры частиц дисперсных потоков составляют нанометры.

Бум в развитии нанотехнологий требует и соответственного экономического вклада развитых стран в эту бурно развивающуюся область науки. И результаты этих исследований приобретают глобальный для всего человеческого общества характер. При этом наибольший экономический рост будет достигнуть в тех странах, которые вложат максимальные интеллектуальные и материальные средства.

Дальнейшие исследования в этой области необходимо сосредоточить именно на проведении тщательных экспериментальных и оценочных теоретических исследований по разработке все новых более универсальных современных энергоэффективных методов получения наноструктур (порошков, пленок, контейнеров и др., как из индивидуальных веществ, так и из различных комплексов на атомно молекулярном уровне структур). Результаты этих исследований будут широко использованы: в космических технологиях, медицине, фармакологии, агропромышленном секторе, порошковой металлургии, машиностроении, авиастроении, для интенсификации процессов тепломассопереноса, строительных технологиях, нано - микроэлектронике, в солнечной энергетике, в системах аккумулирования электрической энергии, для получения горючей смеси в топливных энергоустановках и транспортных средствах, в химической промышленности, при утилизации промышленных отходов, и во многих других областях человеческой деятельности, где необходимо переводить исходные материалы и сырью в нано-микроструктурные состояния с требуемыми техническими характеристиками.

Работа посвящена разработке: упрощенной физической и математической моделей возникновения неустойчивости на вершине конуса Тейлора, определению характеристических параметров частиц и потоков жидкостей диспергируемых в электрическом поле и критерия неустойчивости на вершине конуса в вакууме и в произвольной среде.

Для определения размера и заряда частиц по режимным параметрам процесса в разработанной, не возмущающей дисперсный поток, физической модели создана экспериментальная установка специальной конструкции. Установка позволяла исследовать характеристики стационарных, стабильных нанодисперсных потоков различных жидкостей и растворов на основе соответствующих упрощенных моделей процессов их диспергирования. На основе этих моделей получены зависимости характеристических параметров стационарных нано - дисперсных потоков электрозаряженных частиц в вакууме и произвольной среде. для оценки: размеров, массы, заряда и удельного заряда частиц.

Ключевые слова: движение потока заряженных частиц в гравитационном и электрическом полях, неустойчивость конуса Тейлора, критерий неустойчивости, диспергирование жидкости в электростатическом поле, размер, масса, заряд и удельный заряд дисперсной частицы, вольт – амперная характеристика дисперсного потока заряженных частиц жидкости, массовый и зарядовый переносы дисперсного потока, сопротивление потока, подвижность частиц, время установления дрейфовой скорости, работа электростатических сил.

На сегодняшний день практически отсутствуют универсальные технологии получения веществ нано – микроструктурных состояний с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Как показали результаты многолетних исследований наиболее универсальным методом получения веществ нано – микроструктурных состояний с требуемыми техническими характеристиками является метод диспергирования жидкостей в высокопотенциальном электрическом поле. Для этого исходное вещество переводят в жидкое состояние с добавками соответствующих дополнительных ингредиентов – в состояние чернил струйных принтеров и далее их диспергируют в высокопотенциальном электрическом поле [1 - 4]. Причем, как показали результаты экспериментальных исследований, наноструктурные потоки жидкостей с наибольшей степенью монодисперсности получаются в режиме их диспергирования при отсутствии расхода чернил из капилляра в отсутствии электрического поля или в режиме диспергирования чернил из емкости с верхним уровнем жидкости, соответствующим уровню конца капилляра [4 - 6]. В этом режиме достигается условие непрерывного и стабильного диспергирования жидкости и процесс хорошо поддается моделированию с соответствующими экспериментальными подтверждениями расчетных данных.

Однако отсутствие теоретических методов расчета этих процессов и универсальных и легкоуправляемых экспериментальных методов получения веществ нано – микроструктурных состояний затрудняет ускоренное промышленное внедрение этой технологии [6 - 10].

Разработка экспериментальной установку с компьютерным управлением дисперсным потоком и визуализация процессов влияния различных параметров на структуру дисперсного потока электрозаряженных частиц будет способствовать ускорению промышленного внедрения этой технологии. Предлагаемая работа по мнению авторов должна, в некоторой степени, восполнит имевшийся пробел в области разработки технологии получения и исследования стационарных монодисперсных потоков жидкостей с наноструктурными частицами. Этот режим устойчивого диспергирования жидкостей с конца капилляра сопровождается с предварительным образованием жидкого конуса Тейлора [11 - 13].

Эта проблема становится более актуальной в связи с тем, что характеристики конечных продуктов получаемых из порошков исходных материалов в том числе скорость протекания химических реакций наравне с другими определяются размерами и зарядами частиц дисперсных потоков. Эта проблема особо остро встает при нанесении пленок различных материалов на всевозможные подложки в электронной промышленности для обеспечения их потребных характеристик, при получении изображений различных объектов с помощью компьютерных технологий так как минимально достижимый объём частиц современного струйного принтера составляет около 3 пикалитров, что соответствует размеру частиц с радиусом в ~ 2,88 10^{-5} м., а в случае использования технологий диспергирования жидкостей в высокопотенциальном электрическом поле эта величина достигает порядка ~ 3,36 10^{-27} литров, чему соответствует радиус частиц порядка 10^{-9} м. [14].

Наиболее остро проблема снижения размеров электрозаряженных частиц дисперсных потоков стоит в области струйной электроники и струйной печати различных объектов с высокой разрешающей способностью где для разработки оптимальных методов управления траекторией полета частиц необходимо располагать их характеристическими параметрами.

Актуальность этой проблемы возрастает и в связи с широкими перспективами применения этой технологии для увеличения коэффициента теплоотвода за счет реализации стабильных режимов выпаривания нано – микропленок различных жидкостей [4, 15 - 23].

Целью работы является: разработка физической и математической моделей движения частиц дисперсного потока жидкости в электростатическом и гравитационном полях в вакууме и в произвольной среде, позволяющих оценить характеристики частиц и дисперсных потоков в зависимости от технологических режимов их диспергирования не возмущающим дисперсный поток методом.

Для оценочного определения средних значений: радиуса, массы, заряда и удельного заряда частиц рассмотрим приближенную модель движения центральной частицы дисперсного потока, начинающегося с вершины конуса Тейлора. Как известно, при диспергировании жидкостей из капилляра на его конце перед переходом в стационарный режим диспергирования образуется жидкий конус Тейлора максимальной высоты. Вершины жидкого конуса и конуса дисперсного потока частиц образующегося в электрическом и гравитационном полях в плоскости осевого сечения совпадают. При этом начало системы координат жестко закрепляем с потоком в плоскости его осевого сечения на вершине жидкого конуса Тейлора или дисперсного потока в форме конуса и ось x – ов направляем по оси конусов ко второму электроду - подложке 5, а ось y – ов направляем по радиусу, как это показано на рисунке 1. Электрическое поле создается между капилляром с радиусом $r_к$=1,75·10^{-4} м. и вторым дисковым электродом с радиусом r_2=5·10^{-2} м.

Движение центральной частицы потока в системе координат ориентируемой в различных направлениях вместе с потоком в гравитационном поле описываем на основе уравнения динамики. При этом направление электрического поля фиксировано в потоке так как вся экспериментальная установка диспергирования с фиксированными электродами поворачивается в вертикальной плоскости вокруг перпендикулярной к ней горизонтальной оси OO', проходящей через вершину конуса Тейлора - дисперсного потока как это показано на рисунке 2.

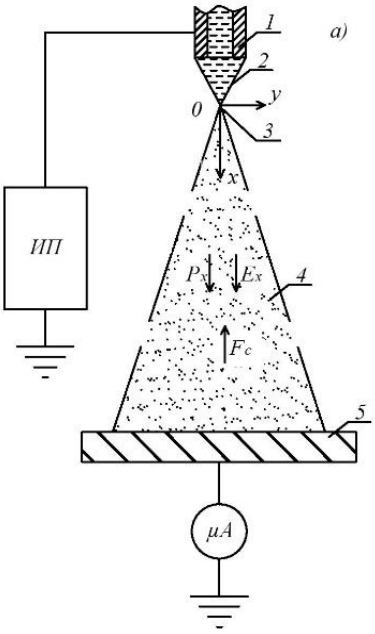


Рис. 1. Схематическое расположение системы координат и дисперсного потока жидкости. 1 - капилляр, 2 – усеченный конус жидкости - конус Тейлора, 3 – вершина конуса дисперсного потока жидкости, 4 – дисперсный поток. На схематическом рисунке верхнее основание дисперсного потока изображено как вершина дисперсного конуса из-за малого его радиуса.

Описание экспериментальной установки. Схематический разрез экспериментальной установки приведен на рисунке 2. Внутри жесткой металлической рамы 1, изготовленной из прямоугольного стального профиля на подшипниках 2 установлена рама 3 с обеспечением возможности поворота вокруг горизонтальной оси OO'. На внутренней раме 3, на фторопластовой электроизоляции, подвижно установлены металлический капилляр 4 и второй электрод 5. Второй электрод – рабочий столик заземлен через микроамперметр 7. После установки оптимального положения капилляра требуемое расстояние между его концом и столиком регулируется винтом микроманипулятора СТ-3. Исследуемая жидкость и высокий потенциал к капилляру подводятся по фторопластовым трубкам, проложенным через трубу 6, втулку подшипника 2 и профиль рамы 3. Для измерения тока переноса частицами дисперсного потока служит микроамперметр 7, через который заземляется рабочий столик 5 – второй электрод. Дисперсный поток жидкости 8, рабочий столик 5, и капилляр 4 герметично изолированы от окружающей среды, с помощью составного корпуса, выполненного из двух цилиндрических половинок, изготовленных из прозрачного оргстекла, и закрепленного к внутренней раме 3 (на рисунке не показан). Регулировка структуры электрического поля в зоне формирования дисперсного потока осуществляется путем изменения диаметра и положения металлического диска 9 установленного на конце капилляра 4. На капилляр подается регулируемый в интервале 0 – 50 кВ потенциал от источника постоянного напряжения один электрод, которого заземляется. Источник питания на рисунке не показан. Капилляр с помощью фторопластовой трубки соединяется с емкостью (емкость на рисунке не показана) для исследуемой жидкости. Расход жидкости через капилляр изменяют путем изменения положения емкости относительно конца капилляра или путем регулировки давления в ней. Методика изменения расхода жидкости, в нашем случае чернил (для улучшения визуализации), по капилляру путем вариации положения емкости позволяет достичь наибольшей степени точности измерений.

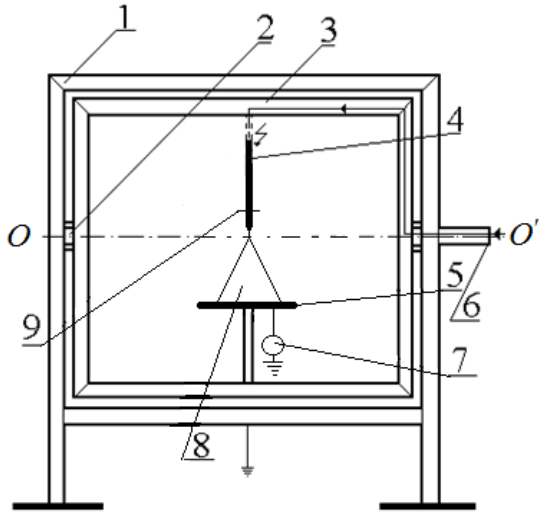


Рис. 2. Схематический разрез экспериментальной установки

Как отмечено выше в современных струйных технологиях получения функциональных элементов нано - микроэлектроники плотность их расположения определяется размерами частиц дисперсного потока исходного вещества, и она в струйных принтерах ограничена и составляет порядка 3 пикалитра, что соответствует размерам частиц порядка десятки микрометров. Для реализации предельных функциональных возможностей современных микропроцессоров необходимо плотность расположения его элементов повысить хотя бы на два порядка, т.е. размеры частиц дисперсного потока довести до уровня нано метров. Такая степень дисперсности потока частиц, не считая вакуумные технологии, может быть достигнута при оптимальной технологии диспергирования жидкостей в электрическом поле. Следовательно, одним из важных параметров дисперсного потока является размер его частиц и его заряд для оценки, которых используются описываемые далее способы.

Динамика дисперсного потока. В реальных процессах диспергирования жидкостей в электрическом поле практически невозможно создать вакуум в истинном понимании так как в любом случае будет присутствовать как паровая фаза диспергируемого вещества, так и газы, растворенные в них. При этом разумно говорить о низких давлениях при непрерывном процессе откачивания. Для простаты расчетов рассматриваем только движение центральной частицы потока, а другие ограничения, накладываемые на физическую модель, приводятся далее в тексте. Движение центральной частицы потока в силовых полях описывается уравнением:

$$m\vec{a} = \overrightarrow{F_K} + \overrightarrow{F_c} + \overrightarrow{F_A} + \overrightarrow{P}. \quad (1)$$

Здесь $\overrightarrow{F_K}, \overrightarrow{F_c}, \overrightarrow{F_A}, \overrightarrow{P}$ - соответственно силы: кулоновская, сопротивления среды, Архимеда и гравитации, действующие на центральную частицу. Проецируя это уравнение на ось *x* – ов в случае горизонтального направления потока вправо в вакууме ($\overrightarrow{F_c} = 0, \overrightarrow{F_A} = 0$) получаем:

$$m_0 a_x = F_K, \quad (2)$$

а для среды газа (воздуха) имеем:

$$m_0 a_x = F_K - F_{cx} \quad (2а)$$

$$\frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж d^2x/dt^2 = q_0 E_x - 6\pi\eta_в r_0 dx/dt, \quad (2б)$$

где $F_K = q_0 E_x = -q_0 \partial\varphi/\partial x$ - Кулоновская сила, направленная по оси *x* – ов, $F_{cx} = 6\pi\eta_в r_0 dx/dt$ – сила сопротивления среды, $m_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж$ - масса частицы дисперсного

потока жидкости, r_0 его радиус, а $E_x, \varphi, \rho_ж, \eta_c$ – соответственно напряженность и потенциал электрического поля, плотность жидкости и вязкость среды - воздуха.

Движение частицы по оси y – ов описывается уравнением:

$$m_0 a_y = P - F_{cy} - F_A + F_K \qquad (3)$$

или

$$\frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж d^2y/dt^2 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж g - 6\pi\eta_в r_0\, dy/dt - \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_c g + F_K \qquad (3a)$$

Движении центральной частицы в вакууме по оси y – ов ($F_{cy} = 0$) является свободным т.е. $a_y = g$, так как результирующая Кулоновская сила взаимодействия одноименно заряженных центральной частицы с радиальными равна нулю $F_K = 0$. Здесь g – ускорение свободного падения.

В уравнениях (3) и (3*а*): $P = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж g$, $F_{cy} = 6\pi\eta_в r_0\, dy/dt$ и $F_A = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_c g$ – соответственно силы: тяжести, сопротивления среды и Архимеда, действующие на частицу по оси y – ов. При диспергировании жидкости в вакууме силы сопротивления среды F_{cx}, F_{cy} и сила Архимеда в уравнениях (1 – 3*а*) равны нулю. Решая систему дифференциальных уравнений (2*б*) и (3*а*) для случая вакуума при начальных и граничных условиях:

$$t = 0; x = 0;\ v_{0x} = v_0;\ dx/dt = 0; E = E_1; \varphi = \varphi_1;\ y = 0;\ v_{0y} = 0;\ dy/dt = 0;$$

и при $t = t_1;\ x = L; E = 0: \varphi = 0; y = 2\Delta y;$

для массы частицы m_0 получаем:

$$m_0 = q_0 E\Delta y/gL \qquad (4)$$

Как следует из соотношения (4) для определения массы и соответственно размера частицы необходимо определить отклонение частицы по оси *y* - ов знать его заряд и величину вектора напряженности электрического поля, при котором диспергируется жидкость при заданном расстоянии между электродами. Для этого необходимо разработать приемлемую модель возникновения неустойчивости на вершине жидкого конуса Тейлора в электрическом поле так как устойчивый процесс диспергирования с конца капилляра возникает после формирования на нём конуса жидкости – конуса Тейлора.

Оценки величины отклонения частиц по оси *y* - ов показывают, что при их размерах порядка нанометров его значение составляет порядка десятых и сотых долей размеров частиц. Следовательно, экспериментально определить эту величину не представляется возможным. Поэтому предварительно необходимо расчетным путем оценить интервал изменения отклонения частицы по оси *y* - ов при их размерах порядка нанометров затем далее при расчетах остальных параметров частиц воспользоваться этим интервалом как известным

Условия возникновения критерия неустойчивости на вершине конуса Тейлора. Процесс диспергирования с конца капилляра может возникнуть и при отсутствии конуса Тейлора, однако стационарный процесс с минимальными размерами частиц возникает только с вершины конуса. Причем разброс размеров частиц в дисперсном потоке становится минимальным при максимальной высоте конуса для данной жидкости [4 - 10]. Для определения заряда частицы q_0 дисперсного потока жидкости рассмотрим условие равновесия сил, действующих на заряженную частицу, находящуюся на вершине конуса Тейлора. Схематическое изображение конуса Тейлора приведено на рисунке 3. Но для однозначной интерпретации условия равновесия сил действующих на частицу в режиме диспергирования вначале опишем последовательность процессов, предшествующих режиму достижения стационарного стабильного процесса с минимальными размерами частиц при непрерывном росте потенциала капилляра. При этом скорость роста потенциала капилляра должна быть меньше скорости переноса заряда от конца капилляра до вершины конуса Тейлора т. е. меньше скорости стока заряда с его вершины отрывающимися заряженными частицами дисперсного потока жидкости.

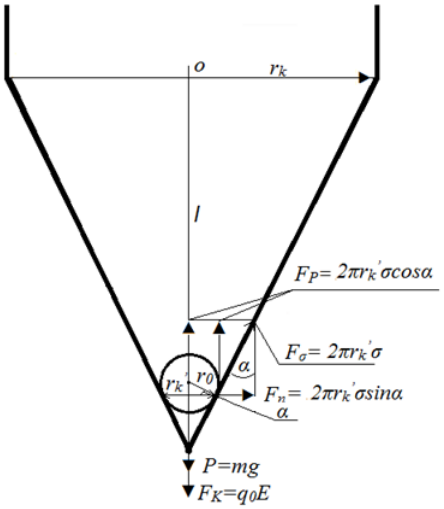


Рис. 3. Схематическое изображение конуса Тейлора с указанием области поверхности мениска с которой начинается стационарный процесс диспергирования при выполнении условия равновесия сил, действующих на заряженные частицы жидкости находящихся в наиболее удаленной от конца капилляра области на его оси

При диспергировании жидкостей в режиме отсутствия ее расхода через капилляр при его потенциале равном нулю или при нулевом ее уровне в емкости относительно конца капилляра, при приложении к последнему линейно возрастающего с малой скоростью роста потенциала протекают следующие последовательные процессы [4, 24, 25]. Из капилляра при напряжённости электрического поля порядка 12. 10^4 В/м вытягивается жидкость в форме сферической капли, далее капли начинают отрываться и растет частота их отрыва и при напряжённости поля порядка 18. 10^4 В/м непрерывный поток капель переходит в режим тонкой струйки, которая начинает рассыпаться вблизи второго электрода. В последующем точка рассыпания струйки перемещается к концу капилляра. При этом размеры частиц дисперсного потока изменяются в широких интервалах значений достигая порядка 10^{-3} м. Затем при напряжённости поля порядка 25. 10^4 В/м на конце капилляра жидкость принимает форму конуса Тейлора с острой вершиной даже при 500 кратном увеличении. Напряженность электрического поля и, следовательно, кулоновская сила отталкивания F_K, действующая на заряженную частицу жидкости, находящейся на вершине конуса достигают максимума. Фотография конуса Тейлора на конце капилляра с наружным радиусом 1,5 10^{-4} м с дисперсным потоком при 500 кратном увеличении приведена на рисунке 4.

Как известно, величина вектора напряжённости электрического поля и, следовательно, кулоновская сила, действующая на заряженную частицу жидкости, достигает максимального значения в точке расположенной на оси капилляра на расстоянии l от его конца на вершине конуса Тейлора [26]. Таким образом критерий неустойчивости на вершине конуса Тейлора возникает при условии максимума напряжения суммы сил действующих на сечение пленки поверхностного натяжения, а она достигает максимума в области перетяжки частицы - касания пленки силы поверхностного натяжения частицы с радиусом r_0 по окружности радиуса r_k', как это показано на рисунке 3. Для наглядности на рисунке частица изображена в сильно увеличенном масштабе по отношению к размерам вершины конуса Тейлора.

В исходном положении узел диспергирования с конусом жидкости направляем вертикально вниз и подбираем режим устойчивого диспергирования при заданном расстоянии между электродами и максимальной высоте конуса. Затем путем перемещения капилляра и второго электрода при исходном расстоянии между ними добиваемся такого их положения чтобы поворот узла диспергирования – внутренней рамки происходил вокруг горизонтальной оси проходящей через вершину жидкого конуса Тейлора.

При этом критерий неустойчивости на вершине конуса в вакууме возникает при большем или равном нуле векторной суммы сил, действующих на заряженную частицу, находящуюся на вершине:

$$\vec{F}_K + \vec{P} + \vec{F}_p + F_{от} \geq 0 \qquad (5)$$

Здесь F_K - кулоновская сила отталкивания частицы от конца капилляра, P - сила тяжести, F_p - составляющая силы поверхностного натяжения удерживающая частицу на вершине конуса и $F_{от}$ - сила отдачи диспергируемых частиц. Последняя сила практически равна нулю при нулевой начальной скорости выхода частиц из конуса. С учетом последнего условия для модулей сил, в случае ориентации капилляра вертикально вниз в условном вакууме получаем неравенство:

$$q_0 E + m_0 g \geq 2\pi r_k' \sigma \cos\alpha \qquad (5а)$$

где σ и r_k'– коэффициент поверхностного натяжения и радиус пленки поверхностного натяжения в области максимума напряжения суммы сил: поверхностного натяжения, тяжести и кулоновской под действием которой заряженная частица покидает вершину конуса Тейлора, а m_0 - масса этой частицы, определяемая из уравнения динамики (1). Здесь r_k' связан с радиусом частицы r_0 соотношением $r_k' = r_0 \cos\alpha$, $\cos\alpha$, как следует из рисунка 3, равен $1/\sqrt{(r_k/l)^2 + 1}$. Где $l' = ml$ и $r_k' = kr_0$ – соответственно высота конуса Тейлора и радиус перешейки отрывающейся частицы, а $m \leq 1$ и $k \leq 1$ соответственно безразмерные коэффициенты определяющие отклонения: положения центра частицы от высоты конуса в момент ее отрыва от вершины и положения максимума вектора напряженности электрического поля на оси капилляра и радиуса перешейки частицы от её радиуса. В точке максимума вектора напряженности электрического поля на оси конуса Тейлора $\cos\alpha$ принимает значение равное $\sqrt{3}/3$ так как его высота l в точке максимума вектора напряженности электрического поля выражается через радиус капилляра как $r_k/\sqrt{2}$. При этом сила поверхностного натяжения, удерживающая частицу, определяется составлявшей F_p силы F_σ, (смотри рисунок 3). Таким образом из условия (5) или (5а) вытекает критерий неустойчивости на вершине конуса Тейлора с заменой $r_k' = kr_0 \cos\alpha$:

$$3\, q_0 E(\Delta y/L + 1)/2\pi k r_0 \sigma \geq 1 \qquad (6)$$

Критерий Релея для случая распада материнской капли в электрическом поле с убывающимся в ходе этого процесса зарядом и массой дочерних капель, по нашему мнению, нельзя использовать для режима диспергирования жидкости с вершины жидкого конуса Тейлора. В этом случае процесс протекает при постоянной рекомбинации заряда и количества диспергируемой жидкости, уносящих открывающимися частицами. Несмотря на это многие исследователи [26 = 28 и др.] для интерпретации процесса диспергирования жидкостей с вершины конуса Тейлора используют критерий Релея. В случае диспергирования жидкости с конца капилляра значение его потенциала выше чем на вершине конуса Тейлора и на отрывающуюся частицу действует результирующая сила отталкивания, достигающаяся наибольшего значения в точке максимума вектора напряженности электрического на оси капилляра на расстоянии от него, определяемом его радиусом [29]. В известных случаях [1] распада электрозаряженной материнской капли во внешнем поле за счет его поляризации, когда и дочерние капли неустойчивы в смысле этого критерия, исходная капля находится во внешнем однородном электрическом поле и неустойчивость возникает за счет перераспределения заряда капли [1, 11 – 13, 34]. В рассматриваемом режиме неоднородное электрическое поле приложено как бы между электродом, проведенным через пояс деформированного до критического состояния исходной капли и электродом, расположенным вдали от конца капилляра в точке максимума вектора напряженности электрического поля. В описываемом случае конус

Тейлора на конце капилляра образуется практически при постоянной величине его заряда за счет его притока по капилляру и жидкому конусу.

По нашему мнению, неустойчивость на вершине жидкого конуса Тейлора, образующегося на конце электрозаряженного капилляра, изготовленного из электропроводного материала, возникает при значении модуля вектора напряженности электрического поля определяемом из соотношения:

$$E_в \geq 2\pi k r_0 \sigma / 3\ q_0(1 + \Delta y/L) \quad (7)$$

Заряд устойчивой в дальнейшем движении частицы, в отличие от критерия Релея, определяем из соотношения:

$$q_0 = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r_0 \varphi_в, \quad (8)$$

где ε_0, ε и $\varphi_в$ - соответственно электростатическая и диэлектрическая постоянные диспергируемой жидкости и потенциал вершины конуса Тейлора.

С учетом соотношений (4) и (7) для массы частицы имеем:

$$m_0 \geq 2\sqrt{3}\pi k r_0 \sigma / 3g(1 + L/\Delta y) \quad (9)$$

Далее с учетом равенства $m_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_ж$ из соотношения (9) для радиуса частицы получаем:

$$r_0 = \sqrt{\sqrt{3} k\sigma / 2\rho_ж g(1 + L/\Delta y)} \quad (10)$$

Исходя из (7) с учетом (8), (9) и (10) окончательно для вектора напряженности электрического поля на вершине конуса Тейлора получаем:

$$E_в = \sqrt{\sqrt{3}\, k\sigma / 6\varepsilon_0 \varepsilon l(1 + \Delta y/L)} \quad (11)$$

Как следует из рисунка 3 потенциалы капилляра $\varphi_к$ и вершины конуса Тейлора $\varphi_в$ связаны соотношением $\varphi_в = \sqrt{2}\varphi_к/\sqrt{3}$. Из соотношения (11) для потенциала $\varphi_в$ вершины конуса Тейлора, при котором диспергируется жидкость в зависимости от расстояния между электродами получаем:

$$\varphi_к \geq \sqrt{\sqrt{3}\, k\sigma L^2 / 4\varepsilon_0 \varepsilon l(1 + \Delta y/L)} \quad (12)$$

Из этого соотношения следует, что высота *l* конуса Тейлора должна убывать с ростом потенциала диспергирования. Это следствие, вытекающее из полученного соотношения, ранее подтверждено экспериментально, как это показано в работе [29]. На рисунке 5 приведена зависимость потенциала диспергирования чернил струйных принтеров от расстояния между электродами.

С учетом (4) - (11) окончательно для характеристических параметров частиц жидкости диспергируемой в «условном» вакууме получаем следующие соотношения:

$$r_0 \geq \sqrt{\sqrt{3} k\sigma / 2\rho_ж g(1 + L/\Delta y)} \quad (13)$$

$$m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\pi^2 k^3 \sigma^3 / 3\rho_ж g^3 (1 + L/\Delta y)^3} \quad (14)$$

$$q_0 \geq \sqrt{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon k^2 \sigma^2 L^2 / \rho_ж g l(1 + L/\Delta y)(1 + \Delta y/L)} \quad (15)$$

$$q_0/m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0 \varepsilon g^2 L^2 (1 + L/\Delta y)^2 / k\sigma l(1 + \Delta y/L)} \quad (16)$$

Анализ полученных формул: (12), (13), (14), (15) и (16) показывает, что функционально они правильно описывают зависимости искомых величин от режимных параметров процесса и физических свойств диспергируемых жидкостей. В соотношениях (11), (12), (15) и (16) значения скобок в знаменателях при малых значениях Δy <<L стремятся к единице и их вкладами при расчетах можно пренебречь.

Потенциал вершины конуса Тейлора $\varphi_в$ выражается через потенциал капилляра с учетом высоты конуса Тейлора и радиуса капилляра. Как показано выше высота конуса выражается через радиус капилляра ($l = r_k/\sqrt{2}$.). Из соотношения (6) однозначно следует критерий неустойчивости на вершине конуса, который определяется условием превышения суммы сил Кулона и тяжести, действующие на заряженную частицу силу поверхностного натяжения. При этом мы рассматриваем только условия возникновения неустойчивости, не вдаваясь в механизмы переноса заряда и жидкости от капилляра к вершине конуса Тейлора. При этом не рассматриваются и динамические процессы истечения жидкости из капилляра. Однако влиянием динамических процессов, протекающих за счет высасывания жидкости из капилляра кулоновскими силами, на процесс диспергирования с вершины конуса можно пренебречь так как её расход ничтожно мал при условии равенства уровней жидкости в сосуде и конца капилляра т. е. при отсутствии расхода жидкости через капилляр в отсутствии электрического поля.

В действительности значение критического заряда частицы в конечном итоге должно определяться величинами, входящими в соотношение (9) кулоновскими силами, силами поверхностного натяжения жидкости ($\sigma, r_k, \varphi_к$) и силой тяжести определяемая параметрами $\rho_ж, g$, L и Δy. Последние два параметра входят в это соотношение потому как масса частицы оценивается, как это описано в первой части работы, исходя из траектории ее движения в электростатическом и гравитационном полях.

Литература:

1. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Классификация режимов электродиспергирования жидкостей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. - № 10. – С. 7 – 17.
2. В.И. Коженков, Н.А. Фукс. Электродинамическое распыление жидкости. // Успехи химии. 1976 г., Т. XLV, вып. 12. С. 2274 – 2284.
3. Аметистов Е.В., Блаженков В.В., Городов А.К., Дмитриев А.С., Клименко А.В. Монодиспергирование вещества: принципы и применение. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 331 с.
4. Вердиев М.Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореф. дис. докт. техн. наук – Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 1997. – 44 с.
5. Вердиев М.Г., Вердиева З.М., Набиев Ш.Ш. Исследование зависимости структуры дисперсных потоков жидкостей и их частиц от параметров электрического поля. Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна. ТОМ 1. 2015 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: ИП Овчинникова (АЛЕФ), 2015. – С. 331-335.
6. M.G. Verdiev, Sh.Sh. Nabiev and other. "Research on uniformity of Nano films and ink dispersion flux forming in electric field". Dagestan State Technical University, Russia. (http://www.idtechex.com/printed-electronics-europe-13/postersession.asp). (Постерный доклад на международной конференции Printed Electronics Europe 2013, Berlin, Germany).
7. М.Г. Вердиев, Ш.Ш. Набиев, Н.А. Камнев. Способ нанесения пленок: проводников, полупроводников и диэлектриков на различные подложки. Патент РФ № 2492938 от 20.09 2013 г.
8. Вердиев М.Г., Абидова М.Ш., Набиев Ш.Ш., Камнев Н.А. Способ получения монодисперсных порошков веществ. Патент РФ № 2506143. МПК: B22F 9/14, B82 Y30/00, Опубл: 10. 02. 2014 Бюл. №4. 5 с.
9. Вердиев М.Г. Разработка процесса очистки воды методом выпаривания и последующей конденсации. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы // Выпуск 3. Материалы Научной сессии Институт проблем геотермии, посвященной Дню российской науки.

Махачкала. 7-8 февраля 2014 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова - Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников). 2014. - (158) С 77 - 82.

10. Вердиев М.Г., Абидова М.Ш. Способ получения монодисперсных композитов с размерами частиц в интервале от 10^{-6} до 10^{-4} м. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Махачкала, – 2002. – Вып. № 5. – С. 29 – 34.
11. Zeleny J.J., Phys. Rev., 3, 69 (1914).
12. Zeleny J.J., Proc. Cambridge, Philosophy. Soc., 71 (1916).
13. Zeleny J.J., Phys. Rev., 16, 102 (1920).
14. Зимон А.Д., Павлов А.Н Коллоидная химия наночастиц. М.: Научный мир 2012, 224 с.
15. Вердиев М.Г., Юсуфов Б.С., Агаева С.Р. Оптимизация форм и размеров шипа круглого сечения в сопряженных задачах теплопереноса. Материалы II Международной конференции Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Махачкала 2010 г, С 361-366
16. Вердиев М.Г., Юсуфов Б.С., Агаева С.Р. Применение нанотехнологий для интенсификации процессов теплопереноса при испарении теплоносителя Труды пятой российской национальной конференции по теплообмену. М:. Издательский дом МЭИ. Том IV. 2010. С. 240-243.
17. Вердиев М.Г., Юсуфов Б.С., Агаева С.Р. Интенсификация процессов тепломассопереноса в системах геотермальной энергетики за счет реализации режимов кипения низкотемпературных теплоносителей. Материалы II Международной конференции Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Махачкала 2010 г, С 403-409.
18. Вердиев М.Г., Юсуфов Б.С. Расчет и оптимизация сечения и формы неизотермического ребра в широком интервале тепловых нагрузок. Махачкала. Сборник трудов II Всероссийской научно – технической конференции “Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты”, ДГТУ, 2011 г. С.14-27.
19. Вердиев М.Г., Набиев Ш. Ш., Камнев Н. А., Агаева С. Р., Абидова М. Ш. Методика получения микропленок жидкостей на оребрённой поверхности теплоподвода. Махачкала. Сборник трудов II Всероссийской научно – технической конференции “Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты”, ДГТУ, 2011 г. С.447-450.
20. Вердиев М.Г., Агаева С. Р., Набиев Ш. Ш., Камнев Н. А., Абидова М. Ш. Реализация режима максимума коэффициента теплоотдачи на поверхности теплоподвода методом выпаривания микро - нано плёнок теплоносителей. Махачкала, Сборник трудов II Всероссийской научно – технической конференции “Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты”, ДГТУ, 2011 г. С.451-454.
21. Вердиев М.Г. Модель процесса тепломассообмена на неизотермической поверхности теплоподвода. Махачкала. Материалы IV Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов, 2011 г, С 31-43.
22. Verdiev M.G., Nabiev Sh. Sh., Kamnev N.A. The research of the technological parameters effect on the shape and structure of the disperse dye flow of the inkjet printers produced in the electric field. Journal of Physics: Conference Series 345 (2012) 012038 IV Nanotechnology International Forum (Rusnanotech 2011).
23. Чиннов Е.А., Кабов О.А., Жуковская О.В., Шарина И.А. Теплообмен в недогретой до температуры насыщения испаряющейся пленке жидкости. // *TBT*, **44**:6 (2006), 903–912.
24. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А. Радиус сухого пятна и толщина микропленки под паровым пузырем. // Инженерно- физический журнал. – 1991. – Т. 61. №1. – С. 92 – 97.
25. Вердиев М.Г. Получение тонких пленок жидкостей путем их диспергирования в электрическом поле. Электронная обработка материалов. – 1991. – №4. – С. 36 – 41.
26. Хоган Дж., Хендрикс С. Д. Исследование отношения заряда к массе электрически распыляемых частиц жидкости // Ракетная техника и космонавтика. 1965. Т. 3, № 2, С. 140 – 147.

27. Сасин В.А. Ветвление равновесных форм капель в электрическом поле. //ЖТФ, том 70, вып. 4, 2000, С. 128 – 129.
28. Васютин Е.В., Погосов В.В. О кулоновской неустойчивости заряженных кластеров. // Физика твердого тела. том 46, вып.10, 2004, С. 1861-1865.
29. Волькеньштейн В.С. Сборнику задач по общему курсу физики. СП.: 3-е, исп. и доп. 2006, 328 с.
30. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика – 2-е изд., исп. – М.: Физматлит, 2002 – 536 с.: ил.
31. Фейнмановские лекции по физике. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., Т. 4. Кинетика. Теплота. Звук. М.: Издательство «Мир». Редакция литературы по физике, 1976.
32. Вердиев М.Г., Вердиева З.М., Набиев Ш.Ш. Исследование зависимости структуры дисперсных потоков жидкостей и их частиц от параметров электрического поля. // Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна. ТОМ 1. 2015 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: ИП Овчинникова (АЛЕФ), 2015. С. 331-335.
33. Семкин Н.Д., Шепелев С.М. Исследование потоков микрочастиц при электростатическом диспергировании жидкости. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. № 3, 2006, С. 44 – 52.
34. Ширяева, С. О. Жидко-капельный аэрозоль. Теоретические основы получения: учебное пособие / С. О. Ширяева, А. И. Григорьев; Ярос. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2013. – 100 с.
35. Хоган Дж. Дж., Хендрикс С.Д. Исследование отношения заряда к массе электрически распыляемых частиц жидкости // Ракет. техника и космонавтика. 1965. Т. 3, N-◦ 2. С. 140–147.
36. А.И. Жакин. Электрогидродинамика заряженных поверхностей. // Успехи физических наук. 2013 г., Том 183, № 2, С. 153 – 177.
37. Сасин В.А. Ветвление равновесных форм капель в электрическом поле. //ЖТФ, 2000, том 70, вып. 4 С. 128 – 129.
38. Васютин Е.В., Погосов В.В. О кулоновской неустойчивости заряженных кластеров. // Физика твердого тела. том 46, вып.10 С. 1861-1865.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Вердиев М.Г.[1], Ниналалов С.А.[1], Набиев Ш.Ш.[2], Азизов А.А.[1], Вердиева З.М.[3]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии, Россия, Махачкала; 367030, пр. И. Шамиля, п/о № 30, а/я № 7 [2]ООО «ТЕХН», [3]Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана, E-mail: mikail_verdiev@mail.ru

Оценка подвижности частиц дисперсного потока жидкости необходимо произвести для установления технологических режимов диспергирования жидкостей в геотермальной энергетике, где широко используются технологии очистки жидкостей методом испарения и последующей ее конденсации в электрическом поле. При этом скорость выпаривания жидкости в электрическом поле резко возрастает так как размеры частиц дисперсных потоков составляют нанометры [1 - 9].

Согласно [10, 11] сопротивление *R* любого потока заряженных частиц дрейфующихся во внешней дискретной среде в электрическом поле связано с динамическими характеристиками носителей заряда соотношением:

$$1/\mathrm{R} = \mu q_0^2 n_i \widehat{S}/L, \qquad (1)$$

где μ, q_0, n_i, $\widehat{S}$, L – соответственно подвижность и заряд частиц, число частиц в единице объема потока, среднее сечение дисперсного потока в форме усеченного конуса и расстояние между электродами. Для сопротивления потока частиц, получаемых путем диспергирования жидкости в электрическом поле имеем:

$$R = \varphi_к / I = \sqrt{k^2\sigma^2/8\varepsilon_0{}^2\varepsilon^2 g^2(1 + L/\Delta y)^2\left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)^2}/KG \qquad (2)$$

Если исходить из (1) с учетом (2) для подвижности частиц получаем соотношение:

$$\mu = \mathrm{GL}/q_0^2 n_i \widehat{S}\sqrt{k^2\sigma^2(1 + \Delta y/L)/8\varepsilon_0{}^2\varepsilon^2 g^2(1 + \Delta y/L)(1 + L/\Delta y)^2(1 - \rho_c/\rho_ж)^2} \qquad (3)$$

Из полученного соотношения следует, что подвижность частиц жидкости диспергируемой в электрическом поле зависит от коэффициента поверхностного натяжения, диэлектрической проницаемости, и плотности жидкости, и среды диспергирования, и геометрических размеров потока. Согласно соотношению (3) подвижность частиц дисперсного потока соответствует физической сути кинетических явлений и при плотности среды равной плотности диспергируемой жидкости подвижность частиц стремиться к нулю, а сопротивление (2) к бесконечности т.е. частицы потока переходят во взвешенное состояние.

Для тока переноса потока получаем соотношение:

$$I = KG\sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0\varepsilon g^2 L^2(1 + L/\Delta y)^2(1 - \rho_c/\rho_ж)^2/k\sigma l(1 + \Delta y/L)} \qquad (4)$$

$$I = q_0 G/m_0$$

Где подкоренное выражение соответствует удельному заряду частиц, а *K* в соотношении является корректирушим коэффициентом обусловленным частичной нейтрализацией заряда частиц ионами среды, который снижает величину тока переноса потока.

Как следует из соотношения (4) токовый перенос потока прямо пропорционально массовому расходу жидкости через капилляр и удельному заряду частиц. Результаты многочисленных экспериментальных исследований [4 - 9] процесса диспергирования жидкостей в электрическом поле показали, что наиболее стационарному потоку соответствуют оптимальные геометрические размеры конуса Тейлора, которые вытекают из разработанной модели диспергирования жидкости. Следовательно, для достижения стационарного процесса диспергирования жидкости необходимо контролировать предварительные расчетные значения геометрических параметров конуса Тейлора для данной жидкости и среды диспергирования.

Факторы определяющие геометрические характеристики конуса Тейлора.

Как следует из результатов многочисленных исследований характеристические параметры дисперсного потока частиц жидкостей, получаемых в электрическом поле, являются функциями радиуса основания жидкого конуса - радиуса капилляра и высоты конуса Тейлора и потенциала капилляра. Радиус основания конуса является фиксированной величиной при заданном значении радиуса капилляра. Для одних жидкостей, например, для чернил окиси титана радиус основания конуса равен внутреннему, а для чернил струйных принтеров

марки «Hi color ink Epson» наружному радиусу капилляра. По-видимому, это можно объяснить смачиваемостью материала капилляра диспергируемой жидкостью или растворимостью диспергируемой жидкости в воде. Явная зависимость высоты конуса Тейлора от потенциала диспергирования капилляра следует из зависимости:

$$l \geq \sqrt{3}\, k\sigma L^2 / 4\varepsilon_0 \varepsilon \varphi_к^2 (1 + \Delta y / L) \qquad (1)$$

Вместе с этим следует отметить, что высота конуса однозначно определяется радиусом капилляра так как точка максимума вектора напряженности электрического поля – точка формирования дисперсного потока жидкости расположена на расстоянии от конца электрозаряженного капилляра определяемом из соотношения: $l = r_k/\sqrt{2}$. В принципе высота жидкого конуса может быть использована для оценки удельного заряда частиц дисперсного потока данной жидкости при заданных радиусе капилляра и расстоянии между электродами. Как следует из соотношения (1) высота конуса убывает с ростом потенциала независимо от расстояния *L* между электродами. Это обусловлено тем, что значение силовой характеристики электрического поля – вектора напряженности электрического поля определяется коэффициентом поверхностного натяжения и диэлектрической проницаемостью жидкости, как это следует из условия возникновения неустойчивости на вершине конуса Тейлора - в зоне формирования дисперсного потока жидкости, который имеет вид:

$$3\, q_0 E(\Delta y/L + 1)/2\pi k r_0 \sigma \geq 1 \qquad (2)$$

Таким образом высота конуса Тейлора может быть использована в качестве контрольного характеристического параметра при разработке автоматизированной системы управления режимными параметрами диспергирования жидкости в электрическом поле.

Исходя из зависимости траектории движения центральной частицы потока в силовых полях от времени по описываемой модели легко можно определить время установления составляющих скоростей и соответственно время и средняя скорость движения частиц между электродами.

Определение времени установления составляющих дрейфовых скоростей частиц по осям *x* и *y*. Для нахождения времени установления составляющих дрейфовых скоростей по осям *x* и *y* решаем систему дифференциальных уравнений, для случая движения дисперсного потока жидкости в произвольной среде:

$$d^2x/dt^2 + 9\eta_c dx/2r_0^2\rho_ж dt - 3q_0 E/4\pi r_0^3 \rho_ж = 0 \qquad (3)$$

$$d^2y/dt^2 + 9\eta_c dy/2r_0^2\rho_ж dt - (1 - \rho_c/\rho_ж)g = 0 \qquad (4)$$

которая после введения обозначений: $\ddot{x}(t) = d^2x/dt^2$, $\dot{x}(t) = dx/dt$, $\ddot{y}(t) = d^2y/dt^2$, $\dot{y}(t) = dy/dt$, $\mathrm{A} = 9\eta_c/2r_0^2\rho_ж$, $\mathrm{B} = 3q_0E/4\pi r_0^3\rho_ж$ и $\mathrm{C} = (1 - \rho_c/\rho_ж)g$ принимает вид:

$$\ddot{x}(t) + \mathrm{A}\dot{x}(t) - \mathrm{B} = 0 \qquad (5)$$

$$\ddot{y}(t) + \mathrm{A}\dot{y}(t) - \mathrm{C} = 0 \qquad (6)$$

Решение этой системы записываем в виде:

$$x(t) = (L - \mathrm{B}t_1/\mathrm{A})(1 - e^{-\mathrm{A}t})/(1 - e^{-\mathrm{A}t_1}) + \mathrm{B}t/\mathrm{A} \qquad (7)$$

$$y(t) = (\Delta y - \mathrm{C}t_1/\mathrm{A})(1 - e^{-\mathrm{A}t})/(1 - e^{-\mathrm{A}t_1}) + \mathrm{C}t/\mathrm{A} \qquad (8)$$

Здесь $x(t)$ и $y(t)$ – соответственно расстояние между электродами и величина отклонения потока по вертикали. Решая систему уравнений (7) (8) для составляющих по осям *x* и *y* дрейфовых скоростей частицы получаем:

$$v_{x,др.} = q_0 E/6\pi r_0 \eta_c \qquad (9)$$

$$v_{y,др.} = 2r_0^2 g(\rho_ж - \rho_c)/9\eta_c \qquad (10)$$

При больших значениях силы сопротивления – в плотных средах дрейфовая скорость устанавливается за малое время в начальном участке перемещения потока в среде. При приближении плотности среды к плотности диспергируемой жидкости, как следует из (10) со-

ставляющая дрейфовой скорости по оси *y* - ов стремиться к нулю так как частицы в этом результирующем силовом поле равном нулю будут находиться во взвешенном состоянии.

Литература:

1. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Классификация режимов электродиспергирования жидкостей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. - № 10. – С. 7 – 17.
2. В.И. Коженков, Н.А. Фукс. Электродинамическое распыление жидкости. // Успехи химии. 1976 г., Т. XLV, вып. 12. С. 2274 – 2284.
3. Аметистов Е.В., Блаженков В.В., Городов А.К., Дмитриев А.С., Клименко А.В. Монодиспергирование вещества: принципы и применение. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 331 с.
4. Вердиев М.Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореф. дис. докт. техн. наук – Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 1997. – 44 с.
5. Вердиев М.Г., Вердиева З.М., Набиев Ш.Ш. Исследование зависимости структуры дисперсных потоков жидкостей и их частиц от параметров электрического поля. Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна. ТОМ 1. 2015 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: ИП Овчинникова (АЛЕФ), 2015. – С. 331-335.
6. M.G. Verdiev, Sh.Sh. Nabiev and other. "Research on uniformity of Nano films and ink dispersion flux forming in electric field". Dagestan State Technical University, Russia. (http://www.idtechex.com/printed-electronics-europe-13/postersession.asp). (Постерный доклад на международной конференции Printed Electronics Europe 2013, Berlin, Germany).
7. М.Г. Вердиев, Ш.Ш. Набиев, Н.А. Камнев. Способ нанесения пленок: проводников, полупроводников и диэлектриков на различные подложки. Патент РФ № 2492938 от 20.09 2013 г.
8. Вердиев М.Г., Абидова М.Ш., Набиев Ш.Ш., Камнев Н.А. Способ получения монодисперсных порошков веществ. Патент РФ № 2506143. МПК: B22F 9/14, B82 Y30/00, Опубл: 10. 02. 2014 Бюл. №4. 5 с.
9. Вердиев М.Г. Разработка процесса очистки воды методом выпаривания и последующей конденсации. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы // Выпуск 3. Материалы Научной сессии Институт проблем геотермии, посвященной Дню российской науки. Махачкала. 7-8 февраля 2014 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова - Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников). 2014. - (158) С 77 - 82.
10. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика – 2-е изд., исп. – М.: Физматлит, 2002 – 536 с.: ил.
11. Фейнмановские лекции по физике. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М., Т. 4. Кинетика. Теплота. Звук. М.: Издательство «Мир». Редакция литературы по физике, 1976.

ВОЛЬТ – АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Вердиев М.Г.[1], Ниналалов С.А.[1], Набиев Ш.Ш.[2], Азизов А.А.[1], Вердиева З.М.[3]

[1]ФГБУНИнститут проблем геотермии, Россия. 367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, п/о № 30, а/я № 7 E-mail: mikail_verdiev@mail.ru,
[2]ООО «ТЕХН», [3]Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана

Для установления технологических режимов диспергирования жидкостей в геотермальной энергетике широко используются технологии очистки жидкостей методом испарения и последующей ее конденсации в электрическом поле. При этом скорость выпаривания жидкости в электрическом поле резко возрастает так как размеры частиц дисперсных потоков составляют нанометры [1 - 9].

Технологические режимы диспергирования жидкостей зависят от характеристических параметров частиц, получаемых при диспергировании жидкости в электрическом поле из капилляра в диспергируемой среде. Условия для возникновения неустойчивости на вершине конуса Тейлора возникают при балансе сил определяемого из уравнения:

$$\vec{F}_K + \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_p + \vec{F}_{от} \geq 0 \qquad (1)$$

В дальнейших выкладках в условии возникновения неустойчивости на вершине конуса Тейлора (1) пренебрегаем силой отдачи вырывающихся частиц. С учетом последнего условия для критерия неустойчивости на вершине конуса Тейлора получаем:

$$q_0 E + m_0 g\left(1 - \rho_в/\rho_ж\right) \geq 2\pi k r_0 \sigma \qquad (2)$$

Значение потенциала диспергирования капилляра не зависит от среды диспергирования и определяется практически силой поверхностного натяжения и диэлектрическими свойствами диспергируемой жидкости.

Исходя из (1) с учетом условия (2) нарушения устойчивости на вершине конуса для характеристических параметров частиц жидкости диспергируемой в электростатическом поле в произвольной среде получаем:

$$r_0 \geq \sqrt{\sqrt{3}k\sigma/2\rho_ж g(1 + L/\Delta y)\left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)} \qquad (3)$$

$$m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\pi^2 k^3 \sigma^3/3\rho_ж g^3 (1 + L/\Delta y)^3 \left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)^3} \qquad (4)$$

$$q_0 \geq \sqrt{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon k^2 \sigma^2 L^2/\rho_ж g l (1 + L/\Delta y)(1+\Delta y/L)\left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)} \qquad (5)$$

$$q_0/m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0 \varepsilon g^2 L^2 (1 + L/\Delta y)^2 \left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)^2/k\sigma l(1 + \Delta y/L)} \qquad (6)$$

Выражения вектора напряженности электрического поля и потенциала на вершине конуса Тейлора практически не зависят от параметров окружающей среды. Однако, в некоторых средах с относительно большой плотностью вероятно изменение вектора напряженности электрического поля и потенциала на вершине конуса Тейлора за счет высокой степени поляризации молекул среды в локальной области вершины.

Таким образом радиус, масса, заряд и удельный заряд частиц дисперсного потока жидкости, покидающих вершину конуса Тейлора и движущихся в произвольной среде ко второму электроду, определяются из соотношений (3) - (6) при наличии сил Архимеда и сопротивления среды на основе уравнения (1). Характеристических параметры частиц жидкостей диспергируемых в электрическом поле в газах и плотных (3) - (6) средах отличаются влиянием диэлектрической проницаемости и плотности среды диспергирования. Недостатком полученных соотношений следует считать то, что они функционально не зависят от вязкости

жидкости, следовательно, для их применения при анализе процесса диспергирования вязких жидкостей необходимо ввести соответствующие коррективы.

Состояние неустойчивого дисперсного потока жидкости отображается на нестабильности его вольт – амперной характеристики, когда потенциал диспергирования и ток меняются во времени нестабильно. Хотя исследования многих авторов посвящены именно этому режиму диспергирования, который имеет наименьшее практическое применение. Это требует строгого контроля вольт – амперной характеристики дисперсного потока в ходе процессов диспергирования жидкости и нанесения пленок жидкостей для обеспечения их стабильных технических характеристик. Таким образом необходимо выбрать наиболее оптимальный участок вольт – амперной характеристики дисперсного потока жидкости для нанесения соответствующих нано – микропленок. Этому участку вольт – амперной характеристики потока соответствует стабильный режим диспергирования жидкости с вершины конуса Тейлора с максимальной для данной жидкости высотой при заданном расстоянии между электродами.

Вольт – амперная характеристика дисперсного потока жидкостей. Для получения аналитического выражения вольт – амперной характеристики дисперсного потока жидкости необходимо определить количество инжектируемых за единицу времени из вершины конуса Тейлора заряженных частиц при известной их массе. Число частиц *n,* инжектируемых за единицу времени из вершины конуса и пересекающих единицу нормального сечения дисперсного потока и достигающих второго электрода определяем исходя из значения тока переноса или массового расхода жидкости так как заряд и масса переносятся одними и теми же частицами потока одновременно за одно и тоже заданное время Δt. Для определения величины тока переноса необходимо знать число заряженных частиц достигших второго электрода т. е. величину заряда, стекающего на землю со второго электрода. Однако этот заряд, переносимый частицами до второго электрода, по всей вероятности, будет меньше истинного его значения так как часть заряда частиц за время его измерения будет компенсироваться фоновыми ионами, присутствующими в окружающей среде. В связи с этим для точной оценки величины тока переноса и числа частиц, инжектируемых электрическим полем необходимо использовать массовый расход жидкости. Полное число частиц, образующихся за время Δt входит в соотношения для тока *I* переноса или массового расхода *G* жидкости, которые определяем исходя из соотношений для массы и заряда частиц за одно и тоже время. Их потоки выражаются через полное число частиц *N* образующихся за время измерения Δt соотношениями:

$$G = Nm_0/\Delta t = nm_0, I = Nq_0/\Delta t = nq_0, \quad (7)$$

где $n = N/\Delta t$ число частиц инжектируемых в единицу времени в объем дисперсного потока с вершины конуса Тейлора, а *N* - полное число частиц образующихся за время измерений Δt.

С учетом (4), (5), (6) и (7) для тока переноса потока получаем:

$I = q_0 G/m_0$

Или с учетом соотношения (6) для зарядового и массового расхода имеем:

$$I = KG\sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0\varepsilon g^2 L^2(1+L/\Delta y)^2(1-\rho_c/\rho_ж)^2/k\sigma l(1+\Delta y/L)} \quad (8)$$

$$G = I/K\sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0\varepsilon g^2 L^2(1+L/\Delta y)^2(1-\rho_c/\rho_ж)^2/k\sigma l(1+\Delta y/L)} \quad (9)$$

Здесь *K* коэффициент учитывающий величину расхождения расчетного значения удельного заряда частицы от экспериментальных данных полученных по току и массовому расходу жидкости из-за утечки заряда за счет фоновых ионов среды и погрешности измерения массового расхода. С ростом расстояния между электродами потенциал диспергирования жидкости растет. Следовательно, зависимость силы тока от расстояния между электродами в выражении (8) является линейным как это следует из закона Ома. Формула (8) каче-

ственно правильно описывает функциональную зависимость силы тока от всех параметров, входящих в неё.

Для переходя к вольт – амперной характеристике потока, в привычном выражении, с учетом (8) (в рассматриваемой технологии второй электрод заземлен и поэтому за падение напряжения между электродами принимаем потенциал выраженный через потенциал капилляра) Из (8) для сопротивления дисперсного потока *R* получаем:

$$R = \varphi_к / I = \sqrt{k^2\sigma^2 / 8{\varepsilon_0}^2\varepsilon^2 g^2 (1 + L/\Delta y)^2 \left(1 - \rho_c/\rho_ж\right)^2} / KG \qquad (10)$$

В этом выражении для сопротивления, по всей вероятности, учитывается сопротивление конусного дисперсного потока через массовый расход жидкости хотя нигде при получении этого выражения мы явно не учитывали этот факт, по-видимому это автоматически учитывается в экспериментальных значениях массового или зарядового расхода через полное число частиц образующихся за всё время протекания процесса. Качественный анализ формулы показывает, что электрическое сопротивление дисперсного потока правильно выражается через характеристические параметры частиц потока и его массовый расход. Этот факт будет подтверждён при сопоставительном анализе расчетной кривой зависимости сопротивления от расхода жидкости и её коэффициента поверхностного натяжения. Как следует из (10) при росте плотности среды величина последней скобки под корнем стремиться к нулю, а, следовательно, сопротивление потока будет стремиться к бесконечности. Это обусловлено переходом частиц во взвешенное состояние при нулевой скорости направленного движения. Таким образом из функциональных зависимостей интегральных параметров (4 - 10) дисперсного потока следует, что они достоверно отображают влияние технологических параметров на процесс диспергирования жидкости в электрическом поле в стационарном режиме.

Литература:

1. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Классификация режимов электродиспергирования жидкостей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. - № 10. – С. 7 – 17.
2. В.И. Коженков, Н.А. Фукс. Электродинамическое распыление жидкости. // Успехи химии. 1976 г., Т. XLV, вып. 12. С. 2274 – 2284.
3. Аметистов Е.В., Блаженков В.В., Городов А.К., Дмитриев А.С., Клименко А.В. Монодиспергирование вещества: принципы и применение. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 331 с.
4. Вердиев М.Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореф. дис. докт. техн. наук – Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 1997. – 44 с.
5. Вердиев М.Г., Вердиева З.М., Набиев Ш.Ш. Исследование зависимости структуры дисперсных потоков жидкостей и их частиц от параметров электрического поля. Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна. ТОМ 1. 2015 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: ИП Овчинникова (АЛЕФ), 2015. – С. 331-335.
6. M.G. Verdiev, Sh.Sh. Nabiev and other. "Research on uniformity of Nano films and ink dispersion flux forming in electric field". Dagestan State Technical University, Russia. (http://www.idtechex.com/printed-electronics-europe-13/postersession.asp). (Постерный доклад на международной конференции Printed Electronics Europe 2013, Berlin, Germany).
7. М.Г. Вердиев, Ш.Ш. Набиев, Н.А. Камнев. Способ нанесения пленок: проводников, полупроводников и диэлектриков на различные подложки. Патент РФ № 2492938 от 20.09 2013 г.
8. Вердиев М.Г., Абидова М.Ш., Набиев Ш.Ш., Камнев Н.А. Способ получения монодисперсных порошков веществ. Патент РФ № 2506143. МПК: B22F 9/14, B82 Y30/00, Опубл: 10. 02. 2014 Бюл. №4. 5 с.

9. Вердиев М.Г. Разработка процесса очистки воды методом выпаривания и последующей конденсации. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы // Выпуск 3. Материалы Научной сессии Институт проблем геотермии, посвященной Дню российской науки. Махачкала. 7-8 февраля 2014 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова - Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников). 2014. - (158) С 77 - 82.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БИНАРНЫХ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ВОДЫ, СПИРТОВ И УГЛЕВОДОРОДОВ

Базаев Э.А. Базаев А.Р. Османова Б.К.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: emilbazaev@gmail.com

По экспериментальным данным о p,ρ,T,x-зависимостях гомогенных бинарных систем, вода–спирт (метанол, этанол, н-пропанол) и спирт–н-алкан (н-пентан, н-гексан, н-гептан, н-октан) в однофазной (жидкой, паровой), двухфазной (жидкость–пар), околокритической и сверхкритической областях параметров состояния получены фазовые диаграммы в различных сечениях термодинамической поверхности $(p,\rho,T)_x$. Методом излома изохор в p,T-плоскости и графоаналитическим методом с учетом скейлингового поведения определены значения параметров критического состояния систем $p_к,\rho_к,T_к$ для значений концентрации 2-го компонента (x) 0.2, 0.5, 0.8, 0.9 мол.доли. Установлено, что критическая точка гомогенной бинарной смеси постоянного состава, подобно критической точке чистого вещества, находится на вершине кривой сосуществования фаз. По $p_к,\rho_к,T_к$-данным получены критические линии систем, отличающиеся по форме и концентрационной зависимости. Получены аналитические выражения зависимости критических параметров от состава систем.

Введение. Достоверные прецизионные p,ρ,T-зависимости смесей технологически важных веществ в широком диапазоне параметров состояния, включая и критическое состояние, необходимы для развития, как феноменологической термодинамической теории растворов, так и флуктационной теории критических явлений (скейлинг-теории). $p_к,\rho_к,T_к$-данные систем (органический + органический, органический + неорганический, полярный + полярный, полярный + неполярный, неполярный + неполярный) нужны также для получения уравнений состояния, пригодных для расчета технологических процессов химической, нефтехимической, энергетической отраслей промышленности.

Известные расчетные и эмпирические методы предназначены в основном для прогнозирования критической температуры двойных и многокомпонентных систем [1-3]. Достоверные данные о критических свойствах смесей на данном этапе развития теоретических моделей можно получить только экспериментальным путем. Одним из надежных способов получения подобных данных являются p,ρ,T,x-измерения на пьезометрической установке постоянного объема методом сжимаемости в широком диапазоне параметров состояния, включая околокритическую область [4,5].

Как известно, КС чистого вещества соответствует единственная (критическая) точка КТ на термодинамической поверхности состояния двухфазной области с параметрами $p_к$, $\rho_к$, $T_к$, в которой сосуществующие жидкая и газовая фазы становятся тождественными по своим свойствам. КС чистого вещества должно удовлетворять математическим критериям [6]:

$$\left(\partial p/\partial\rho\right)_T^к = 0,\ \left(\partial^2 p/\partial\rho^2\right)_T^к = 0,\ \left(dp/dT\right)_{T=T_к} = \left(\partial p/\partial T\right)_{T=T_к,\rho=\rho_к}$$

КС гомогенных растворов дополнительно характеризуется критической концентрацией одного из компонентов $x_к$ и должно удовлетворять критерию

$\left(\partial\mu/\partial x\right)_{p,T}^{\kappa} = \left(\partial^2\mu/\partial x^2\right)_{p,T}^{\kappa} = 0$, где $\mu = \mu_2 - \mu_1$ - разность химических потенциалов компонентов раствора.

Экспериментально установлено, что КТ гомогенной бинарной смеси постоянного состава, подобно КТ чистого вещества, находится на вершине кривой сосуществования жидкой и паровой фаз, т.е. $T_к$ в системе соответствует максимальное давление [5,7-14]. Это позволяет описывать КС гомогенных бинарных смесей теоретическими моделями, полученными для чистых веществ.

Эксперимент. Методика проведения эксперимента и характер *p,ρ,T,x*-зависимостей исследованных систем в различных агрегатных состояниях приведены в наших работах [4,5]. Для измерений были использованы диаэрированная вода двойной дистилляции, углеводороды и спирты (кроме этанола) марки ХЧ.

В данной работе по результатам обработки собственных экспериментальных данных о *p,ρ□T,x*-зависимостях гомогенных бинарных систем, вода–спирт (метанол, этанол, н-пропанол) и спирт–н-алкан (н-пентан, н-гексан, н-гептан, н-октан) в околокритической области определены значения параметров их критического состояния $p_к$,$\rho_к$,$T_к$ и по ним получены их критические линии.

В таблице 1 приведены значения параметров КС систем, полученные по экспериментальным данным.

Таблица 1.

Критические параметры исследованных систем

x	$T_к$, K	$p_к$, МПа	$\rho_к$, кг/м^3	$Z_к$
вода–метанол				
0,0	647,10	22,1	322,0	0,230
0,5	565,15	13,5	292,2	0,241
0,8	533,15	10,2	285,5	0,228
1,0	512,60	8,1	280,0	0,204
вода–этанол				
0,0	647,10	22,1	322,0	0,230
0,2	601,15	16,1	293,4	0,241
0,5	556,15	10,9	282,0	0,253
0,8	530,15	7,9	280,1	0,250
1,0	513,92	6,1	276,0	0,240
вода–н-пропанол				
0,0	647,10	22,1	322,0	0,230
0,2	598,15	15,1	303,2	0,261
0,5	557,15	9,5	287,5	0,275
0,8	541,15	6,5	284,2	0,265
1,0	536,85	5,2	273,2	0,258
этанол–н-пентан				
0,0	514,65	6,2	270,0	0,25
0,5	492,00	5,6	251,4	0,32
1,0	469,70	3,4	232,0	0,268
этанол–н-гексан				
0,0	514,65	6,2	270,0	0,25
0,5	511,40	5,5	251,9	0,34
1,0	507,82	3,0	233,2	0,266

x	$T_к$, K	$p_к$, МПа	$\rho_к$, кг/м^3	$Z_к$
этанол–н-гептан				
0,0	514,65	6,2	270,0	0,247
0,2	519,80	6,1	262,5	0,303
0,5	527,35	5,4	251,8	0,356
0,8	535,05	3,9	240,8	0,327
1,0	540,13	2,7	232,0	0,263
этанол–н-октан				
0,0	514,65	6,2	270,0	0,247
0,2	525,60	6,0	263,5	0,312
0,5	542,60	5,1	252,7	0,361
0,8	558,70	3,7	242,0	0,328
1,0	569,32	2,5	234,9	0,257
н-пропанол–н-пентан				
0,0	536,85	5,2	273,2	0,258
0,2	516,15	4,8	264,2	0,267
0,5	493,15	4,4	251,9	0,284
0,8	476,05	3,8	239,5	0,284
0,9	473,15	3,6	235,5	0,276
1,0	469,70	3,4	232,0	0,268
н-пропанол–н-гексан				
0,0	536,85	5,2	273,2	0,258
0,2	523,15	4,7	265,8	0,264
0,5	509,55	4,1	253,3	0,277
0,8	506,15	3,5	241,0	0,277
0,9	506,35	3,2	236,9	0,269
1,0	507,82	3,0	233,2	0,266

Проекции критических линий систем вода–метанол и вода–этанол в *p,T*-плоскости представляют собой слегка вогнутые вверх гладкие кривые (рис.1,2), а проекция критических линий системы вода–н-пропанол, наоборот, выпуклая кривая для состава *x*=0.5-1.0 мол.доли н-пропанола и почти прямая линия для состава *x*=0.0-0.5 (рис.3). Проекции критических линий систем этанол–н-гептан и этанол–н-октан имеют выпуклую форму (рис. 4,5) и отличаются по характеру зависимости критического давления от критической температуры. Критические линии систем н-пропанол–н-пентан и н-пропанол–н-гексан (рис.6,7) по форме и характеру зависимости критического давления от критической температуры подобны критической линии системы вода–н-пропанол (рис.3).

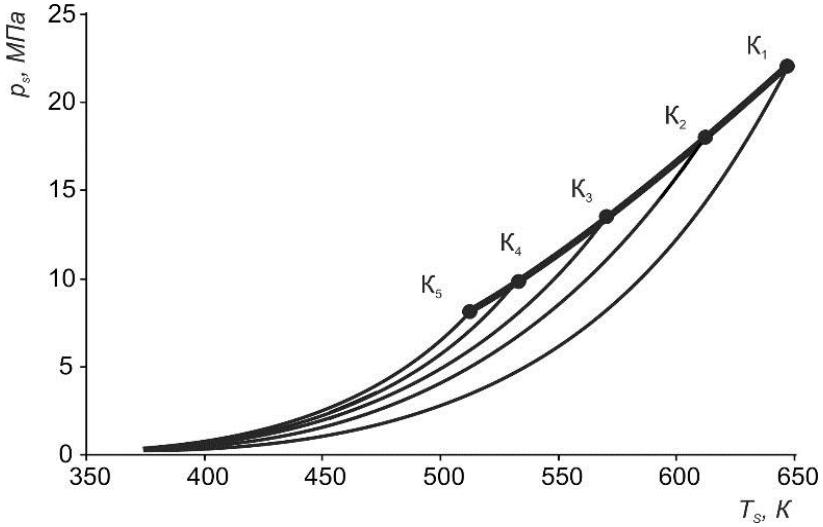


Рис. 1. Крические изохоры и критическая кривая раствора вода-метанол состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0.

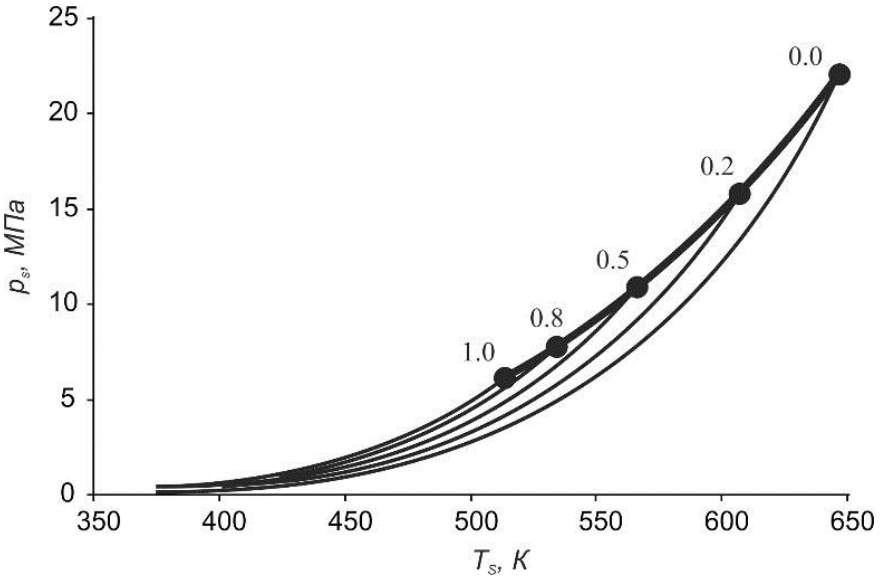


Рис. 2. Крические изохоры и критическая кривая раствора вода-этанол состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0.

Характер зависимости критических давления, температуры, плотности и фактора сжимаемости от состава *x* систем демонстрируют рис. 8-11. Как видно из рис.8, критическая температура смесей воды со спиртами (рис.8а) и н–пропанола с н-пентаном и н-гексаном (рис.8в) имеет нелинейный характер зависимости от состава *x*, а смесей этанола с н-гептаном и н-октаном линейный (рис.8б), причем зависит от молярной массы углеводородов.

Форма проекций критических линий систем в *p,x*-плоскости (рис.9) вогнутая (рис.9а), выпуклая (рис.9б) и практически линейная (рис.9в). Общим для всех является плавное уменьшение величины критического давления с ростом концентрации. Характер зависимости критической плотности от состава систем (рис.10) аналогичен зависимости $p_к(x)$, причем зависимость $\rho_к(x)$ для смесей спирт–углеводород линейна.

Интерес для теории растворов и особенно для практического приложения представляет характер зависимости величины фактора сжимаемости от состава исследованных систем в критическом состоянии $Z_к$. Как видно из рис.11, величина $Z_к$ имеет ярко выраженный максимум для значения состава около 0.5 мол.доли спирта (рис.11а) и 0.6 мол.доли углеводорода (рис.11б,в).

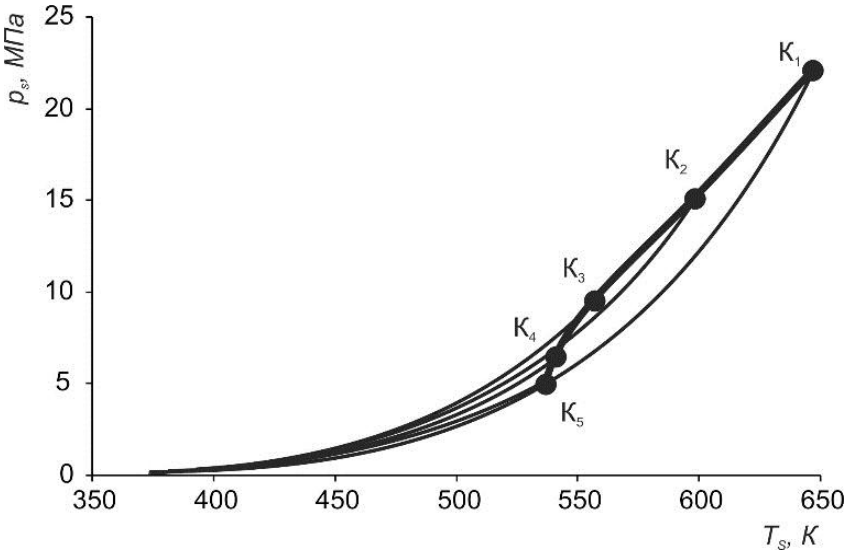


Рис. 3. Крические изохоры и критическая кривая раствора вода-н-пропанол состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0

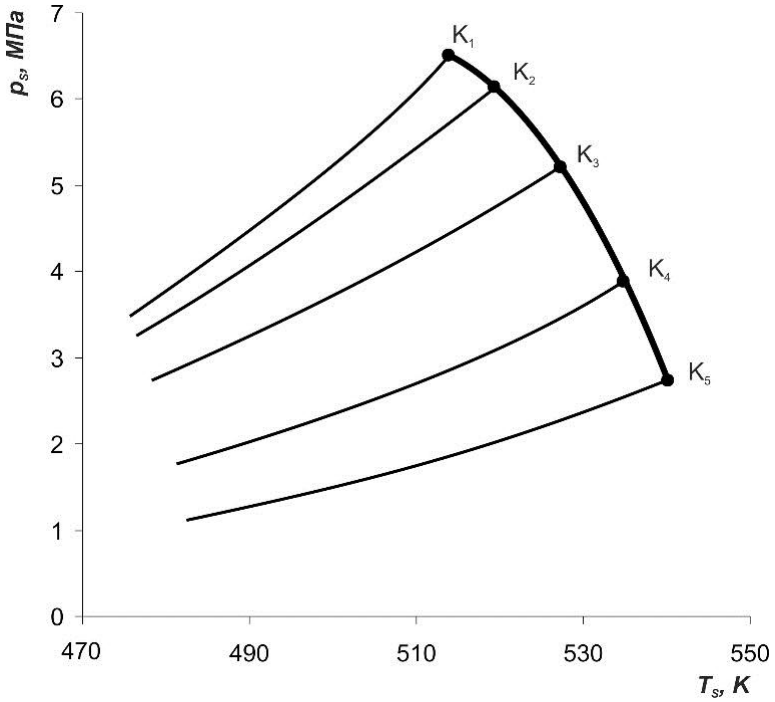


Рис. 4. Крические изохоры и критическая кривая раствора этанол–н-гептан состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0

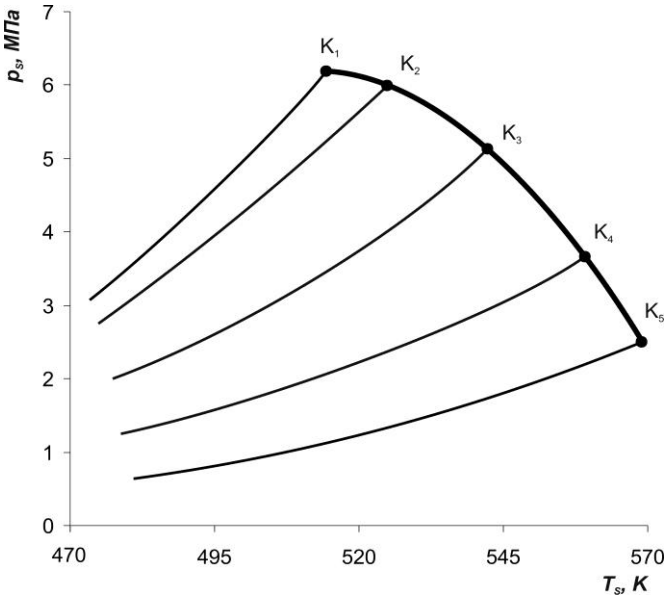


Рис. 5. Крические изохоры и критическая кривая раствора этанол–н-октан состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0

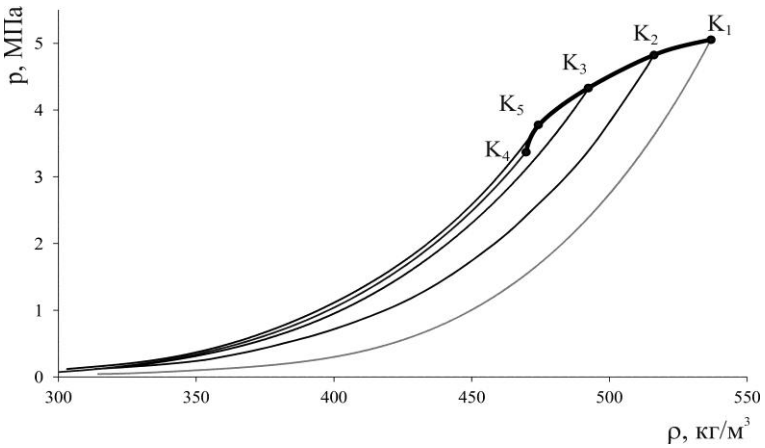


Рис. 6. Крические изохоры и критическая кривая раствора н-пропанол–н-пентан состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 1.0

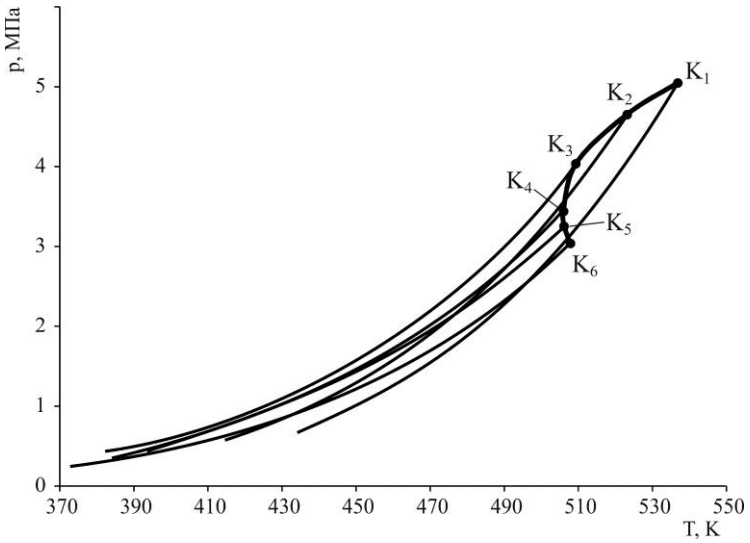


Рис. 7. Крические изохоры и критическая кривая раствора н-пропанол–н-гексан состава *x*, мол.доли: К1 – 0.0; К2 – 0.2; К3 – 0.5; К4 – 0.8; К5 – 0.9; К6 – 1.0

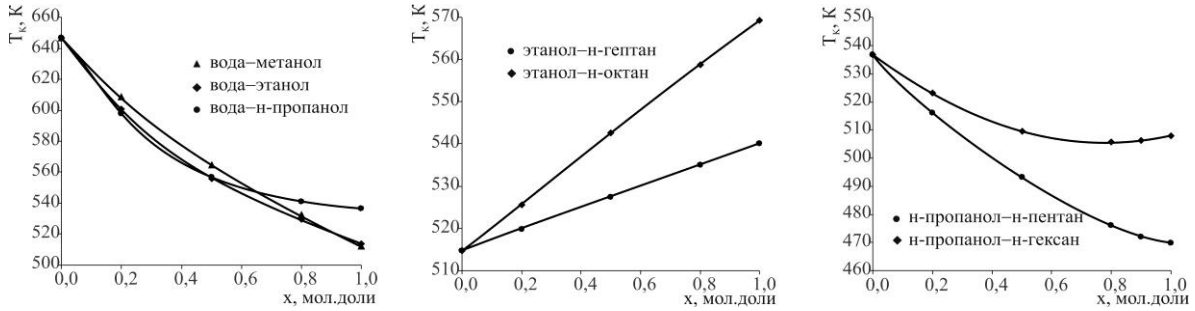


Рис.8 Зависимость значений критической температуры от состава *x* для исследованных систем

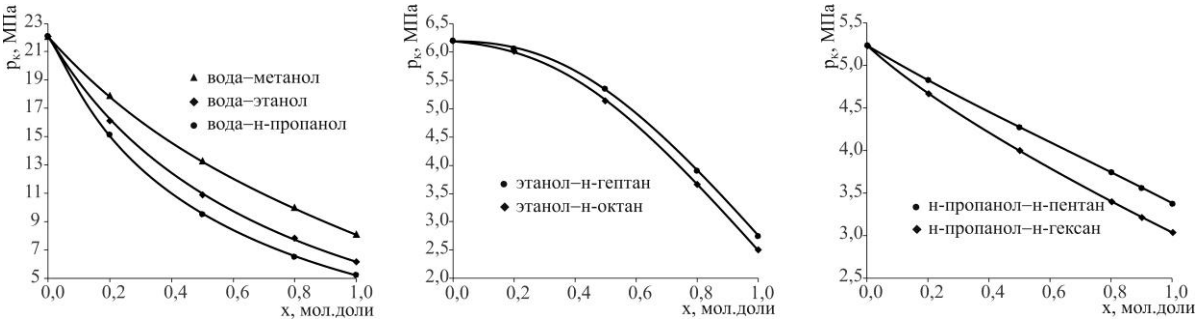


Рис.9 Зависимость значений критического давления от состава *x* для исследованных систем

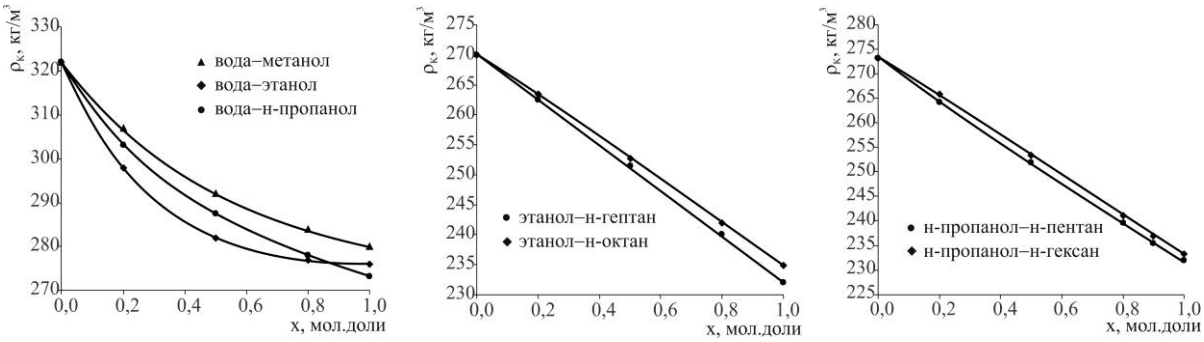


Рис.10 Зависимость значений критической плотности от состава *x* для исследованных систем

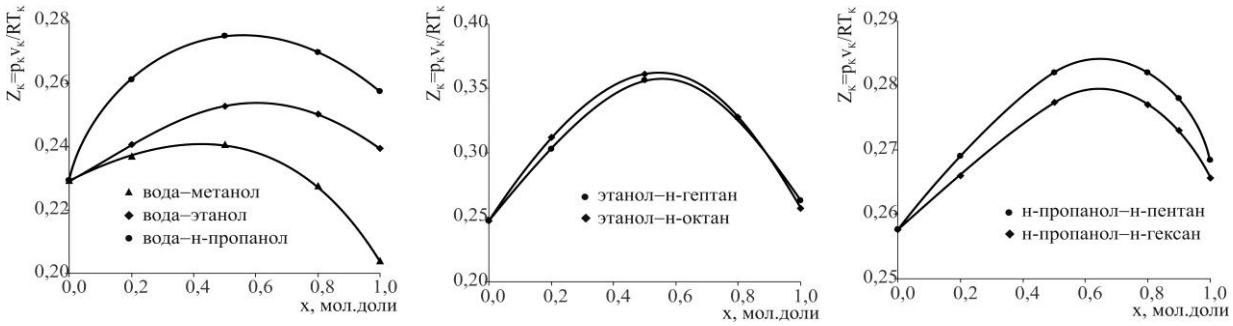


Рис.11 Зависимость значения критической сжимаемости от состава *x* для исследованных систем

Зависимость критических параметров смесей от состава описана полиномиальными выражениями с относительной погрешностью 0.05-0.1% (таблица 2).

Таблица 2

вода–метанол	**этанол–н–гептан**
$p_к = -4.9615 \cdot x^3 + 14.562 \cdot x^2 - 23.561 \cdot x + 22.065$	$T_к = -1.8678 \cdot x^2 - 36 \cdot x + 269.92$
$\rho_к = -50.496 \cdot x^3 + 133.34 \cdot x^2 - 217.34 \cdot x + 647.21$	$Z_к = -0.15 \cdot x^3 - 0.1702 \cdot x^2 + 0.3362 \cdot x + 0.2461$
$T_к = -22.667 \cdot x^3 + 68.857 \cdot x^2 - 88.15 \cdot x + 321.99$	**этанол–н–октан**
$Z_к = -0.0625 \cdot x^3 - 0.0028 \cdot x^2 + 0.0398 \cdot x + 0.2295$	$p_к = -3.1211 \cdot x^2 - 0.6363 \cdot x + 6.2249$
вода–этанол	$\rho_к = 54.801 \cdot x + 514.77$
$p_к = -13.129 \cdot x^3 + 32.672 \cdot x^2 - 35.477 \cdot x + 22.045$	$T_к = -1.2644 \cdot x^2 - 34.03 \cdot x + 270.12$
$\rho_к = -92.767 \cdot x^3 + 235.2 \cdot x^2 - 275.61 \cdot x + 647.23$	$Z_к = -0.1042 \cdot x^3 - 0.2764 \cdot x^2 + 0.3906 \cdot x + 0.2467$
$T_к = -68.5 \cdot x^3 + 171.83 \cdot x^2 - 149.29 \cdot x + 321.85$	**н–пропанол–н–пентан**
$Z_к = -0.072 \cdot x^2 + 0.0837 \cdot x + 0.2286$	$p_к = 0.1116 \cdot x^2 - 1.9607 \cdot x + 5.2251$
вода–н–пропанол	$\rho_к = 41.623 \cdot x^2 - 108.92 \cdot x + 536.69$
$p_к = -15.629 \cdot x^3 + 40.396 \cdot x^2 - 41.601 \cdot x + 22.028$	$T_к = 3.3746 \cdot x^2 - 44.691 \cdot x + 273.17$
$\rho_к = -95.287 \cdot x^3 + 282.29 \cdot x^2 - 297.25 \cdot x + 647.09$	$Z_к = -0.0733 \cdot x^3 + 0.0339 \cdot x^2 + 0.0504 \cdot x + 0.2578$
$T_к = -42.125 \cdot x^3 + 104.55 \cdot x^2 - 111.17 \cdot x + 321.86$	**н–пропанол–н–гексан**
$Z_к = 0.0856 \cdot x^3 - 0.2583 \cdot x^2 + 0.2009 \cdot x + 0.2298$	$p_к = 0.543 \cdot x^2 - 2.7201 \cdot x + 5.2167$
этанол–н–гептан	$\rho_к = 50.583 \cdot x^2 - 79.521 \cdot x + 536.89$
$p_к = -3.4101 \cdot x^2 - 0.0825 \cdot x + 6.2056$	$T_к = -0.8369 \cdot x^2 - 39.666 \cdot x + 273.43$
$\rho_к = 25.463 \cdot x + 514.66$	$Z_к = -0.0664 \cdot x^3 + 0.0371 \cdot x^2 + 0.0372 \cdot x + 0.2577$

Литература:

1. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей / Пер. с англ. под. ред. Б.И.Соколова. Л.: Химия. 1982. 592 с.
2. *Нестерова Т.Н., Нестеров И.А.* Критические температуры и давления органических соединений. Анализ состояния базы данных и развитие методов прогнозирования. -Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2009. -580 с.
3. *Назмутдинов А.Г., Алекина Е.В., Нестерова Т.Н.* Концентрационные зависимости критических температур бинарных смесей с неводными компонентами // ЖФХ. 2008. Т.82. №11. С.2068-2073.
4. *Базаев А.Р.* p,v,T,x-измерения и термодинамические свойства водных растворов углеводородов в сверхкритических условиях. Дис. … докт.тех.наук. Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН. 1997. 264 с.
5. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Джаппаров Т.А.* Исследование фазовых переходов и критических свойств бинарных смесей этанол–н-алканы // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 2. С. 242-249.
6. *Стенли. Г.* Фазовые переходы и критические явления / Г. Стенли. – М.: Мир, 1973. – 419 с.
7. *Базаев А.Р., Базаев Э.А.* Термодинамические свойства бинарных смесей технологически важных веществ в околокритическом и сверхкритическом состоянии // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2010. Т5. №3. С.15-30.
8. *Karabekova B.K., Bazaev E.A.* Equation of State for Water-Alcohol Mixtures Over a Wide Range of State Variables // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2015. Т. 89. № 9. С. 1545-1555.
9. *Bazaev E.A., Bazaev A.R.* Calculating Critical Exponents of the Phase-Equilibrium Curve for Liquid-Vapor Aqueous Solutions of Aliphatic Alcohols // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2013. Т. 87. № 6. С. 952-955.
10. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Карабекова Б.К.* Фазовые превращения (жидкость–пар) и критические свойства смеси н-пропанол–н-пентан // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 89-92.
11. *Bazaev E.A., Bazaev A.R.* Phase Transformations in Water-Aliphatic Alcohol Binary Systems // High Temperature. 2013. Т. 51. № 2. С. 224-230.

12. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Джаппаров Т.А.* Исследование фазовых переходов и критических свойств бинарных смесей этанол–н-алканы // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 1. С. 242.
13. *Bazaev E.A., Bazaev A.R., Abdurashidova A.A.* An Experimental Investigation Of The Critical State Of Aqueous Solutions Of Aliphatic Alcohols // High Temperature. 2009. Т. 47. № 2. С. 195-200.
14. *Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Dzhapparov T.A.* PVTX Measurements and Other Derived Volumetric Properties of the Binary ((1-Propanol + N-Pentane)) Mixtures in The Critical and Supercritical Regions // The Journal of Chemical Thermodynamics. 2017. Т. 109. С. 23-55.

О ЧИСЛЕННОМ ИССЛЕДОВАНИИ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ДРОБНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Бейбалаев В.Д. [1,2*], Назаралиев М.А. [1], Аливердиев А.А. [1,2], Малиева Ф.Ф. [1]

[1] *Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, пр. Шамиля, 39, Махачкала, Россия*
[2] *Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*
* *kaspij_03@mail.ru*

В работе нами поставлена и решена первая краевая задача для нелинейного уравнения теплопроводности с производными дробного порядка. Построена неявная разностная схема. Доказана устойчивость этой разностной схемы. Проведен вычислительный эксперимент по анализу полученных результатов.

Изучение нелинейных математических моделей, различных физико-химических процессов, описывающих уравнением теплопроводности с дробными производными, на данном этапе развития науки является одним из актуальных направлений современной математической физики, имеющим множество приложений, в том числе связанных с исследованием и использованием геотермальных ресурсов.

Учет основных законов сохранения при разработке математических моделей различных физических процессов часто приводит к нелинейным уравнениям параболического типа. Его универсальный характер дает основание утверждать, что изучение краевых задач для нелинейного уравнения теплопроводности остается до настоящего времени актуальной темой исследования. Особенно это актуально, когда речь идет о системах с памятью и пространственными корреляциями. Переход от обычных производных к дробным производным позволяют учитывать эффекты памяти и пространственные корреляции. Поэтому при разработке математических моделей в таких системах используют нелинейное уравнение теплопроводности с производными дробного порядка. [1-12]

Рассмотрим в области $D = \{(x,t) : 0 < x < 1, 0 < t < T\}$ первую краевую задачу для нелинейного уравнения теплопроводности с производными дробного порядка.

Задача. Найти решение уравнения

$$\rho \cdot c \cdot \partial_{0t}^{\alpha} T(x,t) = D_{x+}^{\beta}\left(k(T) D_{x+}^{\gamma} T(x,t)\right) + f(T), \qquad (1)$$

удовлетворяющее начальному условию $T(x,0) = \varphi(x)$ и граничным условиям

$$T(0,t) = \mu_1(t) \text{ и } T(1,t) = \mu_2(t). \qquad (2)$$

Здесь $\partial_{0t}^{\alpha}T(x,t)=\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\int_0^t\frac{T_t'(x,s)}{(t-s)^{\alpha}}ds$ - частная дробная производная Caputo [1], $D_{x+}^{\alpha}T(x,t)=\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{d}{dx}\int_0^x\frac{T(s,x)}{(x-s)^{\alpha}}ds$ - дробная производная Римана-Лиувилля, $0<\alpha<1$, $0<\beta<1,\ 0<\gamma<1$ $k(T), f(T)$ - достаточно гладкие функции и $0<c_1\le k(T)\le c_2$.

Рассмотрим случай, когда $\beta=\gamma=1$, то есть уравнение вида:

$$\rho\cdot c\cdot\partial_{0t}^{\alpha}T(x,t)=\frac{\partial}{\partial x}\left(k(T)\frac{\partial}{\partial x}T(x,t)\right)+f(T), \tag{3}$$

Воспользовавшись аппроксимацией дробной производной [12], для задачи (3), запишем разностную схему

$$\rho\cdot c\cdot\frac{1}{\Gamma(2-\alpha)}\sum_{i=0}^{n}\frac{y_m^{i+1}-y_m^i}{\tau}\left(t_{n-i+1}^{1-\alpha}-t_{n-i}^{1-\alpha}\right)= =.\frac{1}{h}\left(k_{m+1/2}^n\frac{y_{m+1}^{n+1}-y_m^{n+1}}{h}-k_{m-1/2}^n\frac{y_m^{n+1}-y_{m-1}^{n+1}}{h}\right)+f\left(y_m^n\right) \tag{4}$$

$T_m^0=\varphi(x_m),\ T_0^n=\mu_1(t_n),\ T_M^n=\mu_2(t_n)$

Полученную разностную схему можно свести к наиболее общему виду:

$$A_m\cdot y_{m+1}^{n+1}-B_m\cdot y_m^{n+1}+C_m y_{m-1}^{n+1}=F_m \tag{5}$$

где $A_m=\frac{k_{m+1/2}^n}{h^2}, C_m=\frac{k_{m-1/2}^n}{h^2}, B_m=\frac{k_{m+1/2}^n+k_{m-1/2}^n}{h^2}+\frac{\rho c(t_1^{1-\alpha}-t_0^{1-\alpha})}{\Gamma(2-\alpha)\cdot\tau}$,

$k_{m+1/2}=\frac{k(y_m)+k(y_{m+1})}{2}$, $k_{m-1/2}=\frac{k(y_{m-1})+k(y_m)}{2}$,

$$F_m=-\rho\cdot c\cdot\frac{1}{\Gamma(2-\alpha)\tau}\left(y_m^n\left(t_1^{1-\alpha}-t_0^{1-\alpha}\right)-\sum_{i=0}^{n-1}\frac{y_m^{i+1}-y_m^i}{\tau}\left(t_{n-i+1}^{1-\alpha}-t_{n-i}^{1-\alpha}\right)\right)-$$

$$-f(y_m^n)$$

Неявная разностная схема (4) безусловна устойчива.

Разностная задача (4) решена методом прогонки. Достаточные условия метода прогонки в данном случае выполняются.

Вывод. При переходе к дробным производным при уменьшении параметра α процесс теплопереноса замедляется, что характерно средам с фрактальной структурой.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-08-00067а.

Литература:

1. *Нахушев А.М.* Элементы дробного исчисления и их применение. Нальчик,2003, 299с.
2. *Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А.* Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик аргона // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, **32,** No. 1, 2017, 6-11.
3. *Magomedov R.A., Meilanov R.P., Akhmedov E.N., and Aliverdiev A.A.* Calculation of multicomponent compound properties using generalization of thermodynamics in derivatives of fractional order, Journal of Physics: Conference Series, **774**, 2016, 012025.
4. *Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Magomedov R.A. Ragimkhanov G.B., Aliverdiev A.A.* To the theory of non-local non-isothermal filtration in porous medium // Journal of Physics: Conference Series, 2017 (принято к публ.)
5. *Магомедов Р.А., Ахмедов Э.Н., Мейланов Р.Р., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А.* Определение теплофизических свойств одноатомных газов // В сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Магомедову М-К.М. Дагестанский государственный технический университет, 2016, 156-158.
6. *Назаралиев М.-Ш.А., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., Ахмедов Э.Н., Мейланов Р.Р., Магомедов Р.А.* Численное решение краевой задачи для системы уравнений нелокальной неизотермической фильтрации // В книге: Актуальные проблемы прикладной математики и информатики. Материалы тезисов, 2016, 218-221.
7. *Аливердиев А.А., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Магомедов Р.А., Мейланов Р.П., Мейланов Р.Р.* К анализу термодинамических характеристик на основе фрактального уравнения состояния // В книге: Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование, Тезисы докладов XIII Международной научной конференции, 2016, 47-48.
8. *Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А., Ахмедов Э.Н., Мейланов Р.Р., Магомедов Р.А.* Численное исследование процессов теплообмена во фрактальных средах за счет конвекции и излучения на границе // В сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Магомедову М-К.М., Дагестанский государственный технический университет, 2016, 67-71.
9. *Бейбалаев В.Д.* Численный метод решения математической модели теплопереноса в средах с фрактальной структурой// Фундаментальные исследования. Москва. 2007, №12, 249-251
10. *Бейбалаев В.Д.* Численный метод решения задачи переноса с двусторонней производной дробного порядка // Вестник Самарского гос. тех. ун-та. Серия физ.-мат. науки, 2009, **1**(18), 267-270.
11. *Бейбалаев В.Д.* Математическая модель переноса в средах с фрактальной структурой // Математическое моделирование? Москва, 2009, **21**, № 5, 55-62
12. *Бейбалаев В.Д., Абдулаев И.А., Наврузова К.А., Гаджиева Т.Ю.* О разностных методах решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения с операторам дробного дифференцирования.// Вестник ДГУ. Вып. 6, 2014, 53-61.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА СВОЙСТВА ФЛЮИДА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С НЕЙ

[1,2]Гусейнов Г.Г.

[1] *ФГБУН Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН;*
Махачкала, Россия; 367003, ул. М.Ярагского, 94; e-mail: guseinovgg@mail.ru
[2] *ФГБОУ ВО Дагестанский государственный технический университет;*
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 70; e-mail: guseinovgg@mail.ru

В работе проведен анализ экспериментальных исследований, проведенных нами и имеющихся в литературе работ по исследованию влияния поверхностной энергии твердого тела на свойства вещества в объеме и в пористой среде. Показано, что свойства жидкостей и смесей у поверхности и в пористой среде отличаются от их объёмных свойств: на примере коэффициента расширения, плотности, показателе преломления, вязкости, теплоемкости, температуры плавления, теплопроводности.

Пристального внимания заслуживают исследования фазового поведения вещества находящегося не только в свободном объеме, но и на поверхности твердого тела, а также, помещенного в пористую среду.

Такого рода исследования поверхностных эффектов интересуют как фундаментальную науку, так и в плане практического применения, например для извлечения остаточной нефти из пластов.

Интерес связан, с тем, что поверхностная энергия твердого тела может оказать существенное влияние на поведение свойств вещества, как на поверхности твердого тела, так и внутри пор.

Особый интерес, на наш взгляд, представляют исследования структурных особенностей граничных слоев жидкостей.

Одним из бесспорных доказательств структурных особенностей граничных слоев могут служить измерения вязкости тонких пленок, выполненных Дерягиным Б.В. и др. [1]. Структурными особенностями тонких жидких прослоек является и увеличение плотности, обнаруженные в работе [2] путем исследования термического расширения воды в порах силикагеля и SiO_2 в интервале 0 – 90° С.

Было обнаружено, что температурное расширения воды в порах порядка 5 нм при температурах выше 70° С неотличимо от расширения объемной воды; при более низких температурах расширение поровой воды все более отличается от объемного.

Структурные особенности нитробензола на подложках из стекла и кварца калориметрическим методом исследовали в работе [3]. Замечено, что удельная теплоемкость слоев нитробензола толщиной до 60 нм понижена по сравнению с объемным значением на 7 – 8%. При этом, удалось определить зависимость от температуры толщины граничной фазы нитробензола и теплоту перехода граничной фазы в объемную. Фазовый переход происходит не при одной температуре, а совершается постепенно, по мере утоньшения граничной фазы при подъеме температуры. Оптические исследования граничных фаз нитробензола на поверхности стекла, проведенные в [4] показывают, что, по-видимому, жидкая фаза трансформируется в жидкокристаллическую.

В работе [5] применяя метод предельного угла для измерения показателя преломления для сосуществующих фаз в бинарной жидкой смеси с ограниченной растворимостью метанол-н-гептан показано образование новых поверхностных фаз и новых поверхностных переходов.

Обнаружено, что нижняя фаза системы метанол-н-гептан при температуре T_w = 44,3 ºС образует смачивающий слой, вторгающийся между нижней фазой и поверхностью стекла.

Для исследования жидкостей и жидких смесей с успехом применяются оптических методы: эллипсометрия, рефрактометрия, метод предельного угла преломления и т.д.

Так в работе [6] измеряя показатель преломления сосуществующих фаз методом рефрактометрии, в двух расслаивающихся жидких бинарных системах: перфтордекалин-гептан и уксусный ангидрид-пентан в окрестности критической температуры смещения наблюдали явление критической адсорбции.

Критическая адсорбция связывается с влиянием поверхности на свойства компонентов жидкой бинарной смеси.

Исследование фазовых переходов льда в пористой среде проведено в работе [7]. На рис.1 приведен график зависимости температуры плавления (T_m,°C) льда от радиуса пор. Видно, что с уменьшением размера пор, температура плавления льда (фазовый переход), находящаяся внутри пор понижается рис.1.

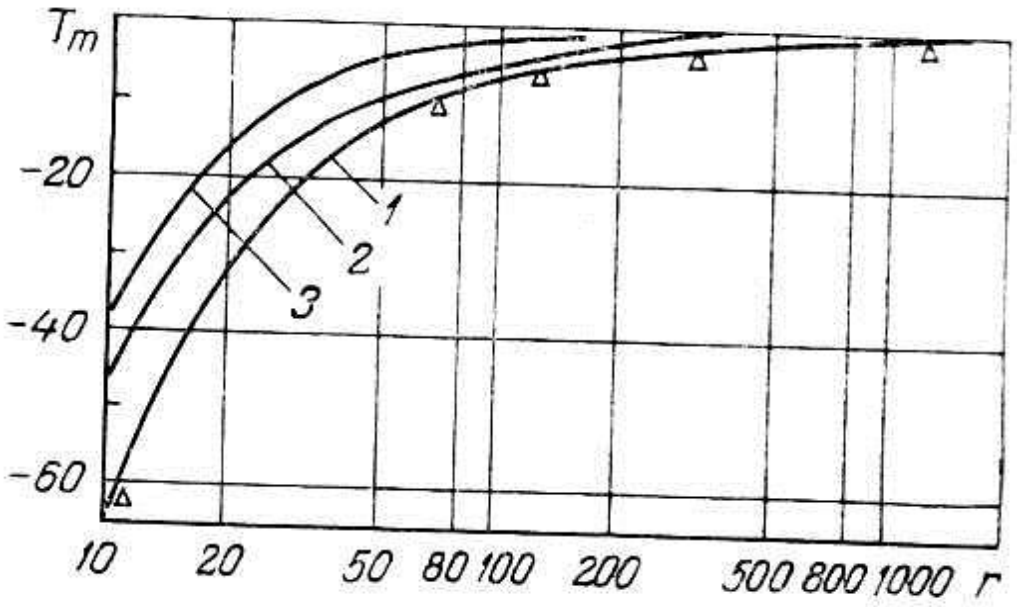


Рис.1. Зависимость температуры плавления (T_m,° C) льда от радиуса пор (r, A): 1,2 - расчет; 3 - и точки, данные эксперимента [7].

Влияние пористой среды на фазовое равновесие исследовано в [8].

Исследованиями показано, что теплоемкость льда в окрестности точки плавления в объеме и в пористой среде с характерным размером частиц 20 нм сильно отличается (рис. 2). Это означает, что плавление льда начнется более чем на 20°C раньше, чем при нулевой температуре, как это следует из замеров в объеме. Данный вывод означает, что при расчете растепления скважин в многолетне мерзлых породах надо ориентироваться не на нуль, а на -20°C.

Приведенный пример это проявление фазового перехода первого рода – плавления льда в пористой среде.

Эффективность извлечения нефти из нефтеносных пластов современными, промышленно освоенными методами разработки во всех нефтедобывающих странах считается неудовлетворительной.

Поэтому, актуально использование новых технологий для нефтеизвлечения. Основная идея заключается в использовании фазовых переходов для увеличения нефтеотдачи пластов. Фазовые диаграммы дают представление о физических свойствах и составах равновесных фаз чистых веществ и их смесей при различных значениях давления и температуры в системах природных углеводородов.

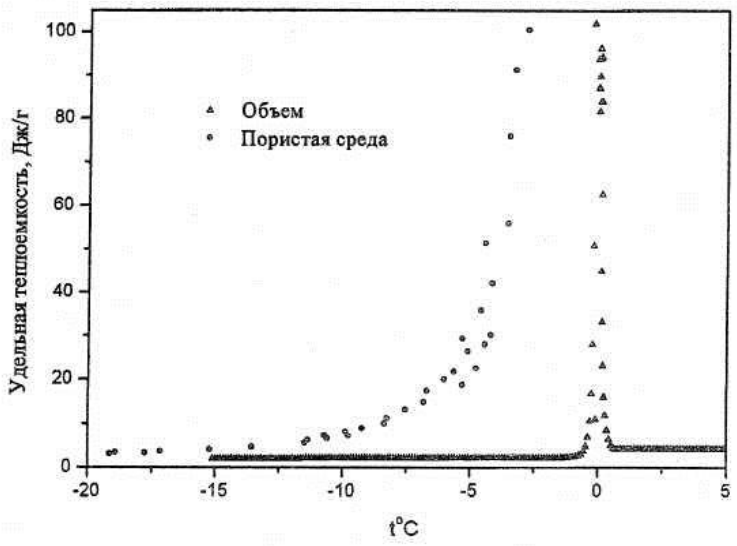


Рис. 2. Удельная теплоемкость льда в окрестности точки плавления в объеме (Δ) и в пористой среде с характерным размером частиц 20 нм (•).

Основной причиной низкой нефтеотдачи пласта (до 75% остаточная нефть), связано с молекулярным взаимодействием нефти с поверхностью горной породы – со стенками пор. Не знание механизмов этих взаимодействий и связано с низкой нефтеотдачей пластов. Более того, процесс фильтрации флюида ассоциируется с фазовым поведением ее в пористой среде таким же, как и в свободном объеме.

В последнее время, в связи с проблемами извлечения остаточной нефти из горных пород, с применением новых технологий, возникла потребность в изучении физико-химических свойств углеводородов (УВ) в пористых средах.

Экспериментальные исследования фазовых переходов УВ смеси в пористой среде были проведены в работе [9], и сравнены с ее поведением в свободном объеме – рис 3.

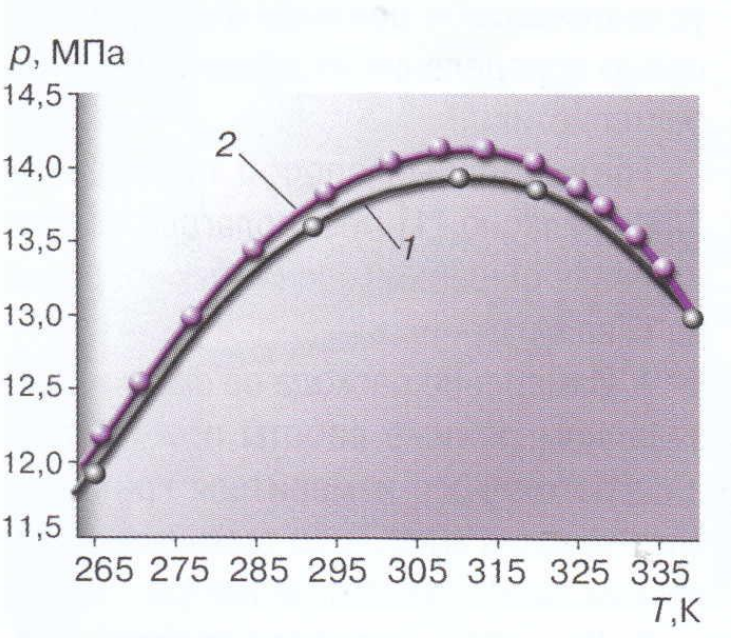


Рис.3. Фазовая диаграмма УВ: 1 –в пористой среде (кварцевый песок); 2 –в свободном объеме [9].

Результаты исследования показали, что кривая фазового равновесия углеводородной смеси в пористой среде, находится выше, и отличается от ее поведения в свободном объеме – рис.3.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что свойства жидких и газообразных УВ в пористой среде отличаются от их объёмных свойств. Фазовое состояние и фазовое поведение флюидов в значительной степени предопределяет характер фильтрации углеводородов в продуктивных коллекторах и, в конечном счёте, эффективность извлечения углеводородов из залежи.

Поэтому экспериментальное исследование закономерностей фазовых превращений в свободном объёме и в пористых средах является актуальной задачей в процессе всего периода разработки месторождения.

В литературе имеются данные по изучению влияние поверхности на различные свойства вещества.

Мецик М.С и др. [10] наблюдали структурно-упорядоченные граничные пленки воды между листочками слюды методом теплопроводности рис.4.

Выяснено, что пленка воды толщиной в десятые доли микрона на поверхности слюды обладают аномально высокой теплопроводностью. Авторы работы видят в этом следствие структурного совершенства воды, за счет влияния поверхностного поля поверхности – слюды.

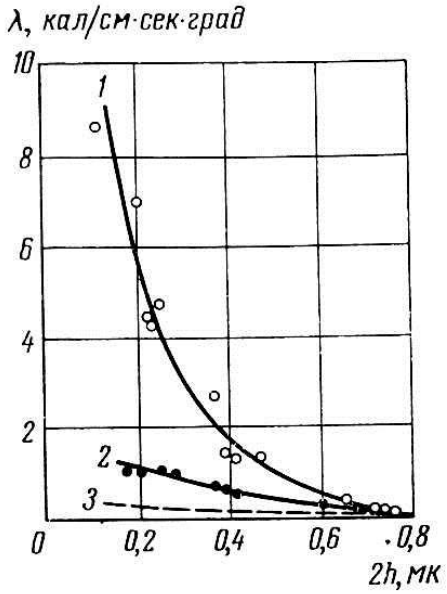


Рис. 4. Зависимость теплопроводности жидких пленок λ между кристаллами слюды от толщины пленок 2h: 1 – для пленок воды без какой-либо обработки кристаллов после расщепления; 2 – для пленок воды после обработки слюды в кипящей воде; 3 – для пленок глицерина [10].

Но, фазовые переходы бывают и второго рода.

Интересные результаты получены в работе [11]. Исследовалось поведение теплоемкости в окрестности критической точки смещения в бинарной смеси в ограниченном объеме, в пористом стекле, с размером пор 100нм.

Выяснено, что в смеси 2,6-лутидин-вода, а также в чистом 2,6-лутидине, помещенном в пористое стекло, обнаружен провал в поведении теплоемкости рис. 5.

Такое поведение флюида, авторы работы интерпретируют как фазовый переход в поверхностном слое.

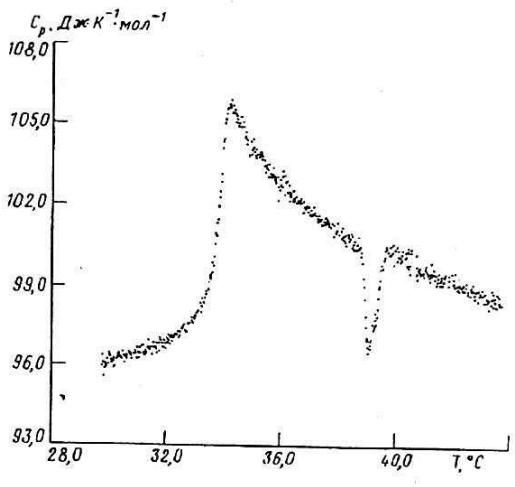


Рис. 5. Теплоемкость смеси 2,6 – лутидин-вода в пористом стекле: d = 1000А, Sуд = 20 м^2 / см^3; x = 0,323мол.дол. лутидина [11].

В работе [12] экспериментально исследована теплопроводность пористого стекла, насыщенного диоксидом углерода (CO_2) – рисунок 5, в широкой окрестности критической точки жидкость-газ для CO_2 – область фазового перехода второго рода - рис. 6.

Пористые стекла имеют очень развитую удельную поверхность, сложную геометрия порового пространства и флюида.

Измерения теплопроводности проведены абсолютным стационарным методом плоского горизонтального слоя, на многократно проверенных устройствах [13,14].

Анализ рис.6. показывает, что в этой области наблюдается аномалия - максимум теплопроводности пористого стекла, насыщенного CO_2.

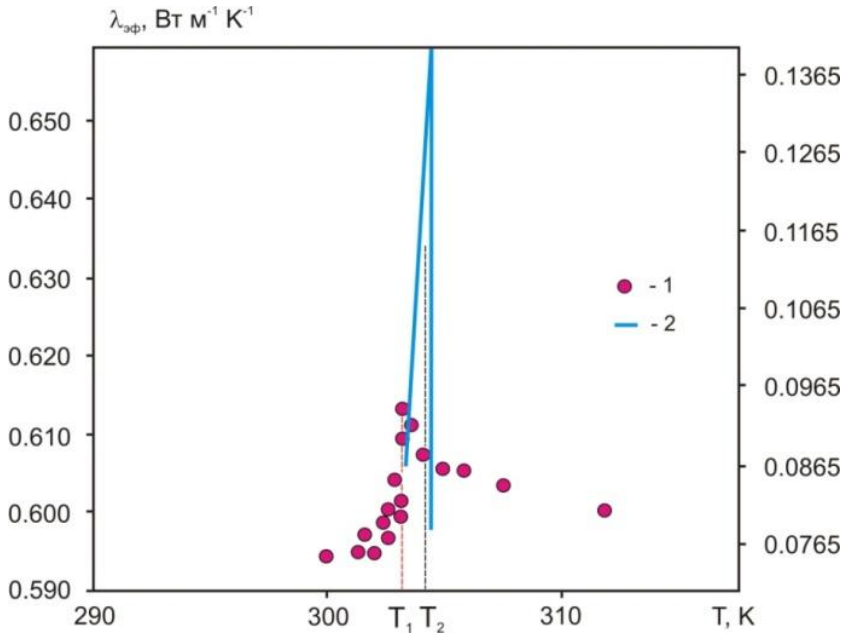


Рис. 6. Зависимость эффективной теплопроводности ($\lambda_{эф}$) от температуры *(T, K)* в окрестности критической точки ($T_к$):
1 - пористое стекло, насыщенная CO_2 (точки, слева) – [8];
2 – теплопроводность диоксида углерода в свободном состоянии (линия, справа), по данным [15,16]

На рис.6 показано смещение температуры максимума теплопроводности для пористого стекла, насыщенного CO_2 в окрестности фазового перехода 2 - го рода (критическая точка жидкость-газ), уменьшение амплитуды теплопроводности CO_2 и растянутость перехода по температуре в области фазового перехода CO_2 в пористой среде, по сравнению с фазовым переходом для свободного CO_2.

Это обусловлено взаимодействием флюида с поверхностью пористой среды и зависит как от состава флюида, так и от свойств поверхности.

Приведенные выше исследования показывают, что поверхностная энергия твердого тела, оказывает существенное влияние на свойства флюида, контактирующего с ней, а также, изменяют параметры фазовых переходов.

Литература:

1. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. М.: Изд. Наука. 1985. 399с.
2. *Derjaguin B.V., Karasev V.V., Khromova E.N.* Thermal Expansion of H_2O and D_2O in small pores. Research in Surface forces, 1971, vol. 3, p. 25-36.
3. *Поповский Ю.М., Дерягин Б.В.* Теплоемкость жидкости в дисперсных системах. Докл. АН СССР, 1964, т.159, № 4, с. 897.
4. *Дерягин Б.В, Поповский Ю.М., Силенко Г.П.* Определение двойного лучепреломления и равновесной толщины граничной фазы нитробензола. Докл. АН СССР, 1978, т.239, № 4, с. 828-905.
5. *Ильина С.Г., Ионова Э.А. Павлыгина О.Г.* Фазовые переходы смачивания и предсмачивания в бинарной системе метанол-гептан // Вестн. Моск. Ун-та. Физ Астрон. 1999. №4. С.23-32.
6. *Ильина С.Г., Габышев А.Н.* Критическая адсорбция в бинарных жидких системах // Вестн. Моск. Ун-та. Физ Астрон. 2012. №1. С.83-86
7. *Вензель Б.И., Егоров Е.А., Жиженков В.В., Клейнер В.Д.* Определение температуры плавления льда в пористом стекле в зависимости от размеров пор // ИФЖ. 1985, 48, 3, 461-466.
8. *Морохов И.Д., Лаповок Л.И.* Физические явления в ультрадисперсных средах. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224с.
9. *Булейко В.М. (ВНИИГАЗ)* Исследование фазового поведения углеводородных флюидов в пористых средах // Газовая промышленность. 2005, №11, с.60-64.
10. *Мецик М.С., Тимощенко Г.Т.* Новые данные о теплопроводности тонких пленок воды // Сб. докладов 3 конференции по поверхностным силам. Исследования в области поверхностных сил. М.: Изд. Наука. 1967. С.47-48.
11. *Булейко В.М., Воронов В.П., Ентов Л.В., Рамазанов А.Р.* Необычное поведение теплоемкости 2,6-лутидина в пористой среде: ориентационный переход в слое? // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т.61, Вып.1. С.34-37.
12. *Гусейнов Г.Г.* Особенности поведения теплопроводности диоксида углерода в пористом стекле в широкой окрестности критической точки. // Вестник Казанского технологического университета, 2014, т.17, №23, с.125-131.
13. *Guseinov G.G., Abdulagatov I.M.* Thermal-Conductivity Measurements of Aqueous Orthophosphoric Acid Solutions in the Temperature Range from (293-400) K and at Pressures up to 15 MPa. / Int. J. Thermophys. (2014), v.35, N.2, 35:218-245.
14. *Гусейнов Г.Г.* Устройство для измерения теплопроводности. // Вестник Казанского технологического университета, 2014, т.17, №23, с.299-305.
15. *Guildner L.A.* Thermal conductivity of gases. II. Thermal conductivity of carbon dioxide near the critical point. // J. Res. NBS, 1962, v.66A, N.4, p.304-347.
16. *Michels A, Sengers J.V., Van der Gulik P.S.* The Thermal Conductivity of Carbon Dioxide in the Critical Region // Physica, 1962, v.28, N12, p.1201 – 1215.

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ, НАСЫЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОМ

[1,2]Гусейнов Г.Г.

[1] *ФГБУН Институт физики им. Х.И. Амирханова ДНЦ РАН;*
Махачкала, Россия; 367003, ул. М.Ярагского, 94; e-mail: guseinovgg@mail.ru
[2] *ФГБОУ ВО Дагестанский государственный технический университет;*
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 70; e-mail: guseinovgg@mail.ru

Экспериментально исследована эффективная теплопроводность пористого стекла, насыщенного н-гептаном (C_7H_{16}) и нефтью в интервале температур 290-400K и давлениях до 10МПа.
Выявлены механизмы передачи тепла, изучалось влияние температуры и давления, оценивалась роль C_7H_{16} и нефти, находящихся внутри пор, на поведение эффективной теплопроводности пористых стекол.

В настоящее время в различных отраслях науки и техники широкое применение находят пористые материалы, насыщенные жидкостью или газом.

Одной из важных задач при их изучении является исследование их теплофизических свойств, в частности, коэффициента теплопроводности (λ).

Пористые материалы, насыщенные жидкостью или газом, являются сложными объектами.

Исследования λ в пористых материалах необходимы для моделирования и построения физической картины механизмов теплопередачи в неоднородных средах, и возможностей применения результатов исследований в народном хозяйстве.

Пористые среды, насыщенные флюидами недостаточно экспериментально изучены в широкой области параметров состояния [1-4].

Хотя на сегодняшний день и имеется в литературе теоретические разработки и формулы, по которым можно рассчитать эффективную теплопроводность ($\lambda_{эфф}$) пористых сред насыщенных жидкостью или газом, остается актуальной задача их экспериментального исследования, т.к. они дают более конкретные и точные значения теплопроводности.

Работа была проведена с целью изучения поведения эффективной теплопроводности пористого стекла, насыщенного н-гептаном (C_7H_{16}) и нефтью в широкой области параметров состояния.

В качестве объектов исследования были выбраны пористые спеченные материалы из стекла, имеющие твердый каркас и взаимопроникающие поры, которые являются модельными объектами исследования - они однородны и могут быть использованы как модели различных гетерогенных сред.

Пористые стекла имели плоский вид, определенный диаметр и толщину.

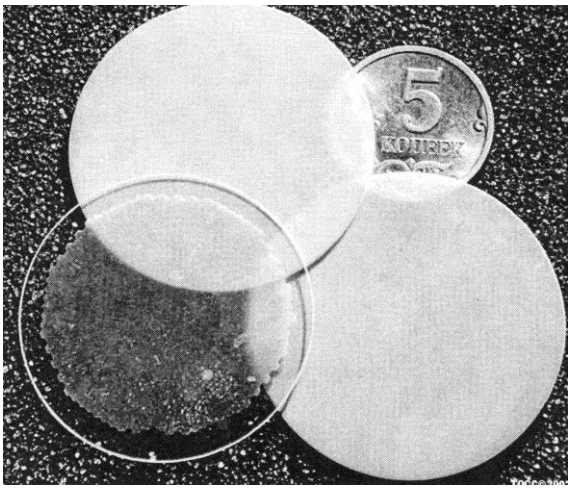
В работе использованы пористые стекла, изготовленные из: химически стойкого стекла ХС3 которые имели среднюю пористость 40%, средний размер пор $16\cdot10^{-6}$м., диаметр $42\cdot10^{-3}$ м., толщину $3055\cdot10^{-6}$ м.

Стекло ХС-3 имел следующий состав: SiO_2-71,5%, Na_2O-14,5%, CaO-6,5%, MgO-2,5%; Al_2O_3-2,5% B_2O_3-2%; K_2O-0,5%.

Другими объектами исследования были выбраны: н-гептан (C_7H_{16}), теплопроводность которого достаточно хорошо изучена в широкой области параметров состояния [5] и нефть.

Для получения достоверных экспериментальных данных, измерения теплопроводности проведены абсолютным стационарным методом плоского горизонтального слоя.

Разработанные нами, и многократно проверенные высокоточные устройства [6,7], позволяют получать данные, с погрешностью, не превышающей 1,2%.



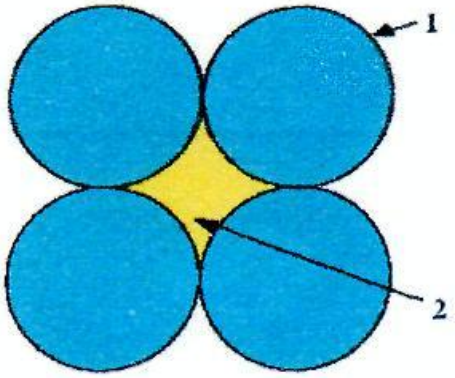


Рис. 1. Пористый образец с сообщающими порами: а) вид образца, б) образец с указанием составляющих: 1 – зерно стекло; 2 – флюид в межзеренном пространстве; 3 – пористое стекло.

Коэффициент теплопроводности оценивается по закону Фурье по формуле для стационарного метода плоского горизонтального слоя [8,9]:

$$\lambda = P \cdot L \, S^{-1} \, \Delta T^{-1} \quad (1)$$

где: λ - коэффициент теплопроводности [$Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$];

P - мощность внутреннего нагревателя, прошедшая через образец [Вт];

L - толщина образца [м];

S - эффективная рабочая поверхность прибора [$м^2$];

Δ T - перепад температуры на образце [К].

Методика измерения теплопроводности подробно описана в работах [8,9].

Измерение теплопроводности проводили по изобарам при фиксированной температуре, с изменением давления.

Приводятся результаты экспериментального исследования $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2, в интервале температур 290-370К и давлениях 0.1-10МПа – рис.2.

Из графика (см. рис.2) видно, что с увеличением температуры $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2, растет. Кроме того, она растет и с увеличением давления от 0.1МПа до 10МПа.

Рост $\lambda_{эфф}$ в зависимости от температуры, для пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2, соответственно: 11,03% и 10,08%. Кроме того, в одном и том же образце, и при одних и тех же параметрах, $\lambda_{эфф}$ в насыщенных C_7H_{16} образцах больше, чем в образцах с CO_2 (см. рис.2). В интервале температур 290-370К оно достигается 15,27%, в то время, как разница между теплопроводностью C_7H_{16} и CO_2 в свободном состоянии, при тех же параметрах, составляет 46-244%.

Из рис.1. видно, что рост $\lambda_{эфф}$ происходит почти по линейному закону.

Это соответствует утверждению Киттеля [10], о том, что в аморфных материалах при комнатных и более высоких температурах теплопроводность определяется соотношением:

$$\lambda = const \cdot T \quad (2)$$

Пористые стекла, насыщенные флюидом представляют систему, состоящую из многих фаз – (твердое тело, жидкость и газ) [11].

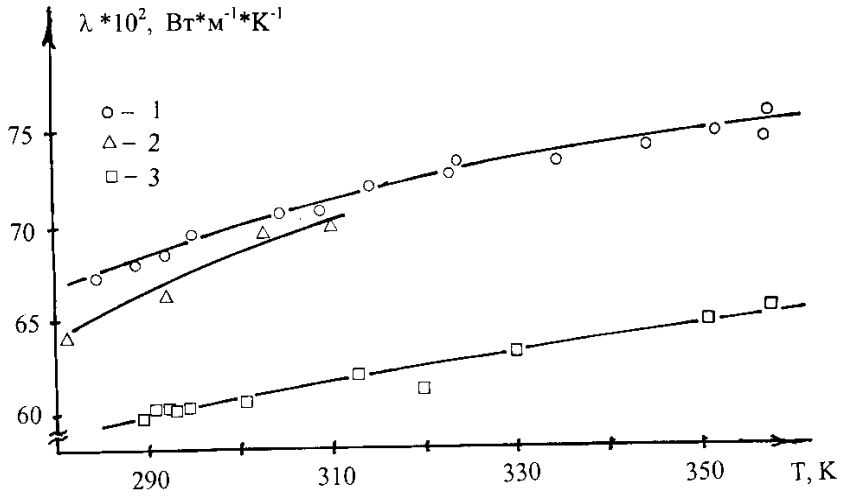


Рис. 2. Зависимость эффективной теплопроводности пористого стекла от температуры: 1,2,3 – соответственно: $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} при давлении 10МПа, 0.1МПа, и CO_2, при давлении 10МПа.

В пористом стекле, насыщенном диоксидом углерода, тепло передается через скелет каркас (зерно), контактные пятна, молекулами газа или жидкостью, и излучением:

$$Q = Q_{кондук} + Q_{конвек} + Q_{рад}. \quad (3)$$

где $Q_{конд.}$, $Q_{конв.}$, $Q_{рад.}$, соответственно, кондуктивная, конвективная и радиационная составляющие передачи тепла.

Радиационная составляющая теплопроводности оценена по формуле [1]:

$$\lambda = 2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \sigma \cdot T^3 \cdot h \quad (4)$$

Она мала - $3*10^{-5}$% от $\lambda_{эфф}$ для пористого стекла, и $\approx 7*10^{-6}$% от величины теплопроводности кварцевого стекла, и ею можно пренебречь.

Передачу тепла конвекцией не учитывали из-за ограниченного размера пор и микрозазоров на стыке частиц, что препятствует возникновению конвекции.

Передача тепла в пористом стекле, насыщенном C_7H_{16}, в основном, осуществляется теплопроводностью основы-скелета пористого материала (аморфное вещество), где имеет место фононный механизм передачи тепла.

Факт того, что $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16}, меньше λ стекла матрицы, можно объяснить возникновением теплового сопротивления, искривлением линий теплового потока и их стягиванием к микропятнам касания зерен - механизм рассеяния фононов на неоднородностях.

Полученные экспериментальные результаты по теплопроводности пористых стекол могут внести определенный вклад в деле более точного выявления механизмов передачи тепла теплопроводностью в стеклах, в исследованном интервале температур.

Экспериментально исследована эффективная теплопроводность пористого стекла, насыщенная нефтью в интервале температур 295-400К и давлении 10МПа.

Образцами являлись: пористое стекло с размером пор 16мкм, пористостью 40%; нефть с месторождения “Русский Хутор” Южно-Сухокумск, скважина № 59 (глубина 4,5км), РД.

Исследования показывают, что **λ** пористого стекла, насыщенная нефтью с повышением температуры растет во всем исследованном интервале температур, напоминает ход – поведение **λ** теплопроводности стекла, и подчиняется закону Киттеля: **$\lambda = f(T)$,** что свойственно для поведения теплопроводности аморфных тел – стекла.

Кроме того, сравнение показывает, что $\lambda_{эфф}$ для пористого стекла, насыщенного нефтью - рис.3, больше, чем насыщенного чистым углеводородом н-гептаном.

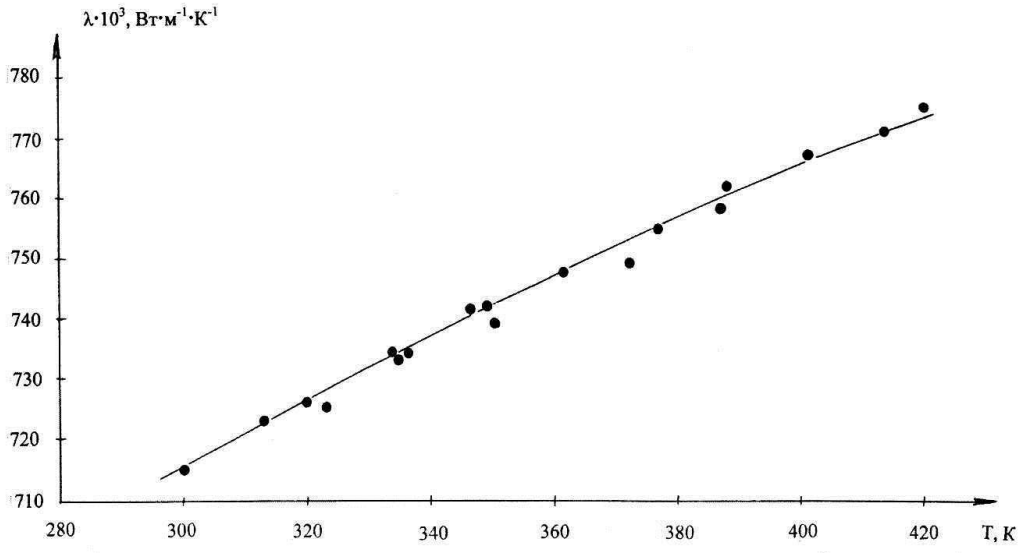


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности ($\lambda_{эфф}$, Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$) пористого стекла (со средним размером пор 16·10^{-6} м.), насыщенного нефтью от температуры (Т, К) при давлении 10 МПа.

Пористыми материалами являются и горные породы.

Теплопроводность реальных горных пород – коллекторов, зависит от состава пород, пористости, и насыщенности их флюидами и изменяется от долей единиц до 3 – 4 Вт/(м*К), а насыщенных водой горных пород изменяется от 4 до 7,4 Вт/(м*К) [12].

Теплопроводность может быть определена и методом естественного теплового поля Земли [13].

Определение теплопроводности основано на зависимости геотермического градиента от теплопроводности горных пород:

$$Г = q / \lambda, \quad (5)$$

где Г – геотермический градиент – изменение температуры пород с глубиной (количество градусов Цельсия при углублении на 100м); q – плотность теплового потока; λ - теплопроводность.

Геотермический градиент определяется по термокаротажной диаграмме (геотермограмме), снятой в скважине с помощью электротермометров и каротажной регистрирующей аппаратуры.

Геотермограмма характеризует изменение температуры в скважине с глубиной и представляется в виде ломаной линии, тангенс угла наклона участков которой определяет геотермический градиент на соответствующей глубине [12,13]:

$$Г = tg\ \alpha \quad (6)$$

Для определения геотермического градиента с термограммы снимается значения температур и глубин; вычисления ведутся по изменению температур на 100м

$$Г_{100} = 100\ (t_2 - t_1) / (H_2 - H_1), \quad (7)$$

где: t_2 и H_2 - температура и глубина окончания прямолинейного участка

диаграммы; t_1 и H_1 -температура и глубина начала прямолинейного участка диаграммы.

Проведенные исследования показывают, что передача тепла в пористых - гетерогенных материалах, в основном, осуществляется по скелету – матрице, и только его часть передается по флюиду, находящемуся в межпоровом пространстве.

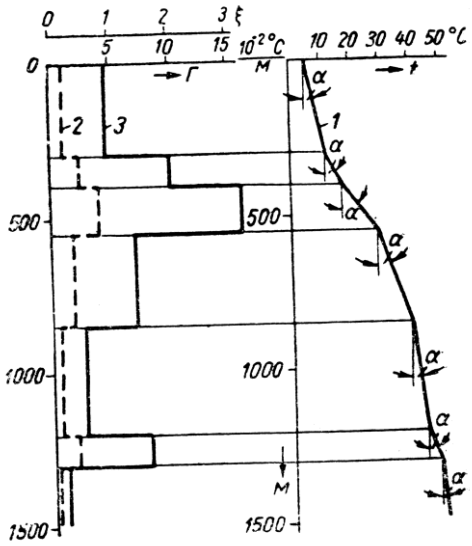


Рис.4. Термограммы 1 и графики геотермического градиента 2 и теплового сопротивления пород 3

Выяснено, что основным механизмом передачи тепла в пористых средах, насыщенных флюидом является теплопроводность, а конвекция и излучение имеет очень малые значения (при исследованных параметрах), и не учитываются в этих условиях.

Установлено, что аддитивность для гетерогенных сред теплопроводности не выполняется.

Полученные результаты, также, могут быть использованы для решения прикладных задач - изучению структуры теплового поля земной коры, и процессов, связанных с поисками, разведкой, разработкой нефтяных и газовых месторождений, способствует расширению задач термокаротажа скважин.

Литература:

1. *Чудновский А.Ф.* Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Москва: ГИФМЛ, 1962. – 456с.
2. *Морохов И.Д., Лаповок Л.И.* Физические явления в ультрадисперсных средах. Москва: Энероатомиздат, 1984. – 224с.
3. *Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Ленинград: Энергия, 1974. – 264с.
4. *Миснар А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. Москва: Мир, 1968. – 464с.
5. *Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А.* Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 352с.
6. *Guseinov G.G., Abdulagatov I.M.* Thermal-Conductivity Measurements of Aqueous Orthophosphoric Acid Solutions in the Temperature Range from (293-400) K and at Pressures up to 15 MPa. / Int. J. Thermophys. (2014), v.35, N.2, 35:218-245.
7. *Гусейнов Г.Г.* Устройство для измерения теплопроводности. // Вестник Казанского технологического университета, 2014, т.17, №23, с.299-305.
8. *Шашков Л.Г., Волохов Г.М., Абраменко Т.Н.* Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Энергия, Москва, 1973, 336 с.
9. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. - М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416с.
10. *Kittel, C.* Interpretation of thermal conductivity of glasses // Phys. Rev. – 1949, v. 75. N 6. p. 972-985.

11. *Хейфец Л.И., Неймарк А.В.* Многофазные процессы в пористых средах. Москва: Химия, 1982. – 319с.
12. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман, М.: Недра, 1984. - 455с.
13. *Любимова Е.А.* Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. – 279с.

УДК 628.162:621.482

ОБ ОТЛОЖЕНИИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ахмедов Г.Я., Гаджимурадов Р.А., Камалутдинова И.А., Курбанисмаилова А.С.

ФГБУН «Институт проблем геотермии» ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ganapi@mail.ru

В статье рассматриваются условия выделения из растворов геотермальных вод типа месторождения Тернаир (Махачкала, РД) твердой фазы карбоната кальция на теплообменной поверхности. Описана методика исследования динамики солеотложения в зависимости от температуры стенки теплообмена.
Ключевые слова: геотермальная вода, углекислотное равновесие, твердые отложения, карбонат кальция, теплообмен

Образование карбонатных отложений на теплообменных поверхностях геотермальных систем сдерживает внедрение энергетических технологий в практику геотермального тепловодоснабжения. Проблема эта связана с нарушением карбонатно-кальциевого равновесия в растворах ряда подземных термальных вод, в частности, Северного Кавказа при выходе их на поверхность Земли. В настоящее время эти воды используют только в целях отопления и горячего водоснабжения. Если проблему коррозии оборудования в геотермальных системах можно решить, используя для изготовления данного оборудования некорродирующий материал - нержавеющую сталь, титан, пластик и т.д., то отложение твердой фазы карбоната кальция идет на любой поверхности[1]. При этом образование небольшого (1 ÷ 4 мм) слоя отложений на теплообменной поверхности резко снижает коэффициент теплопередачи [2].

Проведенные в работах [3, 4] исследования свидетельствуют о существенном влиянии температуры теплообменной стенки на образование на ее поверхности твердой фазы карбоната кальция $CaCO_3$. На основе проведенных исследований предложены устройства и технологические решения, при которых отсутствуют отложения $CaCO_3$ и в то же время отсутствуют потери, связанные с охлаждением стенки [5].

Результаты исследований отложений $CaCO_3$ на теплообменной поверхности при использовании геотермальных вод на примере модели теплообменника типа «труба в трубе», имитирующего трубку кожухотрубного теплообменника, представлены в работе [2]. В первичном контуре модельного теплообменника проходила геотермальная вода при температуре около 100 ^oC, во вторичном – водопроводная вода при температуре 10 ^oC. Так, на рис.1 показано распределение толщины отложений на внутренней поверхности внутренней трубы теплообменника при наличии вторичного теплоносителя, проходящего противотоком через второй контур теплообменника. Как видно из рис.1, отложения распределяются неравномерно. В начале теплообменной поверхности отложения толще, далее толщина отложений уменьшается и в конце отложения отсутствуют. Такое распределение толщины отложений связано с различными параметрами первичного теплоносителя, как в толще воды, так и непосредственно у стенки трубы.

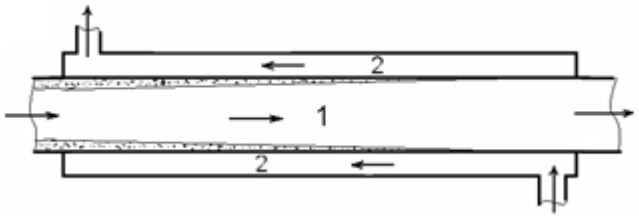


Рис. 1. Распределение отложений по длине теплообменника

На рис.2 наглядно представлено распределение температуры воды в окрестности стенки теплообмена и температуры в самой стенке. В работе [3] показано, что изменение коэффициента теплоотдачи в одном из контуров теплообменника за счет изменения скорости потока жидкости в нем приводит к изменению температуры жидкости у теплообменной стенки в обоих контурах. При этом если температура воды у стенки уменьшается, то это приводит к увеличению растворимости $CaCO_3$ в растворе данной воды у стенки и уменьшению скорости его выпадения на ней. К примеру, при увеличении скорости потока холодной воды в контуре II (рис.2) линия 1 на стенке опускается вниз в обоих контурах, что влечет за собой уменьшение скорости солеотложения на теплообменной поверхности в I контуре.

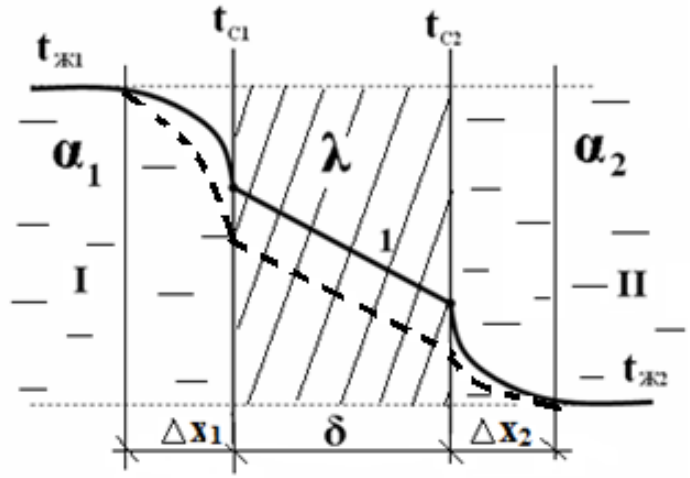


Рис. 2. Распределение температуры в окрестности стенки теплообмена

Оценку температуры стенки теплообмена можно выполнить, решая систему уравнений тепловых потоков через теплообменную стенку. Тепловые потоки от жидкости 1 к поверхности 1 теплообменной стенки, от поверхности 1 стенки к поверхности 2 стенки и от поверхности 2 стенки к жидкости 2 можно написать соответственно в следующем виде

$$Q_1 = \alpha_1 (t_{Ж1} - t_{C1}) F \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda}{\delta}(t_{C1} - t_{C2}) F \quad (2)$$

$$Q_3 = \alpha_2 (t_{C2} - t_{Ж2}) F \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно в первом и во втором контуре, Вт/м^2 ^{o}К; λ – теплопроводность стенки, Вт/м ^{o}К; δ – толщина теплообменной стенки, м; $\boldsymbol{F}$ – усредненная величина площади поверхности теплообмена, м^2; $\boldsymbol{t_{Ж1}, t_{Ж2}, t_{C1}, t_{C2}}$ – температура соответственно жидкости 1, жидкости 2, поверхности 1 стенки и поверхности 2 стенки, ^{o}К.

В стационарном режиме теплообмена

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (4)$$

Совместное решение уравнений тепловых потоков через ламинарный подслой Δx_1, толщину стенки теплообмена δ и ламинарный подслой Δx_2 позволяет найти температуру стенки теплообмена со стороны геотермальной воды, как в начале теплообменной поверхности, так и в конце в виде

$$t_{C1} = t_{Ж1} - \frac{1}{\alpha_1} \frac{t_{Ж1} - t_{Ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

В результате, имея температуру стенки теплообмена при данном давлении в теплообменнике и сопоставляя ее с равновесной температурой раствора воды, можно оценить склонность ее к отложениям карбоната кальция [6].

Ранее с целью исследования процесса солеотложения в условиях теплообмена было разработано устройство и изготовлен его рабочий макет, моделирующей теплообменный процесс в скважине с погружным теплообменником в динамическом режиме в интервале температур раствора воды 303–343^{o}К с автоматизированным контролем заданных параметров [7]. В работе оценивалась масса выпавшей на змеевике карбоната кальция при разных режимах движения воды в реакторе и змеевике. В процессе исследований было зафиксировано заметное изменение отложений карбоната кальция на поверхности змеевика при разной гидродинамике потоков воды в реакторе и змеевике. В частности, было установлено, что при относительном уменьшении числа Рейнольдса в реакторе по сравнению с числом Рейнольдса внутри змеевика, где протекала холодная вода, заметно снижается масса карбоната кальция, выпавшей на поверхности змеевика в ректоре, что свидетельствовало об уменьшении температуры стенки теплообмена. Но, с другой стороны, наличие обогревателя воды в реакторе вносила существенные погрешности в оценке, выпавшей на поверхности змеевика, количества взвеси. В связи с этим было принято решение проводить аналогичные исследования непосредственно в натурных условиях на скважине месторождения Тернаир (Махачкала), что исключалась необходимость в обогреве исследуемой воды. Для этой цели собрана экспериментальная установка по исследованию изменения углекислотно-кальциевого равновесия у стенки теплообмена (рис.3). В левой части рисунка представлен внешний вид установки, а в правой - его составные элементы. Ниже на рис.4 представлена также ее схема с указанием размеров составных элементов в сантиметрах.

Рис.3. Экспериментальная установка по исследованию изменения углекислотно-кальциевого равновесия в воде у стенки теплообмена:

1 – крышка с патрубками подвода и отвода геотермальной воды; 2–резиновая прокладка – уплотнитель; 3- внешний корпус установки с патрубками подвода и отвода холодной воды; 4- внутренний корпус с теплообменной стенкой из меди; 5 – датчик температуры теплообменной стенки.

Наличие проградуированной термопары (хромель-алюмелевые - ТХА - Тип К), установленной непосредственно в самой теплообменной стенке (рис.3, поз.5), позволяет определять ее температуру в процессе теплообмена в динамическом режиме.

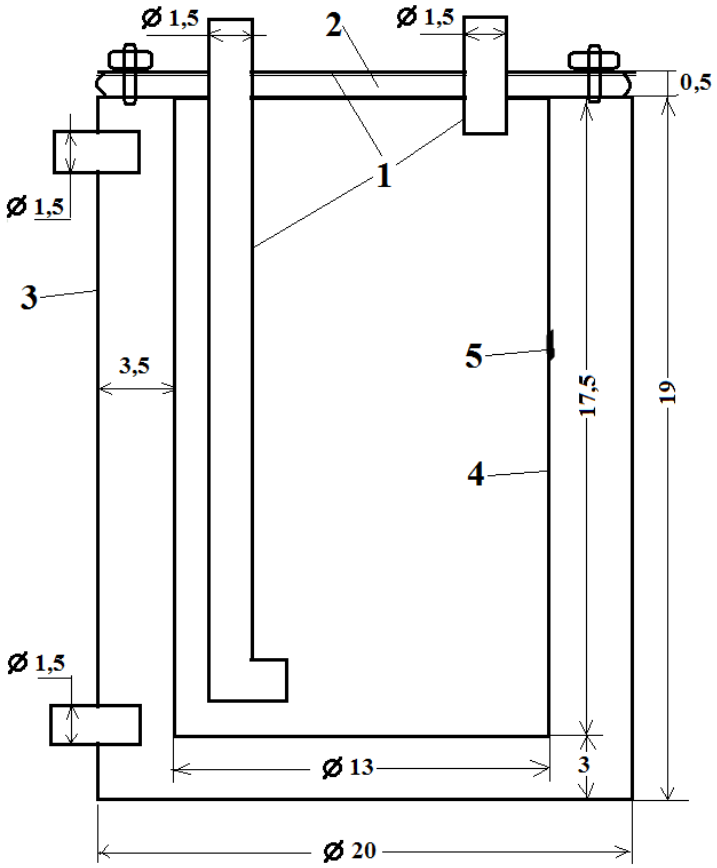


Рис. 4. Схема и размеры экспериментальной установки по исследованию изменения углекислотно-кальциевого равновесия в воде у стенки теплообмена: 1 – крышка с патрубками подвода и отвода геотермальной воды; 2–резиновая прокладка – уплотнитель; 3- внешний корпус установки с патрубками подвода и отвода холодной воды; 4- внутренний корпус с теплообменной стенкой из меди; 5 – датчик температуры теплообменной стенки.

Для оценки коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 использовались критериальные уравнения теплообмена. При турбулентном течении жидкости ($3\cdot10^3 < Re < 2\cdot10^5$) расчет теплообмена внутри емкости можно произвести по формуле [8]

$$Nu = 0{,}023\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}^{0,33}\psi, \qquad (6)$$

Величина $\psi = \left(\frac{\mu_c}{\mu_ж}\right)^{-0,17}$, где μ_c и $\mu_ж$ - динамический коэффициент вязкости воды при температуре стенки и жидкости в потоке. Число Рейнольдса и числа Нуссельта и Прандтля определены из выражений:

$$\mathrm{Re} = \frac{n\,d^2}{\nu};\ Nu = \frac{\alpha\,d}{\lambda};\ \mathrm{Pr} = \frac{\mu c}{\lambda} \qquad (7)$$

В выражениях (7): ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; λ-коэффициент теплопроводности, Вт/(м·ºК); d – диаметр внутренней емкости, м; α – коэффициент теплоот-

дачи, Вт/(м2·°К); с – теплоемкость среды, Дж/кг· °К, число оборотов вращения жидкости внутри емкости за единицу времени, 1/с.

Расчет теплообмена в кольцевом канале между теплообменной и наружной стенкой можно произвести по формуле $$Nu_в = Nu_{тр}\left[1-\frac{0{,}45}{2{,}4+\mathrm{Pr}}\right]\cdot\left(\frac{d_н}{d_в}\right)^n\varepsilon \qquad (8)$$

В этой формуле

$$Nu_в = \frac{\alpha d_э}{\lambda};\ \boldsymbol{n = 0{,}16\cdot Pr^{-0{,}15};\ d_э = d_н - d_в}$$

$\boldsymbol{d_н}$ и $\boldsymbol{d_в}$ – наружный и внутренний диаметр кольцевого канала; $Nu_{тр}$ вычисляется по широко распространенной в расчетной практике формуле

$$Nu_{тр} = 0{,}0296\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}43}\left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_c}\right)^{0{,}25} \qquad (9)$$

При $d_в/\ d_н \geq 0{,}2$ ε = 1. При этом, число Рейнольдса определен исходя из формулы $Re = \frac{v d_э}{\nu}$

Результаты приближенного расчета представлены в таблице. Так как для меди термическое сопротивление δ/λ намного меньше, чем термическое сопротивление среды в процессе теплоотдачи ($1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$), то в формуле (5) слагаемым δ/λ в знаменателе можно пренебречь и температуру стенки принять одинаковой с обеих *сторон* (**t_{C1} = t_{C2} = t_C**), как обозначено в таблице.

Таблица

Зависимость температуры теплообменной стенки от гидродинамики потока воды

№	Re I	α_1, , Вт/м^2 °К	Re II	α_2, Вт/м^2 °К	$t_{ж1}$, °С	$t_{ж2}$, °С	t_C, °С
1	4000	125	8000	2000	100	20	25
2	4000	125	4000	1200	100	20	28
3	12000	300	3000	900	100	20	40
4	8000	260	3000	900	100	20	44

Как видно из таблицы, при неизменном значении коэффициента теплоотдачи в первом контуре температура стенки с увеличением числа Рейнольдса во втором контуре меняется в сторону температуры жидкости в нем. Сравнивая равновесные величины давления и температуры для раствора используемой воды, можно оценить склонность ее к выпадению твердой фазы карбоната кальция на поверхности теплообмена. Использование данной методики позволит эксплуатировать оборудование геотермальных теплообменных систем в режиме без карбонатных отложений. Учет температуры стенки позволит оценить возможности не только эксплуатации энергетического оборудования в условиях декарбонизации геотермальных вод [9], но также и очистки ранее образовавшихся отложений [10].

Литература:

1. Ахмедов Г.Я. Твердые отложения карбоната кальция в геотермальных системах//Альтернативная энергетика и экология.- 2010.- № 11.- С. 81- 86.
2. Ахмедов Г. Я. Работа геотермальных систем теплоснабжения в режиме без солеотложения / /Промышленная энергетика.- 2010.- №4.- С.54-59.

3. Ахмедов Г.Я. К вопросу о влиянии теплопередачи на отложение твердой фазы карбоната кальция на теплообменной поверхности //Энергосбережение и водоподготовка.- 2011.- № 6.- С. 6 – 8.
4. Ахмедов Г.Я., Магомадова Р.А. Об отложении карбоната кальция на охлаждаемой поверхности геотермального оборудования //Альтернативная энергетика и экология.- 2013.- № 01/2.- С. 98 -102.
5. Ахмедов Г.Я. Защита геотермальных систем водоподготовки от карбонатных отложений //Энергосбережение и водоподготовка.- 2010.- № 6.- С. 18-21.
6. Ахмедов Г.Я. Проблемы солеотложения при использовании геотермальных вод для горячего тепловодоснабжения//Промышленная энергетика.- 2009.- № 9.- С. 50-54.
7. Ахмедов Г.Я., Гаджимурадов Р.А., Камалутдинова И.А. Изучение кальций-углекислотного равновесия в системах минерализованных геотермальных вод в условиях теплообмена и в его отсутствии/Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований: материалы Всероссийской научно-технитческой конференции (19-21 октября 2016 г., Махачкала ДГТУ). Под ред д.т.н. Исмаилова Т.А. Махачкала: ДГТУ, 2016.- С. 166-170.
8. Тепло - и массообмен. Теплотехнический эксперимент (теплоэнергетика и теплотехника): справочник /Е.В.Аметистов, В.А.Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; под общей ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
9. Ахмедов Г.Я. К вопросу об эксплуатации энергетических систем в условиях декарбонизации геотермальных вод//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013.-№28.- С. 63-69.
10. Ахмедов Г.Я. Очистка геотермальных систем отопления и горячего водоснабжения от карбонатных отложений//Водоснабжение и санитарная техника.- 2012.- № 1.- С. 59-63.

ФАКТОР СЖИМАЕМОСТИ СМЕСЕЙ ВОДА–СПИРТ ПО ДАННЫМ *p,ρ,T,x*-ИЗМЕРЕНИЙ

Османова Б.К.[1], Базаев А.Р.[1], Абдурашидова А.А.[2]

[1]ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: badji@mail.ru
[2]ФГБОУ Дагестанский Государственный Педагогический Университет, Махачкала, Россия;367003, ул. М.Ярагского, 57; e-mail: aida18.74@mail.ru

По данным о *p,ρ,T,x*-зависимостей смесей воды с алифатическими спиртами (метанол, этанол, н-пропанол) в жидком, газообразном, околокритическом и сверхкритическом состояниях определенны значения величины фактора сжимаемости $Z=p/RT\rho_m$ в диапазоне по температуре 373.15-673.15, давлению до 50 МПа и плотности 35-700 кг/м^3 для трёх значений состава *x* (0.2, 0.5, 0.8 мольных долей спирта). Аппроксимацией экспериментальных значений Z получено полиномиальное трехпараметрическое уравнение состояния в виде разложения фактора сжимаемости по степеням приведенной плотности ($\omega=\rho/\rho_к$), приведенной температуры ($\tau=T/T_к$) и состава: $Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=0}^{s} a_{ijk}\omega^i \cdot x^k / \tau^j$. Средняя относительная погрешность рассчитанных значений фактора сжимаемости от экспериментальных составляет: 2% (жидкая фаза), 0.7% (паровая фаза), 0.5% (сверхкритический флюид).

Зависимость между давлением *p*, температурой *T* и молярным объемом V_m идеального и реального газов описываются соответственно уравнениями состояния

$(pV_m)_{ид}=RT$ и $(pV_m)_p=ZRT$, откуда $Z=(pV_m)_p/(pV_m)_{ид}$. (1)

Безразмерный коэффициент *Z(p,T)* в уравнении реального газа характеризует степень отклонения свойств его от свойств модели идеального газа, то есть учитывает влияние межмолекулярных сил на свойства системы. В научной литературе его принято называть фактором сжимаемости. Для смесей (паров жидкостей) фактор сжимаемости зависит от состава

$$Z(T,p,x)=pV_m/RT=p/RT\rho_m, \quad (2)$$

где p – абсолютное давление; V_m, ρ_m– молярный объем и молярная плотность смеси данного состава x; T– температура; $R=8.314$ Дж/кмоль К – универсальная (молярная) газовая постоянная. Для смеси идеальных газов $Z=1$. Эксперимент показывает, что величина Z для реальных чистых газов и их смесей может принимать значения меньше 1 (например, водяной пар) и больше 1 (пары углеводородов).

Принято считать, что теоретически обоснованным уравнением состояния для газовой фазы является уравнение состояния Боголюбова–Майера в вириальной форме [1]:

$$p/RT\rho_m =1+B(T)\,\rho+C(T)\,\rho^2+D(T)\,\rho^3+\ldots, \quad (3)$$

где $B(T)$, $C(T)$, $B(T)$ – коэффициенты, зависящие только от температуры, учитывают взаимодействие между двумя, тремя и т.д. молекулами. В предельном случае $\rho_m \to 0$ уравнение (3) переходит в уравнение состояния идеального газа. При больших значениях плотности вириальный ряд (3) расходится и поэтому для точного описания термодинамических свойств флюидов в широкой области параметров состояния используют разложение фактора сжимаемости Z в ряды по степеням температуры и плотности [2-6]:

$$Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j \text{, откуда } p = RT\rho_m\left[1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right]. \quad (4)$$

В (4): $\omega=\rho/\rho_к$, $\tau=T/T_к$ – приведенные плотность и температура соответственно, $\rho_к$, $T_к$ – критическая плотность и критическая температура.

Уравнение (4) описывает зависимость фактора сжимаемости от плотности и температуры гомогенных фаз и не учитывает концентрационную зависимость.

Практическое использование смесей в качестве теплоносителей и растворителей связано с получением уравнения состояния, учитывающего зависимость термодинамических свойств не только от плотности и температуры, но и от их состава x [7,8]. Полученное в данной работе трехпараметрическое полиномиальное уравнение состояния – разложение фактора сжимаемости по степеням приведенной плотности, приведенной температуры и состава имеет вид:

$$Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=0}^{s} a_{ijk}\omega^i\cdot x^k/\tau^j \text{, откуда } p = RT\rho_m\left[1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n}\sum_{k=0}^{s} a_{ijk}\omega^i\cdot x^k/\tau^j\right]. \quad (5)$$

Коэффициенты уравнения (5) рассчитаны по экспериментальным p,ρ,T,x - зависимостям [4,9,10] обобщенным методом наименьших квадратов. Из-за большого объема в таблице 1 приведены значения коэффициентов уравнения (5) для смесей вода–этанол.

Таблица 1.

Коэффициенты уравнения (5) для смеси вода–этанол.

ГФ	ЖФ	СФ
a_{100}= 59.020811411433904	a_{100}= 2134.0566327383503	a_{100}= -69.37641122915701
a_{101}= -975.4015882039622	a_{101}= -5247.505916081407	a_{101}= 447.06594276723547
a_{102}= 2355.605152876469	a_{102}= -2592.450606131711	a_{102}= -1268.427011867556
a_{103}= -4256.438207995219	a_{103}= 6266.633357885022	a_{103}= 1551.6980464218705
a_{104}= 2789.3150948117877	a_{110}= -4143.1403238868625	a_{104}= -702.1475947870582

a_{110}= -206.81743096785715	a_{111}= 17971.62077633541	a_{110}= 148.57896177665538
a_{111}= 2938.909029308179	a_{112}= 113.20681885929535	a_{111}= -937.0203408855914
a_{112}= -7269.586992763949	a_{113}= -16978.29526596026	a_{112}= 2624.745776765143
a_{113}= 12689.532617672721	a_{120}= 1840.594141384547	a_{113}= -3143.0296453572964
a_{114}= -8096.001983980203	a_{121}= -20308.304692250393	a_{114}= 1397.6342953579347
a_{120}= 235.4538870407937	a_{122}= 7718.443806161586	a_{120}= -81.19062654899273
a_{121}= -2892.377723226346	a_{123}= 15179.97013678932	a_{121}= 494.6317086739949
a_{122}= 7447.683822988184	a_{130}= 166.73554168587762	a_{122}= -1366.9790206223452
a_{123}= -13025.657077871161	a_{131}= 7583.167907899801	a_{123}= 1597.2938169426877
a_{124}= 8200.206321058604	a_{132}= -5235.607900805361	a_{124}= -694.7360714347908
a_{130}= -89.09906633947902	a_{133}= -4471.038644481378	a_{200}= 155.70224481448685
a_{131}= 931.7294784705641	a_{200}= -1206.2976411097031	a_{201}= -673.5320642420485
a_{132}= -2539.3734765546938	a_{201}= 2964.738432902319	a_{202}= 1656.806944973367
a_{133}= 4592.01036788444	a_{202}= 1231.4637432172935	a_{203}= -1940.548931692258
a_{134}= -2887.4130737362666	a_{203}= -2985.4696213378857	a_{204}= 911.1452777485913
a_{200}= -752.6897097601952	a_{210}= 534.3233220689099	a_{210}= -332.202966816168
a_{201}= 9745.731144845033	a_{211}= -10791.651912412952	a_{211}= 1402.8531082113018
a_{202}= -8591.60849033878	a_{212}= 4395.825020506714	a_{212}= -3267.7242610062103
a_{203}= 3558.1484306156267	a_{213}= 7882.9084449131615	a_{213}= 3509.8596111421334
a_{204}= 1304.211720255942	a_{220}= 2628.1452405787177	a_{214}= -1550.4541786483326
a_{210}= 2945.1415172649054	a_{221}= 12897.792885557155	a_{220}= 178.71018209325499
a_{211}= -29431.361262653798	a_{222}= -12797.40275753152	a_{221}= -741.1729067897194
a_{212}= 21154.2361306387	a_{223}= -6873.111845015992	a_{222}= 1637.6694255166035
a_{213}= -901.8641008517758	a_{230}= -1954.5650543770957	a_{223}= -1580.4428540437036
a_{214}= -8542.264245713912	a_{231}= -5068.117155778532	a_{224}= 633.544809473287
a_{220}= -3615.277364564556	a_{232}= 7161.618788712251	a_{300}= -143.66451168440375
a_{221}= 28807.559349579813	a_{233}= 1981.882505119163	a_{301}= 318.0181458083222
a_{222}= -14664.702708184604	a_{300}= -23.27338822308771	a_{302}= -440.80149639591826
a_{223}= -8143.835924410507	a_{301}= 5.320337915857344	a_{303}= 370.807241143315
a_{224}= 11651.955151934619	a_{302}= -12.445411207094615	a_{304}= -204.98857982076143
a_{230}= 1422.700762722813	a_{303}= -383.1265433716126	a_{310}= 302.7996682661962
a_{231}= -9123.981614224296	a_{310}= 1468.8856994798703	a_{311}= -632.4573791612545
a_{232}= 2054.8866369526318	a_{311}= 470.5490136207757	a_{312}= 560.2499318033391

a_{233}= 5667.573244672349	a_{312}= -3188.5209772477056	a_{313}= 102.47425857133011
a_{234}= -4570.140480618146	a_{313}= 1530.5486531993076	a_{314}= -116.23290993204746
a_{300}= -1645.9547114045135	a_{320}= -2913.9072735893374	a_{320}= -160.48883728615002
a_{301}= -13793.486440192835	a_{321}= -1073.112356327319	a_{321}= 325.94347184096995
a_{302}= 30039.749622838142	a_{322}= 6570.81981518943	a_{322}= -144.08053461533936
a_{303}= -50894.18402520607	a_{323}= -1845.1629312820874	a_{323}= -468.7167142303301
a_{304}= 12795.522290152352	a_{330}= 1467.5105996919094	a_{324}= 331.90514820586816
a_{310}= -670.596867626716	a_{331}= 595.2225455637865	a_{400}= 68.02843310624326
a_{311}= 52101.00555178379	a_{332}= -3363.979226628202	a_{401}= -27.84223041644712
a_{312}= -62505.31979464978	a_{333}= 693.4789496450069	a_{402}= -238.42423727771106
a_{313}= 86611.97310968424	a_{400}= 71.02239586629804	a_{403}= 411.79873260105035
a_{314}= -8821.990296340977	a_{401}= -265.49468793232063	a_{404}= -173.05191657490636
a_{320}= 6212.288068058565	a_{402}= 350.15948606577325	a_{410}= -140.81224114619084
a_{321}= -58509.76795808372	a_{403}= -42.63894466858017	a_{411}= 29.176197109822517
a_{322}= 17270.30745521246	a_{410}= -421.1219380837261	a_{412}= 734.930283337824
a_{323}= 1431.4831532217966	a_{411}= 732.4305495263089	a_{413}= -1397.0990824934076
a_{324}= -31428.088968898384	a_{412}= -476.09824204440844	a_{414}= 686.847995766274
a_{330}= -3892.928735023881	a_{413}= -35.56149747818392	a_{420}= 73.18014553131839
a_{331}= 20161.748077476535	a_{420}= 638.1944967771437	a_{421}= -6.16916902225208
a_{332}= 15632.744736992732	a_{421}= -649.3208644033595	a_{422}= -487.3328081959203
a_{333}= -38305.12581082632	a_{422}= -119.10621519891373	a_{423}= 987.5203243799198
a_{334}= 28309.398753424488	a_{423}= 178.53106015537398	a_{424}= -521.3742166587764
a_{400}= 12002.268294776699	a_{430}= -287.93109915892086	a_{500}= -13.447772085670309
a_{401}= -36124.23585519953	a_{431}= 182.84139751270152	a_{501}= -14.460691558613522
a_{402}= -19370.13821949223	a_{432}= 243.81109566616158	a_{502}= 127.62507670176294
a_{403}= 45647.242437099514	a_{433}= -99.44363672078795	a_{503}= -191.00838615449157
a_{404}= 15744.300137143153		a_{504}= 85.1979342607292
a_{410}= -17950.143711982397		a_{510}= 27.430660001872905
a_{411}= 45870.73722372763		a_{511}= 37.53495782056284
a_{412}= 63615.418389324754		a_{512}= -317.4738717672588
a_{413}= -43663.793870888134		a_{513}= 510.04435197005586
a_{414}= -102244.9990211024		a_{514}= -244.39575374760076
a_{420}= -31.469643559703457		a_{520}= -14.017671627861612

a_{421}= 7272.984835583807		a_{521}= -22.341797974835128
a_{422}= -17964.97215357116		a_{522}= 188.77136067437402
a_{423}= -139058.93894304015		a_{523}= -320.30873299910087
a_{424}= 210520.84900991764		a_{524}= 161.0017589291193
a_{430}= 5976.275616882697		
a_{431}= -16916.848521716605		
a_{432}= -27206.186810151114		
a_{433}= 139335.94935147962		
a_{434}= -125609.85437456393		
a_{500}= -8436.97619739382		
a_{501}= 56477.19276621914		
a_{502}= -53341.6214265843		
a_{503}= 26802.89763262547		
a_{504}= 20679.29163850572		
a_{510}= 5610.29984115367		
a_{511}= -72314.76278393038		
a_{512}= 13377.516793040324		
a_{513}= 37434.32004315386		
a_{514}= -107240.99876072575		
a_{520}= 14071.95082563376		
a_{521}= -17568.291358242885		
a_{522}= 86720.96831569503		
a_{523}= -63698.18770100085		
a_{524}= 95114.22496295889		
a_{530}= -11244.216689352163		
a_{531}= 33343.13951823628		
a_{532}= -46216.00611427129		
a_{533}= -1822.8749120627451		
a_{534}= -7667.556106845618		

Средняя относительная погрешность рассчитанных значений фактора сжимаемости по уравнению (5) от экспериментальных для всех смесей составляет: 0.5% (сверхкритический флюид), 0.7% (паровая фаза), 2% (жидкая фаза). На рис.1-3 приведена погрешность расчета для смесей вода–этанол.

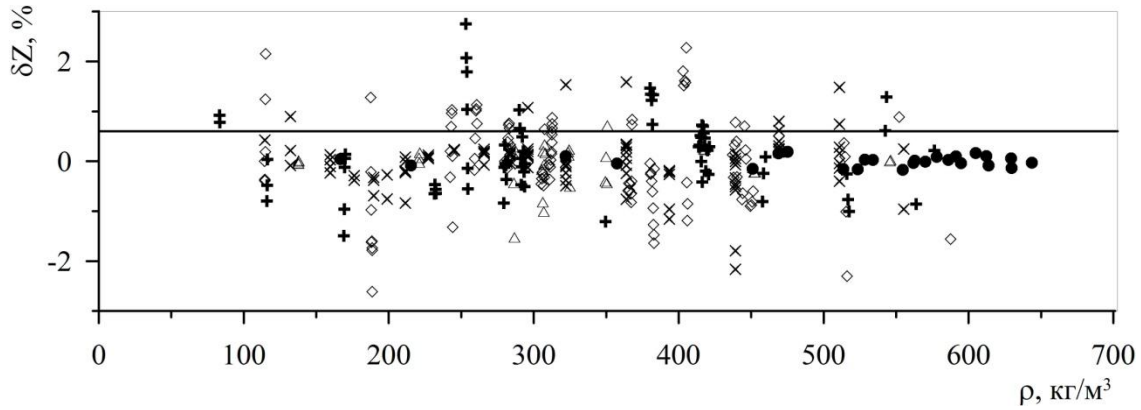


Рис.1. Относительное отклонение рассчитанных значений Z по уравнению (2) от экспериментальных для системы вода–этанол в сверхкритической области с концентрацией x: 0.0(•), 0.2(Δ), 0.5(+), 0.8(◊), 1.0(x)

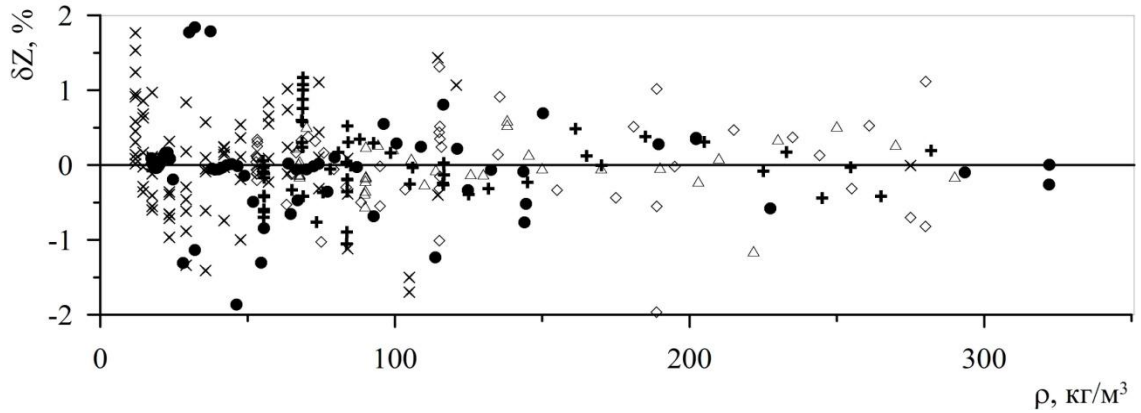


Рис.2. Относительное отклонение рассчитанных значений Z по уравнению (2) от экспериментальных для системы вода–этанол в паровой фазе с концентрацией x: 0.0(•), 0.2(Δ), 0.5(+), 0.8(◊), 1.0(x)

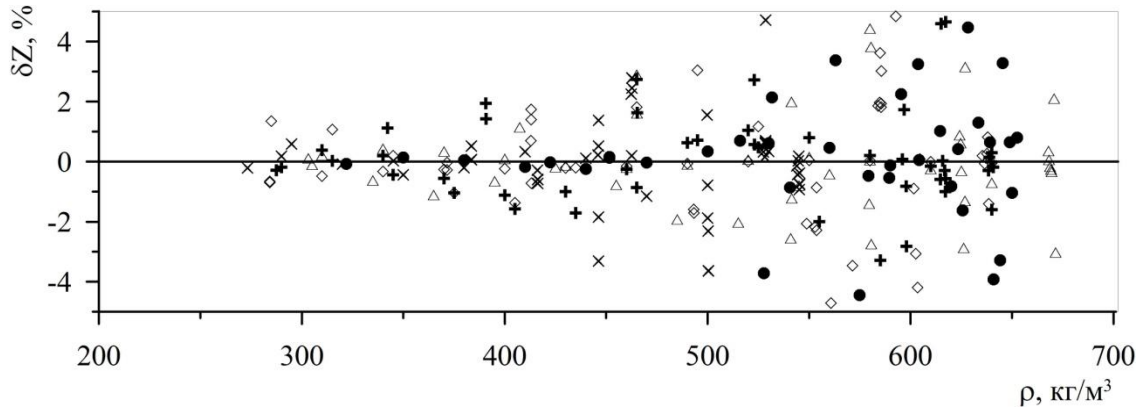


Рис.3. Относительное отклонение рассчитанных значений Z по уравнению (2) от экспериментальных для системы вода–этанол в жидкой фазе с концентрацией x: 0.0(•), 0.2(Δ), 0.5(+), 0.8(◊), 1.0(x)

На рис.4-7 приведена зависимость рассчитанных по уравнению (5) значений Z от приведенных плотности и температуры, а так же состава смесей вода–этанол.

В таблице 2 приведены литературные p,ρ,T,x-зависимости смесей вода–спирт [11,12] и относительные отклонения их от рассчитанных по уравнению (5). Как видно, уравнение (5) хорошо описывает наши экспериментальные p,ρ,T,x-зависимости в паровой фазе и в сверхкритическом состоянии нежели литературные данные, а в жидкой фазе примерно одинаково.

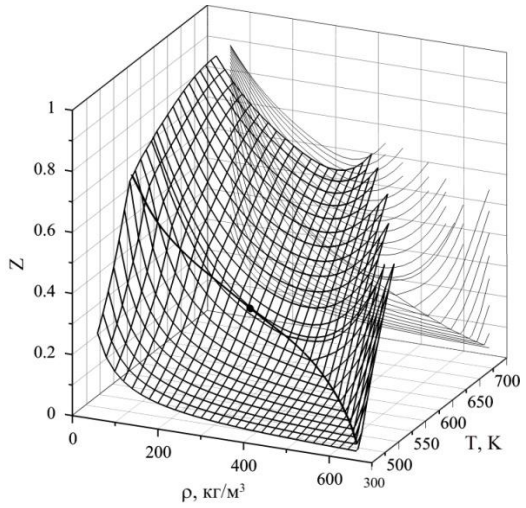


Рис. 4. Зависимость фактора сжимаемости от плотности и температуры для смеси вода-этанол состава x=0.5 мол. доли этанола

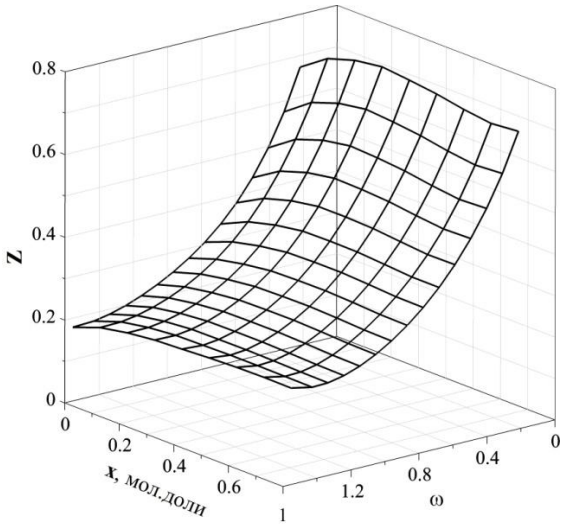


Рис. 5. Зависимости фактора сжимаемости смеси вода-этанол от состава и приведенной плотности для τ=1.009

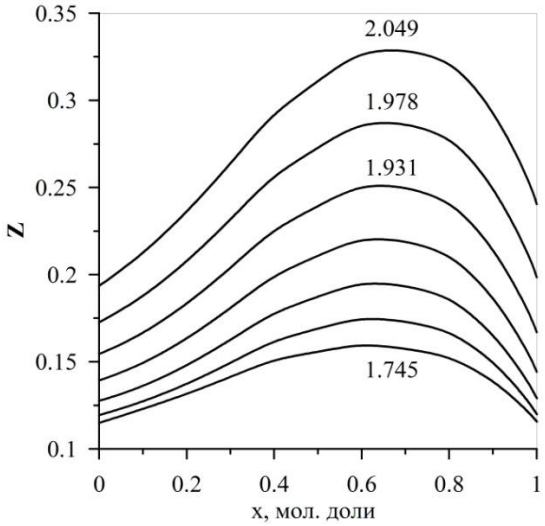


Рис.6. Изохоры ω: 1.745, 1.791, 1.838, 1.885, 1.931, 1.978, 2.025 зависимости фактора сжимаемости смеси вода-этанол от состава при τ=0.97 (жидкая фаза)

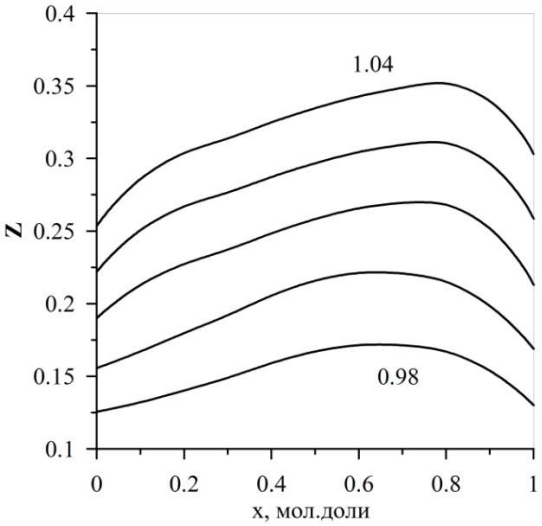


Рис.7. Изотермы τ: 0.979, 0.994, 1.009, 1.028, 1.047 зависимости смеси вода-этанол от состава при ω=1.7

Таблица 2.

Экспериментальные p,ρ,T,x-данные авторов работ [11,12] и их расчет уравнением (2).

Автор	x, мол. доля	ρ, кг/м^3	T, K	p, МПа	p по ур-ю (5)	δ, %
Вода-метанол СФ						
[11]	0.49641	177.09	573.44	13.69	13.93258	1.77
	0.49641	178.94	573.49	13.73	13.96399	1.70
	0.60172	166.44	573.65	13.73	13.41814	-2.27
	0.79623	164.28	573.63	13.74	13.942	1.47
	0.8935	166.98	573.69	13.73	13.549	-1.32
Вода-метанол ЖФ						
[11]	0.40888	307.09	573.69	13.74	13.80107	0.442

	0.40888	333.04	573.09	13.59	13.79698	1.522
	0.49641	700.68	473.26	13.56	13.55248	-0.06
	0.60172	674.71	473.27	13.54	13.20699	-2.46
	0.60172	659.4	473.46	6.89	6.99385	1.51
	0.60172	567.98	523.25	13.52	13.1404	-2.81
	0.70229	652.04	473.27	13.52	13.81496	2.18
	0.79623	633.07	473.25	13.5	13.67242	1.28
	0.8935	614.69	473.3	13.49	13.29818	-1.42
[12]	0.5	686.8	473.15	6.32	6.469247	2.36
	0.5	705.2	498.15	42.54	41.7434	-1.87
	0.5	719.1	498.15	53.26	53.67167	0.77
	0.5	621.3	523.15	19.93	20.28695	1.79
	0.5	645.3	523.15	28.76	28.82685	0.23
	0.5	663.1	523.15	37.43	36.91425	-1.38
	0.5	681.7	523.15	48.27	47.18584	-2.25
	0.75	618.1	473.15	6.21	6.060477	-2.41
	0.75	654.5	473.15	19.43	19.32361	-0.55
	0.75	611.3	498.15	19.36	19.33805	-0.11
	0.75	640.3	498.15	31.26	31.00832	-0.81
	0.75	660.6	498.15	42.14	42.42534	0.68
	0.75	527.5	523.15	13.44	13.69554	1.90
	0.75	558.6	523.15	19.36	19.34597	-0.07
	0.75	596.2	523.15	29.74	30.16584	1.43
	0.75	622.4	523.15	40.36	40.82844	1.16
	0.75	644.1	523.15	51.67	51.84562	0.34
	0.75	656.9	523.15	59.82	59.32275	-0.83
Вода-пропанол ГФ						
[12]	0.75	54.4158	523.15	3.5102	3.649411	-3.97
	0.75	83.7045	523.15	4.5134	4.693668	-3.99
	0.75	104.9004	523.15	5.0345	5.08771	-1.06
	0.75	118.6103	523.15	5.2513	5.189238	1.18

Литература:

1. *Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М.* Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977. 248с.
2. *Каплун А.Б., Мешалкин А.Б.* Единое малопараметрическое уравнение состояния для расчета термических свойств жидкости и газа // Труды XIII российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, Новосибирск, 28 июня-1 июля 2011г, С.33-34.
3. *Карабекова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р.* Термодинамические свойства систем вода–алифатический спирт в широком диапазоне параметров // СКФ, Т.10, №1, 2015, С.35-60.
4. *Базаев А.Р., Карабекова Б.К., Абдурашидова А.А.* p,ρ,T,x- зависимости сверхкритических водных растворов алифатических спиртов // СКФ, Т.8, №2, 2013, С.11-37.
5. *Сычев В.В., Вассерман А.А. и др.* Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.
6. *Вукалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.* Методы построения уравнения состояния веществ по экспериментальным термодинамическим данным с применением электронно-вычеслительных цифровых машин // ТВТ, Т.5, №2, 1967, С.265-270.
7. *Вассерман А. А., Мальчевский В. П.* Уравнение состояния и фазовое поведение смеси пропан-тетрофторэтан // ЖФХ, Т.86, № 9, 2012, С. 1528–1530.
8. *Макаров Д.М.* p,V,T,x-свойства бинарных смесей вода–диметилсульфоксид (2-пропанол), этиленгликоль–диметилсульфоксид. Дис. … канд. хим. наук. Иванова: Институт химии растворов РАН, 2008.

9. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.* Экспериментальное исследование критического состояния водных растворов алифатических спиртов // ТВТ, Т.47, №2, 2009, С.215–220.
10. *Базаев Э.А., Базаев А.Р.* Расчет критических показателей уравнения кривой фазовых равновесий жидкость–пар водных растворов алифатических спиртов // ЖФХ, Т.87, №6, 2013, С.973-977.
11. *Xiao C., Bianchi H. Tremain R.P.* Excess molar volumes and densities of (methanol–water) at temperatures between 323 K and 573 K and pressures of 7.0 MPa and 13.5 MPa // Chem.Therm, Vol. 29, 1997, P. 261-286.
12. *Shahverdiev A.N., Safarov J.T.* P-ρ–T and p_s– ρ_s–T_s properties of methanol+water and n-propanol+water solutions in wide range of state parameters // PCCP, 2002, Vol. 4, P. 979-986.

ИЗОХОРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА МАГНИЯ

Дворянчиков В.И.[1], Джаватов Д.К.[1], Искендеров Э.Г.[2], Рабаданов Г.А.[1]

[1]*ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН. Махачкала, Россия.367030, пр. И.Шамиля, 39а; e-mail*: vasiliy_dv01@mail.ru
[2]ФОИВТ РАН. *Махачкала, Россия.367030, пр. И.Шамиля, 39а;*

Экспериментально исследована изохорная теплоёмкость водного раствора хлорида магния вдоль линии фазового равновесия. Полученные результаты сравниваются с данными других авторов. В геотермальной энергетике, при решении оптимизационных задач эффективности, необходимо учитывать факт температурной зависимости теплоёмкости и плотности. Учёт температурной зависимости таких параметров как плотность и теплоёмкость при расчётах существенно влияет на значения критерия эффективности, которые необходимо учитывать, ибо в противном случае погрешность вычислений может составить десятки процентов. Результаты исследования изохорной теплоёмкости раствора, в зависимости от температуры, описаны аналитическими зависимостями.

Введение. Рост энергопотребления, ограниченность и удорожание ресурсов невозобновляемого топлива, обострение экологических проблем заставляют мировую экономику широко использовать альтернативные источники энергии. Эффективное использование энергии является важным показателем научно-технического уровня страны [1].

Достигнутые показатели развития нетрадиционной энергетики в мире и место в ней геотермальной энергетики указывает на то, что доля геотермальных источников достигает 60% выработки энергии на основе нетрадиционных источников энергии [2-5].

Отличительной особенностью геотермальной энергетики является её масштабность, возможность комплексного использования и доступность для добычи современными техническими средствами.

С учетом этого, также принимая во внимание значительные разведанные запасы термальных вод, геотермальную энергетику можно считать приоритетным направлением развития Российской энергетики среди возобновляемых источников энергии.

Важной проблемой геотермальной отрасли является повышение её конкурентоспособности по сравнению традиционными энергетическими отраслями. Для улучшения технико-экономических показателей геотермального производства необходимо как применение новейших технологий извлечения (например, использование горизонтальных скважин), использование и применение систем комбинированных с традиционными источниками энергии, так и разработка и исследование соответствующих моделей геотермальных систем с целью оптимизации их параметров.

В связи с этим проблема оптимизации процессов извлечения, использования геотермальных ресурсов становится актуальной практической задачей на пути активного их вовлечения в энергетический баланс.

Задачи оптимизации имеют большое практическое значение, так как позволяют определить такие значения параметров систем, оптимизирующие тот или иной критерий эффективности. Однако при оценке сложной системы нельзя оценивать её эффективность только лишь на основе одного, даже очень важного критерия. При этом приходится учитывать требования технического, экономического, экологического и другого характера.

При решении оптимизационных задач необходимо учитывать факт температурной зависимости теплоёмкости и плотности, о чём свидетельствуют расчёты на основе данных экспериментального исследования, полученные для геотермальных флюидов различной минерализации на линии фазового равновесия [6].

В связи с этим нами исследована изохорная теплоёмкость водного раствора хлорида кальция, который является одним из составляющих геотермальной воды.

Метод исследования. Для определения изохорной теплоёмкости на линии фазового равновесия нами использована установка адиабатного калориметра Х.И. Амирханова. Ранее этим методом были исследованы некоторые водно-солевые системы и геотермальные флюиды [7-12]. Описание методики измерения даны в предыдущих работах. Объём калориметра был равен 100±0,3 $см^3$. Материал калориметра – нержавеющая сталь марки 1Х18Н10Т.

Изохорная теплоемкость служит надежным критерием качества уравнения состояния, что предопределило проведение экспериментов направленных на ее исследование водных растворов электролитов и геотермальных систем в широком интервале параметров состояния.

Реализованный в настоящей работе метод адиабатического калориметра (рисунок 1) значительно усовершенствованный и существенно отличный от известных конструктивно, способом, который заключается в установлении контроля адиабатических условий с помощью слоя полупроводника (закиси меди). Термоэлемент выполняет роль адиабатической защиты, теплоизоляционного слоя и слоя передающего давление на более прочную внешнюю оболочку.

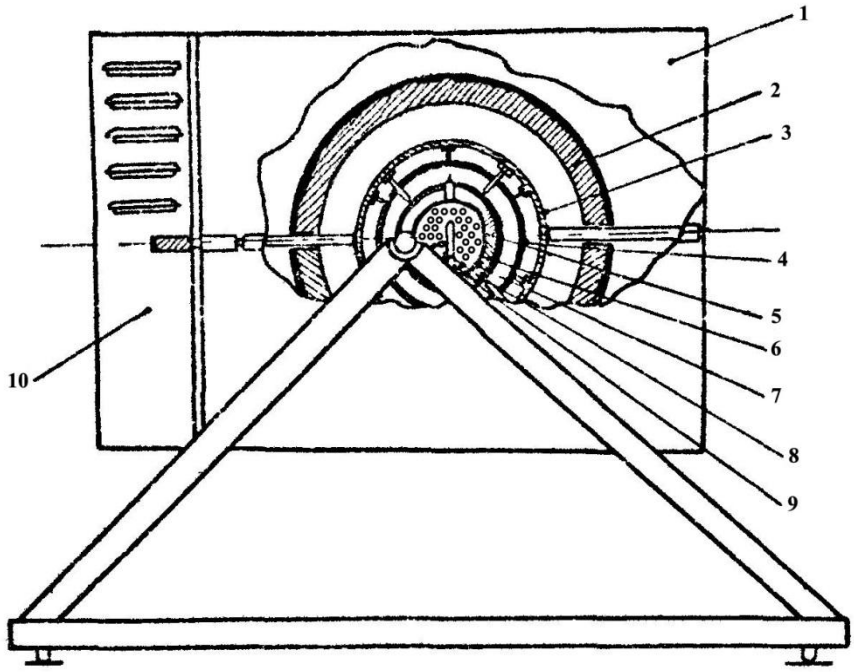


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения изохорной теплоёмкости жидкостей и газов.

1 - защитный кожух; 2 - шаровой термостат; 3 - кольцо возвратно-вращательного механизма; 4 - тепловой экран; 5 - карман для термометра сопротивления и измерительных термопар; 6 - наружная оболочка калориметра; 7 - внутренний сосуд калориметра; 8 - карман для внутреннего нагревателя, 9 - мешалка; 10 - кривошипно-шатунный механизм.

В таком калориметре внутренний сосуд и прилегающий к нему слой закиси меди входят в тепловую постоянную калориметра C_0. Давление, оказываемое исследуемым веществом на внутренние стенки калориметра, передается через плотный слой закиси меди на внешнюю более мощную оболочку, толщиной 8 мм, изготовленную из такого же материала (1Х18Н10Т).

Температурный ход, задаваемый внутренним нагревателем, менялся в пределах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ К/с в зависимости от области исследования. Вблизи кривой фазового равновесия эксперимент проводился с наименьшими скоростями.

Измерения теплоемкости проводились, как правило, с температурным шагом 0,17 – 0,24 К, вблизи точек перехода он уменьшался. Температура измерялась медь – константановой термопарой (рисунок2) (1). Время фиксировалось с помощью частотомера Ф-5041 с точностью 0,01с. Мощность внутреннего нагревателя измерялась потенциометрически с точностью 0,02%.

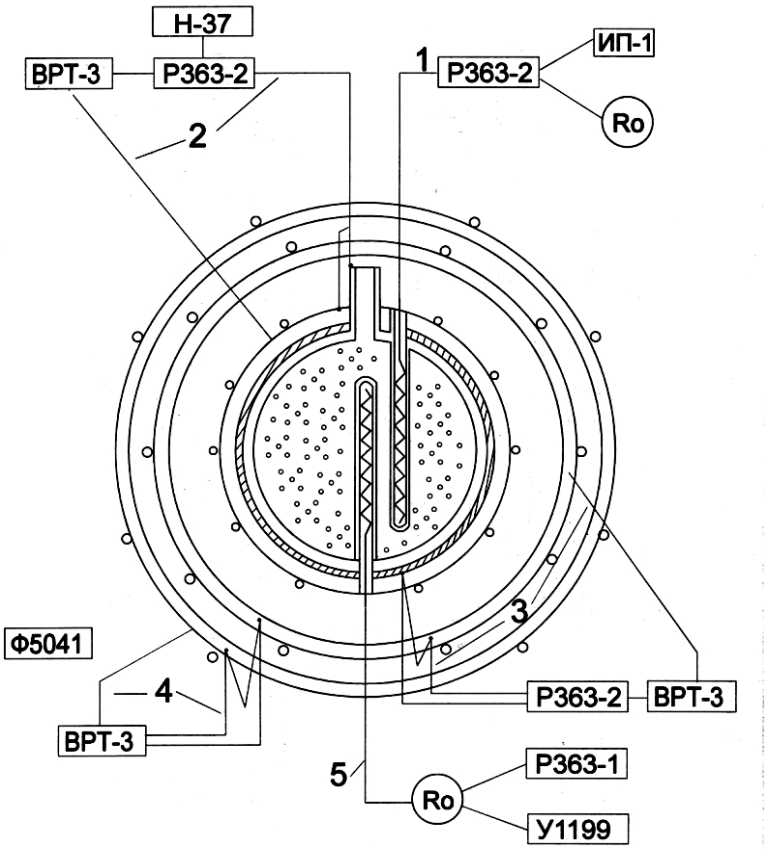


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

1- Цепь термопары. 2- Цепь термоэлемента. 3- Цепь экрана I. 4- Цепь экранов II-III. 5- Цепь внутреннего нагревателя.

Масса заливаемого в калориметр раствора определялась на весах ВЛТ-1 с точность 0,01г.

Оценка точности экспериментальных результатов, полученных в ходе измерений, которая включает в себя определение и учет систематических и случайных ошибок, присущих методике и вводимых в качестве поправок, выявление неучтенных систематических погрешностей и указание истинного значения измеряемой величины, анализ случайных погрешностей, вызывающих разброс экспериментальных точек. Величина поправки

на нестрогую изохоричность, с учетом термического и барического изменения объема калориметра определяется с точностью 5-10 % и составляет 0,5- 2 % к общему значению теплоемкости, для различных областей состояния вещества. Оценена систематическая ошибка связанная с теплообменом между калориметром и адиабатической оболочкой, разделенной слоем закиси меди, вследствии разности температур обменивающихся теплом поверхностей, регулирования адиабатичности.

Расчет показывает, что возможные потери за счет притока или отвода тепла через слой закиси меди из-за нестрогой адиабатичности системы составляет 0,2 Дж на одно измерение, что составляет порядка 0,02 % подводимого тепла. Фактически отклонения от адиабатичности происходит в обоих направлениях в равной степени.

Термоэдс от закиси меди подается на вход потенциометра Р363-2 (рисунок 2)(2), а затем на регулятор ВРТ-3. Схема поддержания адиабатических условий в калориметре, как уже упоминалось работает в режиме (ПИД) регулирования, точность поддержания разности температур составляет $2{,}5\cdot10^{-4}$ К. Потери тепла через неконтролируемые участки калориметра (штуцер, карманы, и т. д.) составляют порядка 0,03 Дж на одно измерение. Потери от выводящих проводов внутреннего нагревателя, термометра, капилляра составляют 0,07-0,09 Дж. Компенсация потерь тепла и регулирование обеспечивалось системой экранов (рисунок2) (3,4).

Калориметр помещался в термостат с намотанным на него нагревателем, продетым сквозь керамические бусенки. Так как большая часть проводов после выхода из калориметра находится внутри термостата, имеющего температуру близкую к температуре калориметра, то возможные потери тепла через соединительные провода незначительны.

Электрическая блок – схема представлена на рисунке 2.

Для экспериментального определения общих неконтролируемых потерь проверялась степень адиабатичности калориметра в рабочих условиях. С этой целью при различных рабочих температурах достигалось равновесное состояние калориметрической системы, отмеченное показанием стрелки на шкале потенциометра, подключенного к измерительной термопаре. Наблюдения показали, что при рабочих условиях температура системы за время одного измерения практически не менялась.

Точность поддержания температуры адиабатической оболочки осуществляется автоматически при помощи указанной блок схемы с точностью порядка $5\cdot10^{-4}$ К.

Тепловой экран позволяет уменьшить конвективные потоки и улучшить однородность температурного поля внутри термостата.

Для расчета теплоемкости C_v пользовались формулой:

$$C_V^{\,экс} = \frac{1}{m}\left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} - C_0\right) \qquad (1)$$

где m – масса, исследуемой жидкости,

$\Delta Q = UI\tau$ - количество тепла выделяемое внутренним нагревателем,

U- падение напряжения, I- сила тока в цепи внутреннего нагревателя,

τ- время однократного нагрева системы,

ΔT – температурный шаг,

C_v - определяемое значение теплоемкости,

C_0 - теплоемкость пустого калориметра,

Все единицы представлены в Международной системе (SI).

Тепловой эквивалент калориметра был определён по воде [13], т.е с использованием стандартного вещества с хорошо изученной теплоёмкостью, в интервале температур

T=30-200ºC. При этом учитывалась теплоемкость материала калориметра. Для нашего случая постоянная калориметра описывалась уравнением:

$C_0 = 77{,}48 + 0{,}12\ T$

где T - температура К, теплоемкость Дж · $К^{-1}$.

Измерения теплоемкости проводились по квазиизохорам методом непрерывного нагрева. Такой метод позволяет с высокой точностью найти температуру фазового перехода T_S системы, т.е. определить T_S - ρ_S данные на кривой сосуществования фаз, измерить величину скачка ΔC_V и получить надежные данные C_V в различных фазовых состояниях.

Метод позволяет определить изохорную теплоёмкость в двухфазной, однофазной областях и на кривой фазового равновесия. Оценка точности эксперимента по температуре ±10мК, удельного объёма ±0,1%, теплоёмкости 0,8-1% со стороны жидкости и 1,5-3,5% со стороны паровых изохор.

Водные растворы хлорида магния готовили на основе оксида магния (MgO) марки чда, действием соляной кислоты (HCl), по уравнению реакции:

$$MgO + 2HCl = MgCl_2 + H_2O$$

Концентрацию раствора контролировали рефрактометром марки ИРФ-22 по показателю преломления.

Обсуждение результатов. Для ввода и обработки данных, а также упрощения расчётов, нами была написана программа Heat Capacity. Программа написана на языке Python версии 2.6 для использования на компьютерах с операционными системами Windows, Linux, Mac [14].

Главное окно программы состоит из окна графика и окон ввода и вывода данных. В окне ввода данных вводятся константы C_0, E, и т д. При нажатии на кнопку «Старт» запускается таймер. При достижении требуемого значения E на шкале прибора «Компаратор напряжения Р3003» нажимается кнопка «Стоп» и вводятся текущие данные напряжения и тока на внутреннем нагревателе 5 (рисунок 2), после чего при нажатии на кнопку «Ввод» данные и результаты вычисления значения C_V отображаются в окне графика и окне вывода. Работа была предпринята с целью автоматизации получения и расчёта экспериментальных данных изохорной теплоёмкости на основе прибора «Вольтметр универсальный В7-78/1».

Исследован 1% водный раствор хлористого магния по изохорам: $V^{'}$ = 1.044 $см^3$/г;

$V^{'}$ = 1.1114 $см^3$/г; в интервале температур соответственно: T = 93,12 - 106,93ºC;

T = 92,20 – 161,98ºC. Получено более 600 точек, результаты представлены в виде рисунков.

При переходе раствора из двухфазного состояния в однофазное, изохорная теплоёмкость претерпевает скачок, что ясно отмечено на рисунках 3 и 4.

Результаты исследования изохорной теплоёмкости в зависимости от температуры описаны аналитическими зависимостями:

1. $V^{'}$ = 1.0441 $см^3$/г; y = 0.191x - 13.61
2. $V^{'}$ = 1.1114 $см^3$/г; y = 0.003x + 3.768

где : y – $C_v^{дф}$ (кДж/кг·град), x - температура (ºC).

для сравнения C_p [13] аналитически можно описать:

$$y = 0.0016x + 3.931$$

где : y – C_p (кДж/кг·град), x - температура (ºC), температурный интервал

T = 80 – 200 ºC.

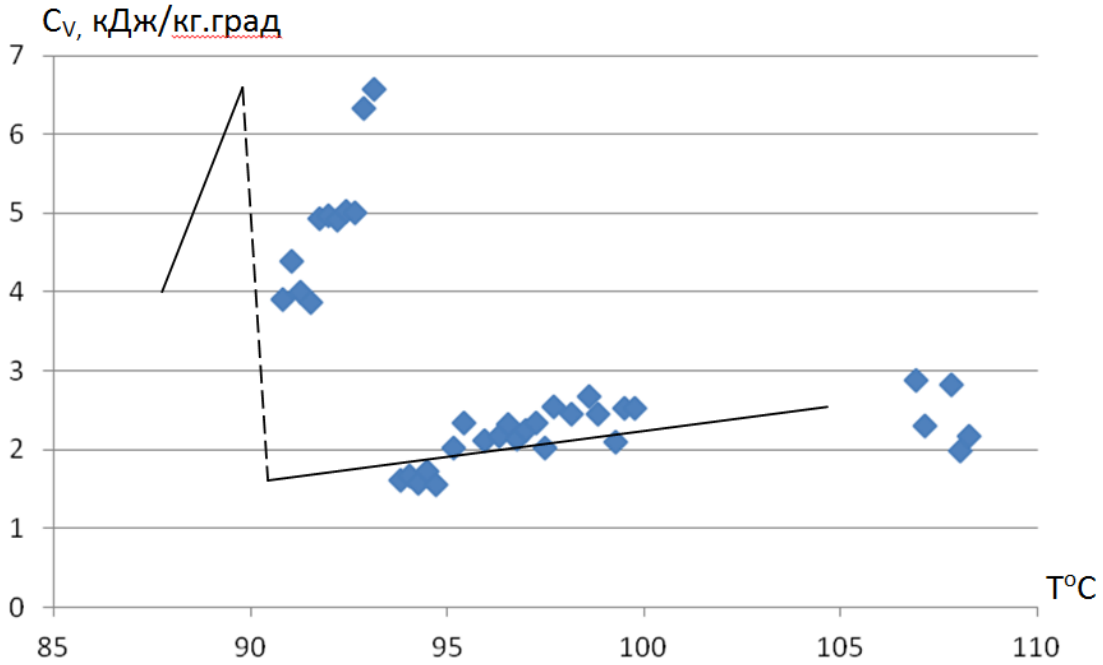


Рис. 3. Температурная зависимость C_V : ♦ - 1% водный раствор $MgCl_2$ ($V^{'}$ = 1,0441 см^3/г).

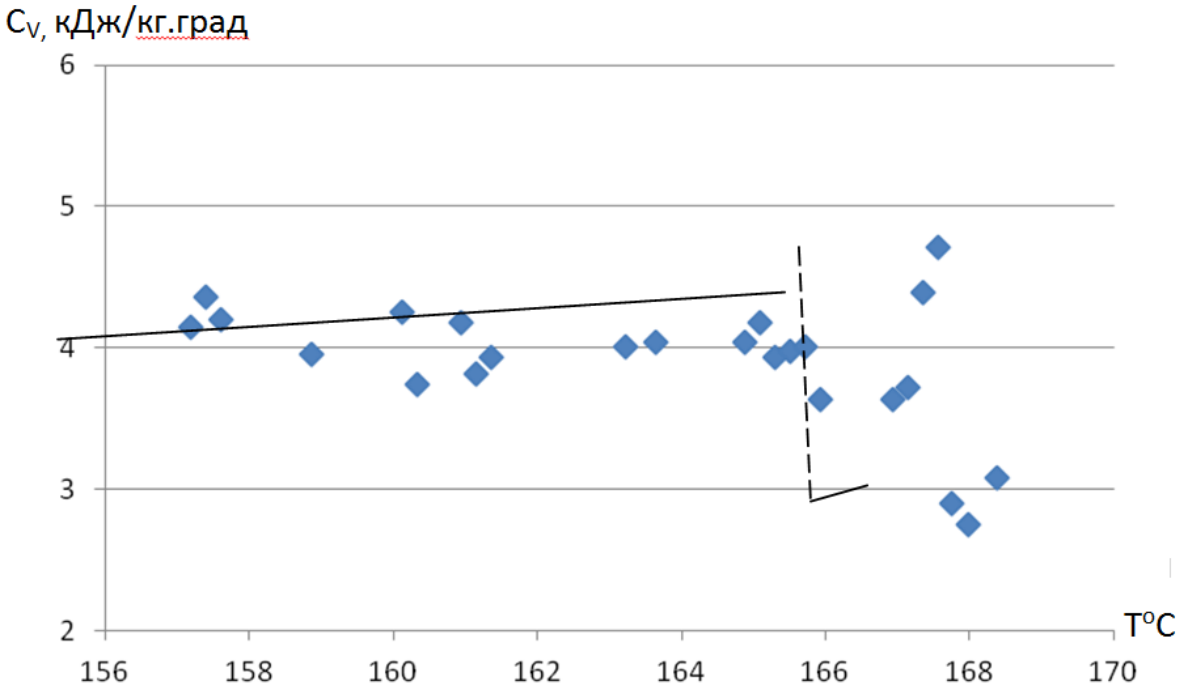


Рис. 4. Температурная зависимость C_V : ♦ - 1% водный раствор $MgCl_2$ ($V^{'}$ = 1,1114 см^3/г).

Практическое значение этих исследований определяется развитием химической промышленности, энергетики, созданием различных тепловых установок и аппаратов, а также развитием теории жидкого состояния и фазового равновесия водно-солевых систем.

Полученные данные изохорной теплоёмкости водных растворов хлористого магния сравнивались с данными по воде и водным растворам NaCl и NaOH, полученными ранее, которые могут быть представлены как модель геотермальной и морской воды [16].

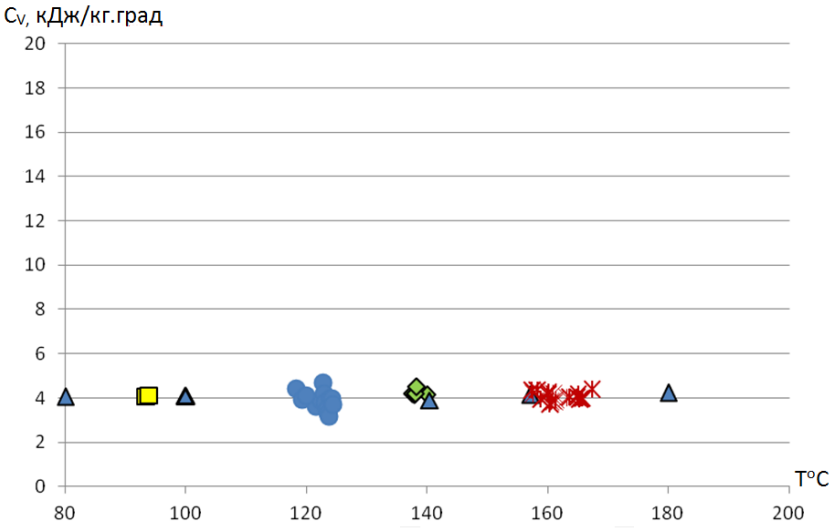


Рис. 5. Температурная зависимость C_V, C_p водного раствора $MgCl_2$: ● - 1 % водный раствор $MgCl_2$ ($V^{'}$ = 1,0441 см^3/г); ■ – на основе методики [14] ($V^{'}$ = 1,0441 см^3/г); ▲ - C_p [15]; ♦, ж - 1 % водный раствор $MgCl_2$ ($V^{'}$ = 1,1114 см^3/г).

Заключение

1. Анализ данных, полученных экспериментально, в результате расчёта, показывает, что учёт температурной зависимости таких параметров как плотность и теплоёмкость при расчётах существенно влияет на значения критерия эффективности при решении оптимизационных задач, которые необходимо учитывать, ибо в противном случае погрешность вычислений может составить десятки процентов, что недопустимо при проведении количественных расчётов.

2. Установлено, что существуют оптимальные режимы эксплуатации и оптимальные параметры различных геотермальных систем, которые однозначно зависят от параметров и геотермических условий конкретного месторождения [6,17].

Литература:

1. *Свалова В.Б.* Геотермальная энергетика в России./ Материалы Международной научно-практической конференции. «GEONERGY». Грозный.2015. С.290-302.
2. *Макаров А.А., Фортов В.Е.* Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России // Вестник Российской академии наук. 2004. Т.24. №3. С. 195-208.
3. *Безруких П.П.* Зачем России возобновляемые источники энергии // Энергия: экономика, техника, экология. 2002. №10. С.2-8.
4. Типы и мощности геотермических установок. Warme und Strom aus der Tiefe. Shuiz Anja. Sonne Wind und Wind und Warme. 2001. №4. P.71-73 (Нем.).
5. *Поваров О.А., Томаров Г.В.* Всемирный геотермальный конгресс // Теплоэнергетика. 2001. №2. С.74-77.
6. *Джаватов Д.К., Дворянчиков В.И.* Температурная зависимость термодинамических параметров геотермальных флюидов в задачах оптимизации геотермальных систем. // Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки. (Приложение). 2006. №3. С.69.73.
7. *Дворянчиков В.И., Абрамова Е.Г., Абдурашидова А.А.* Изохорная теплоёмкость водных растворов Na_2CO_3 вблизи линии фазового равновесия // Теплофизика и аэромеханика. Новосибирск. СО РАН. 2000. Т.7. №4. С. 573-579.
8. *Абдулагатов И.М., Дворянчиков В.И.* Изохорная теплоёмкость бинарных систем $NaOH+H_2O$ и $KOH+H_2O$ вблизи критической точки чистой воды. // Геохимия. Наука. 1994. №1. С.101-110.
9. *Абдулагатов И.М., Дворянчиков В.И.* Термодинамические свойства геотермальных флюидов. // Геохимия. Наука. 1995. №5. С.612-620.

10. *Abdulagatov I.M., Dvoryanchikov V.I., Kamalov A.N.* Measurements of the heat capacity at constant volume of H_2O and (H_2O+ KNO_3) // J. Chem. Thermodynamics. 1997. V.29. P.1387-1407.
11. *Дворянчиков В.И.* Термодинамические свойства и фазовые равновесия водных растворов электролитов. Махачкала. 2016. 292с.
12. *Дворянчиков В.И., Джаватов Д.К., Шихахмедова Д.П.* Изохорная теплоёмкость водных растворов хлористого кальция. // Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки. 2015. №3. С. 93-97.
13. *Амирханов Х.И., Степанов Г.В., Алибеков Б.Г.* Изохорная теплоёмкость воды и водяного пара. Махачкала. 1969. 216с.
14. *Дибиров Я.А., Искендеров Э.Г., Алиев М.М.* Установка ДТА с аналогово-цифровым преобразователем. / XIV Международная конференция по термическому анализу и калориметрии в России (RTAC-2013). Санкт-Петербург. Россия. 23-28 сентября 2013. С. 397-404.
15. *Senay Likke and LeRoy A. Bromley.* Heat Capacities of Aqueous NaCl, KCl, $MgCl_2$, $MgSO_4$ and Na_2SO_4, Solutions Between 80° and 200°C. // Journal of Chemica and Engineering Data. 1973. Vol. 18. №2. P. 189-195.
16. *Дворянчиков В.И.* Термодинамические свойства геотермальных флюидов используемых в теплоэнергетике. / Материалы научного симпозиума «Механизмы участия воды в биоэлектромагнитных эффектах». Москва.2013. С.133-138.
17. *Дворянчиков В.И., Джаватов Д.К.* Температурная зависимость термодинамических параметров геотермальных флюидов применительно к задачам оптимизации геотермальных систем. // Труды Института геологии ДНЦ РАН. 2009. №55. С 186-188.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ВОДА–н-ГЕКСАН

Базаев А.Р., Базаев Э.А., Джаппаров Т.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; email: timur507@mail.ru

Приведены значения параметров фазовых превращений в системе вода–н-гексан, определенны области трехфазного жидкость-жидкость-пар, жидкость-жидкость, жидкость-пар и жидкость-сверхкритический флюид для различных значений концентрации x воды в мольных долях (0.19–0.48). p,ρ,T,x-зависимость системы состава $x\approx0.2$ и $x\approx0.3$ в сверхкритическом состоянии описана полиномиальным уравнением состояния в виде разложения фактора сжимаемости $Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j$ со средней относительной погрешностью 0.3 %.

Основной носитель геотермальной энергии–минерализованная высокотемпературная вода, находится в земной коре под давлением и в силу этого содержит в растворенном виде компоненты нефти и газов, а также примеси других веществ, т.е. является многокомпонентной и многофазной системой [1-3]. Одной из простейших моделей природных флюидов является система вода–углеводород. Вода (полярный компонент) и жидкие углеводороды (неполярные компоненты) при нормальных температуре и давлении практически нерастворимы друг в друге. Только значительное повышение температуры увеличивает взаимную растворимость воды и углеводородов и способствует образованию концентрированных жидких и газообразных растворов. В аналогичных термобарических условиях протекают ряд процессов нефтехимии и химической технологии [4], а также процессы новых технологий типа сверхкритического водного окисления [5].

Особый интерес для теории растворов представляет исследование термодинамического поведения системы вода–н-гексан, позволяющее судить о силах взаимодействия полярных молекул с неполярными, молекул, отличающихся по форме и размерам [6,7]. Как видно из рис.1, величина давления пара н-гексана на линии насыщения при температурах до критической (507.82 К) близка к давлению насыщенного пара воды, и критическая точка н-гексана лежит на линии насыщения воды.

Вышеизложенным объясняется большой интерес исследователей к углубленному изучению свойств систем вода–углеводород, в частности, и системы вода–н-гексан при различных термобарических условиях.

Подробные сведения о литературных источниках, посвященных исследованию свойств системы вода–н-гексан, можно найти в Архиве Научно Исследовательского Центра Термодинамики Национального института стандартов и технологий США (TRC/NIST) [8]. Большинство из этих источников посвящено исследованию взаимной растворимости воды и н-гексана и фазовым равновесиям [9-18]. В работах [9,10] исследована взаимная растворимость н-гексана и воды при давлении трехфазового равновесия и температурах до критического значения температуры н-гексана 507.82 К. Ряд работ посвящены исследованию фазовых превращений в системе вода-н-гексан для различных составов [12-15]. В этих работах приводятся значения параметров верхней конечной критической точки (ВККТ), в которой сосуществуют все три фазы: углеводородная жидкость, водная жидкость и пар. Автор работы [13] приводит значения параметров ВККТ: T=496,4 К, p=5,282 МПа, а в работах [16-18] приводятся значения критических температуры и давления для состава системы x>0,8 мольных долей воды. Критические свойства системы вода–н-гексан исследованы также авторами работ [19,20].

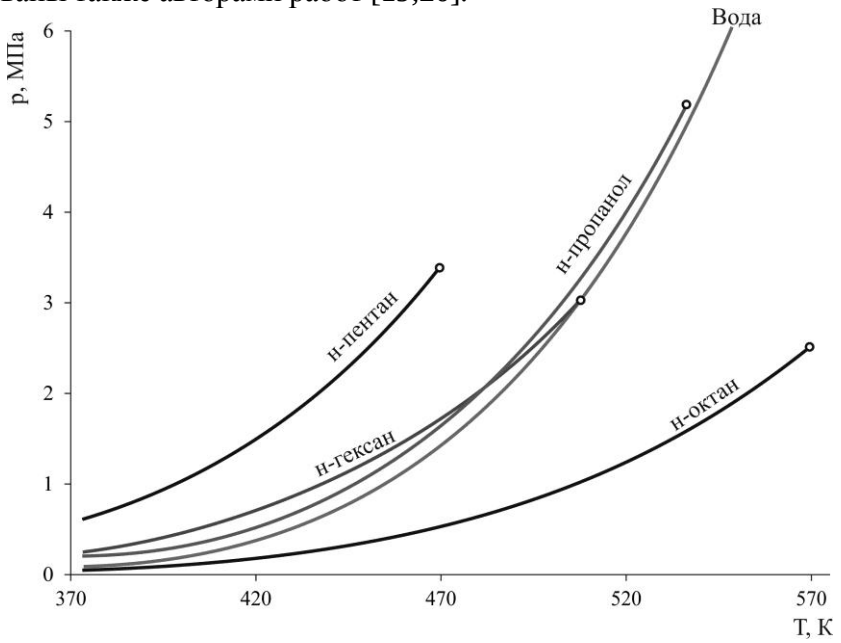


Рис. 1 Зависимость давления от температуры на линии насыщения вдоль критических изохор:

1 – н-пропанол ($T_к$=536.85 К, $p_к$=5.05 МПа, $\rho_к$=273 кг/м^3); 2 – н-гексан ($T_к$=507.82 К, $p_к$=3.034 МПа, $\rho_к$=233.18 кг/м^3); 3 – н-пентан; 4 – н-октан; 5 – вода

Результаты p,ρ,T,x-измерений системы вода–н-гексан в сверхкритической области, выполненные нами ранее, приведены в [21-30].

Несмотря на наличие достаточно большого количества литературных данных о системе вода–н-гексан, возникла необходимость в исследовании фазовых превращений этой системы на нашей усовершенствованной пьезометрической установке методом сжимаемости. Результаты исследования системы вода–н-гексан вместе с полученными ранее нами экспериментальными данными о p,ρ,T,x-зависимостях систем вода–н-пропанол [31] и н-проанол–н-

гексан [32] легли в основу проводимых в настоящее время плановых *p,ρ,T,x*-измерений более сложной системы, состоящей из воды, н-пропанола и н-гексана.

Описание экспериментальной установки и методики проведения *p,ρ,T,x*-измерений даны в работе [33].

Полученная фазовая диаграмма системы вода–н-гексан в *p,T*-плоскости в исследованном диапазоне температур и давлений (рис.2) напоминает по форме фазовую диаграмму индивидуального вещества и гомогенной системы, особенно для значений плотности значительно больше ($\rho>>\rho_к$) и меньше ($\rho<<\rho_к$) критического значения. В этом диапазоне значений плотности зависимость давления от температуры почти линейная, как у индивидуального вещества, т.е. имеют место фазовые превращения Ж-Ж-П в Ж-Ж ($\rho>>\rho_к$) и Ж-П ($\rho<<\rho_к$). При определенных значениях плотности ($\rho>\rho_к$) изохоры кроме фазовых превращений Ж-Ж-П→Ж-Ж испытывают второй излом, т.е. фазовые превращения Ж-Ж→СКФ (сверхкритический флюид). Значения параметров фазовых превращений приведены в таблице 1, а в таблице 2 приведены экспериментальные *p,ρ,T,x*-зависимости в сверхкритической области состояния.

Как видно из рис.4,5, взаимозависимость между *p,ρ,T* системы состава 0.2 и 0.3 мольных долей воды представляет собой гладкую поверхность. Поэтому экспериментальные данные системы постоянного состава с достаточно высокой средней относительной погрешностью (0.3%) описывает полиномиальное уравнение состояния – разложение фактора сжимаемости *Z* в ряды по степеням приведенных плотности и температуры:

$$Z = p/RT\rho_m = 1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j, \text{ откуда } p = RT\rho_m\left[1+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i/\tau^j\right],$$

Здесь: ρ_m – молярная плотность (моль/м^3); $\omega=\rho/\rho_0$, $\tau=T/T_0$ – приведенная плотность и приведенная температура соответственно; ρ_0 =250 кг/м^3 T_0 =500 К; *R*=8.314 Дж/(моль·К) – универсальная (молярная) газовая постоянная; a_{ij} –коэффициенты. Коэффициенты уравнения (таблица 3) определены методом наименьших квадратов [34,35]

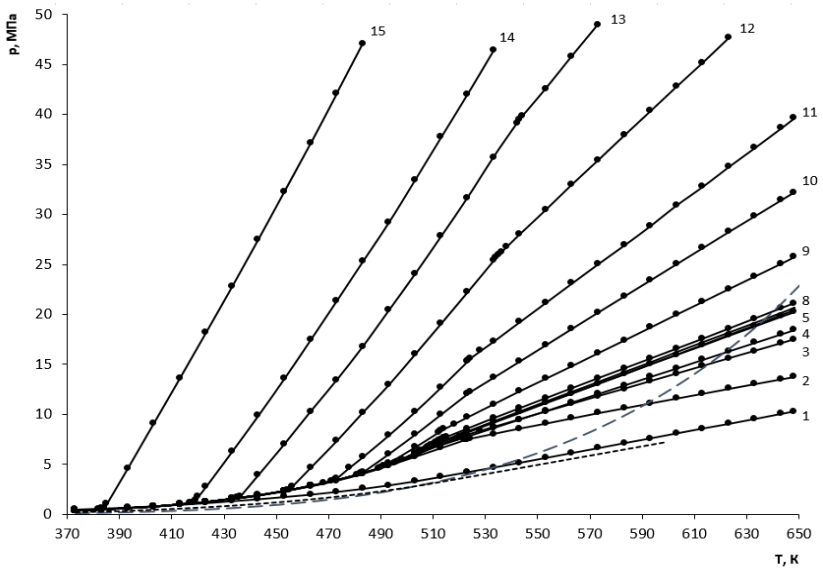


Рис. 2. Зависимость давления от температуры в системе вода–н-гексан состава x (мольные доли воды) вдоль изохор ρ (кг/м^3): – – – вода; - - - н-гексан; 1–x=0.0600, ρ=231.313; 2 – x=0.4, ρ=200.8; 3 – x=0.3107, ρ=270.281; 4–x=0.2574, ρ=295.178; 5–x=0.2612, ρ=313.206; 6–x=0.2454, ρ=318.866; 7–x=0.2493, ρ=320.476; 8–x=0.2802, ρ=316.256; 9–x=0.2482, ρ=361.001; 10–x=0.2368, ρ=399.364; 11–x=0.2206, ρ=429.393; 12–x=0.2155, ρ=467.490; 13–x=0.2799, ρ=504.703; 14–x=0.2333, ρ=531.210; 15–x=0.1902, ρ=571.533.

Таблица 1.

Экспериментальные значения параметров ФП

Ж$_1$-Ж$_2$-П→Ж$_1$-Ж$_2$				Ж$_1$-Ж$_2$→СКФ				Ж$_1$-Ж$_2$-П→СКФ			
x,м.д.	Т, К	р,МПа	ρ, кг/м^3	x,м,д,	Т,К	р,МПа	ρ, кг/м^3	x,м,д,	Т, К	р,МПа	ρ, кг/м^3
0,190	384,15	0,532	572,75	0,219	543,15	39,496	502,67	0,249	513,15	7,259	320,47
0,233	418,25	1,149	532,12	0,216	534,15	25,685	469,61	0,245	511,15	6,982	318,90
0,219	435,85	1,662	505,90	0,221	523,55	15,411	429,08	0,280	514,15	7,622	316,23
0,216	454,85	2,438	471,76	0,237	523,15	12,091	399,11	0,261	510,15	6,994	313,24
0,221	472,15	3,375	430,31	0,248	513,15	8,382	359,89	0,257	504,95	6,245	295,21
0,237	482,70	4,118	399,99	0,302	527,15	9,7655	330,647	0,311	520,65	7,755	270,20
0,248	490,15	4,695	360,40					0,395	529,45	8,624	233,293
0,302	498,15	5,4283	331,151					0,404	522,8	7,482	191,574
								0,433	526,55	7,746	179,053
								0,481	524,15	7,234	147,712

Таблица 2.

p,ρ,T,x-зависимость и Z однофазного (жидкость, пар) флюида

Т, К	р, МПа	ρ, кг/м^3	Z	Т, К	р, МПа	ρ, кг/м^3	Z	Т, К	р, МПа	ρ, кг/м^3	Z
x=0,060				*x*=0,237				*x*=0,257			
433,15	1,325	232,21	0,1300	543,15	15,293	398,69	0,5949	533,15	8,638	294,79	0,4537
443,15	1,519	232,10	0,1458	553,15	16,922	398,48	0,6467	543,15	9,490	294,64	0,4895
453,15	1,742	231,99	0,1636	563,15	18,562	398,27	0,6972	553,15	10,333	294,50	0,5236
463,15	1,977	231,87	0,1818	573,15	20,194	398,06	0,7456	563,15	11,195	294,35	0,5575
473,15	2,252	231,76	0,2028	583,15	21,803	397,85	0,7917	573,15	12,050	294,20	0,5899
483,15	2,557	231,65	0,2256	593,15	23,410	397,64	0,8361	583,15	12,902	294,05	0,6212
493,15	2,906	231,54	0,2513	603,15	25,029	397,43	0,8796	593,15	13,764	293,91	0,6518
503,15	3,306	231,43	0,2803	613,15	26,635	397,22	0,9213	603,15	14,607	293,76	0,6806
513,15	3,757	231,31	0,3125	623,15	28,252	397,01	0,9620	613,15	15,469	293,61	0,7094
523,15	4,219	231,20	0,3444	633,15	29,832	396,80	1,0003	623,15	16,332	293,47	0,7372
533,15	4,688	231,09	0,3757	643,15	31,419	396,60	1,0377	633,15	17,180	293,32	0,7637
543,15	5,163	230,97	0,4064	648,15	32,212	396,49	1,0559	643,15	18,029	293,17	0,7893
553,15	5,648	230,86	0,4367	*x*=0,245				648,15	18,449	293,10	0,8017
563,15	6,137	230,75	0,4663	508,15	6,658	318,95	0,3432	*x*=0,261			
573,15	6,622	230,64	0,4946	511,15	6,982	318,90	0,3578	510,15	6,994	313,24	0,3600
583,15	7,122	230,52	0,5231	512,15	7,081	318,88	0,3622	513,15	7,295	313,20	0,3733
593,15	7,599	230,41	0,5490	513,15	7,186	318,87	0,3669	523,15	8,267	313,04	0,4151
603,15	8,098	230,30	0,5756	523,15	8,200	318,71	0,4108	533,15	9,245	312,88	0,4558
613,15	8,583	230,19	0,6004	533,15	9,176	318,54	0,4513	543,15	10,215	312,72	0,4946
623,15	9,047	230,07	0,6230	543,15	10,146	318,38	0,4901	553,15	11,156	312,56	0,5306
633,15	9,539	229,96	0,6469	553,15	11,136	318,22	0,5285	563,15	12,096	312,41	0,5655
643,15	10,040	229,85	0,6706	563,15	12,106	318,06	0,5646	573,15	13,059	312,25	0,6001
648,15	10,294	229,79	0,6824	573,15	13,079	317,90	0,5996	583,15	14,010	312,09	0,6331
x=0,216				583,15	14,069	317,74	0,6343	593,15	317,74	311,93	0,6667
535,15	25,980	466,54	0,8948	593,15	15,049	317,58	0,6674	603,15	15,960	311,78	0,6980
536,15	26,243	466,52	0,9022	603,15	15,999	317,42	0,6981	613,15	16,901	311,62	0,7275
538,15	26,754	466,47	0,9164	613,15	16,989	317,26	0,7296	623,15	17,881	311,46	0,7577
543,15	28,029	466,34	0,9515	623,15	17,979	317,10	0,7601	633,15	18,822	311,31	0,7854
553,15	30,488	466,08	1,0169	633,15	18,959	316,94	0,7892	643,15	19,783	311,15	0,8130
563,15	33,018	465,81	1,0823	643,15	19,979	316,78	0,8192	648,15	20,242	311,07	0,8257
573,15	35,448	465,56	1,1423	648,15	20,438	316,70	0,8318	*x*=0,280			
583,15	37,918	465,30	1,2017	*x*=0,248				542,15	39,114	502,70	1,1583
593,15	40,348	465,04	1,2578	513,15	8,382	359,99	0,3780	543,15	39,497	502,67	1,1676
603,15	42,801	464,78	1,3129	514,15	8,519	359,97	0,3835	544,15	39,801	502,64	1,1745
613,15	45,191	464,52	1,3643	518,15	9,040	359,89	0,4038	553,15	42,576	502,38	1,2365
623,15	47,682	464,26	1,4172	523,15	9,705	359,80	0,4295	563,15	45,819	502,08	1,3079
x=0,221				533,15	11,020	359,61	0,4788	573,15	48,976	501,79	1,3744
524,15	15,588	429,07	0,5931	543,15	12,326	359,43	0,5260	*x*=0,280			
528,15	16,352	428,97	0,6176	553,15	13,587	359,24	0,5696	513,15	7,476	316,25	0,3717
533,15	17,294	428,86	0,6472	563,15	14,842	359,06	0,6115	514,15	7,622	316,23	0,3782
543,15	19,244	428,63	0,7073	573,15	16,134	358,87	0,6535	515,15	7,726	316,21	0,3827
553,15	21,175	428,40	0,7646	583,15	17,410	358,68	0,6934	523,15	8,569	316,08	0,4181
563,15	23,115	428,16	0,8203	593,15	18,704	358,50	0,7328	533,15	9,609	315,92	0,4603
573,15	25,048	427,93	0,8739	603,15	19,999	358,31	0,7709	543,15	10,609	315,76	0,4991
583,15	26,920	427,70	0,9236	613,15	21,272	358,13	0,8070	553,15	11,608	315,60	0,5365

593,15	28,860	427,47	0,9740	623,15	22,556	357,95	0,8424	563,15	12,608	315,44	0,5727
603,15	30,929	427,24	1,0270	633,15	23,823	357,76	0,8761	573,15	13,608	315,28	0,6076
613,15	32,781	427,01	1,0714	643,15	25,094	357,58	0,9090	583,15	14,587	315,13	0,6404
623,15	34,781	426,78	1,1191	648,15	25,742	357,49	0,9255	593,15	15,567	314,97	0,6723
633,15	36,682	426,55	1,1622	*x*=0,257				603,15	16,561	314,81	0,7037
643,15	38,633	426,33	1,2057	504,95	6,245	295,21	0,3459	613,15	17,547	314,65	0,7338
648,15	39,633	426,21	1,2277	505,15	6,265	295,21	0,3468	623,15	18,566	314,49	0,7644
x=0,237				506,15	6,347	295,19	0,3507	633,15	19,586	314,33	0,7940
524,15	12,219	399,09	0,4921	513,15	6,935	295,09	0,3781	643,15	20,605	314,17	0,8228
533,15	13,667	398,90	0,5414	523,15	7,777	294,94	0,4161	648,15	21,094	314,09	0,8360
x=0,292				*x*=0,395				*x*=0,481			
518,15	8,020	306,51	0,4026	533,15	8,883	233,25	0,5093	583,15	9,666	147,29	0,7229
519,15	8,111	306,50	0,4063	543,15	9,598	233,13	0,5405	593,15	10,039	147,22	0,7385
523,15	8,490	306,43	0,4222	553,15	10,293	233,02	0,5694	603,15	10,430	147,15	0,7549
533,15	9,446	306,28	0,4612	563,15	10,977	232,90	0,5968	613,15	10,803	147,08	0,7695
543,15	10,391	306,13	0,4982	573,15	11,637	232,79	0,6219	623,15	11,164	147,01	0,7829
553,15	11,351	305,97	0,5347	583,15	12,313	232,67	0,6471	633,15	11,528	146,93	0,7960
563,15	12,302	305,82	0,5695	593,15	12,980	232,56	0,6710	643,15	11,891	146,86	0,8087
573,15	13,245	305,66	0,6027	603,15	13,646	232,44	0,6941	648,15	12,072	146,83	0,8149
583,15	14,174	305,51	0,6342	613,15	14,303	232,33	0,7159	0,588			
593,15	15,095	305,35	0,6644	623,15	14,931	232,22	0,7358	534,85	7,494	112,63	0,6896
603,15	16,018	305,20	0,6937	633,15	15,587	232,10	0,7563	535,15	7,504	112,62	0,6902
613,15	16,959	305,05	0,7228	643,15	16,234	231,99	0,7758	536,15	7,541	112,62	0,6923
623,15	17,900	304,89	0,7511	648,15	16,568	231,93	0,7859	543,15	7,777	112,58	0,7050
633,15	18,822	304,74	0,7777	0,404				553,15	8,120	112,53	0,7232
643,15	19,733	304,59	0,8030	522,8	7,482	191,57	0,5268	563,15	8,454	112,47	0,7399
648,15	20,193	304,51	0,8156	523,15	7,504	191,57	0,5280	573,15	8,779	112,42	0,7552
0,302				524,15	7,557	191,56	0,5307	583,15	191,56	112,36	0,7707
528,15	9,879	330,63	0,4461	533,15	8,046	191,48	0,5558	593,15	9,427	112,31	0,7844
533,15	10,441	330,55	0,4672	543,15	8,584	191,38	0,5823	603,15	9,735	112,26	0,7970
543,15	11,579	330,38	0,5088	553,15	9,079	191,29	0,6050	613,15	10,040	112,20	0,8090
553,15	12,726	330,21	0,5494	563,15	9,607	191,20	0,6292	623,15	10,342	112,15	0,8203
563,15	13,853	330,04	0,5878	573,15	10,126	191,10	0,6519	633,15	10,647	112,09	0,8316
573,15	14,951	329,87	0,6236	583,15	10,617	191,01	0,6721	643,15	10,941	112,04	0,8417
583,15	16,041	329,70	0,6579	593,15	11,106	190,92	0,6915	648,15	11,106	112,01	0,8480
593,15	17,194	329,53	0,6937	603,15	11,597	190,82	0,7105	0,708			
603,15	18,292	329,37	0,7261	613,15	12,078	190,73	0,7283	534,15	6,504	73,64	0,7531
613,15	19,400	329,20	0,7579	623,15	12,567	190,64	0,7459	535,15	6,533	73,64	0,7551
623,15	20,567	329,03	0,7910	633,15	13,048	190,54	0,7627	543,15	6,746	73,61	0,7685
633,15	21,685	328,86	0,8212	643,15	13,528	190,45	0,7787	553,15	7,005	73,58	0,7840
643,15	22,783	328,70	0,8498	648,15	13,754	190,41	0,7858	563,15	7,245	73,54	0,7968
648,15	23,370	328,61	0,8652	0,433				573,15	7,485	73,504	0,8092
0,310				526,55	7,746	179,05	0,5599	583,15	7,725	73,469	0,8213
520,65	7,755	270,20	179,04	528,15	7,829	179,04	0,5642	593,15	7,952	73,43	0,8316
521,15	7,794	270,19	179,00	533,15	8,074	179,00	0,5765	603,15	8,170	73,40	0,8406
522,15	7,871	270,18	178,91	543,15	8,579	178,91	0,6016	613,15	8,382	73,36	0,8488
523,15	7,947	270,16	178,82	553,15	9,070	178,82	0,6248	623,15	8,598	73,33	0,8571
528,15	8,332	270,10	178,73	563,15	9,539	178,73	0,6458	633,15	8,815	73,29	0,8652
533,15	8,715	270,03	178,65	573,15	10,011	178,65	0,6663	643,15	9,031	73,26	0,8730
543,15	9,489	269,90	178,56	583,15	10,476	178,56	0,6856	648,15	9,143	73,24	0,8772
553,15	10,267	269,76	178,47	593,15	10,946	178,47	0,7046	0,817			
563,15	11,029	269,63	178,39	603,15	11,411	178,39	0,7227	543,65	6,261	55,03	0,7677
573,15	11,803	269,49	178,30	613,15	11,869	178,30	0,7398	544,15	6,273	55,03	0,7685
583,15	12,538	269,36	178,21	623,15	12,332	178,21	0,7568	553,15	6,480	55,01	0,7813
593,15	13,302	269,22	178,13	633,15	12,804	178,13	0,7737	563,15	6,692	54,98	0,7929
603,15	14,058	269,09	178,04	643,15	13,244	178,04	0,7882	573,15	6,903	54,95	0,8039
613,15	14,822	268,96	178,00	648,15	13,470	178,00	0,7956	583,15	7,112	54,93	0,8145
623,15	15,586	268,82	0,7274	0,481				593,15	7,324	54,901	0,8251
633,15	16,340	268,69	0,7509	524,15	7,234	147,71	0,6002	603,15	7,526	54,88	0,8342
643,15	17,094	268,56	0,7738	525,15	7,281	147,70	0,6030	613,15	7,717	54,85	0,8418
648,15	17,478	268,49	0,7852	533,15	7,647	147,65	0,6240	623,15	7,910	54,82	0,8493
0,395				543,15	8,096	147,58	0,6488	633,15	147,58	54,797	0,8562
529,45	8,624	233,29	0,4979	553,15	8,509	147,50	0,6699	643,15	8,285	54,77	0,8628
530,15	8,671	233,29	0,4999	563,15	8,902	147,43	0,6887	648,15	8,381	54,76	0,8663
531,15	8,742	233,27	0,5031	573,15	9,283	147,36	0,7060				

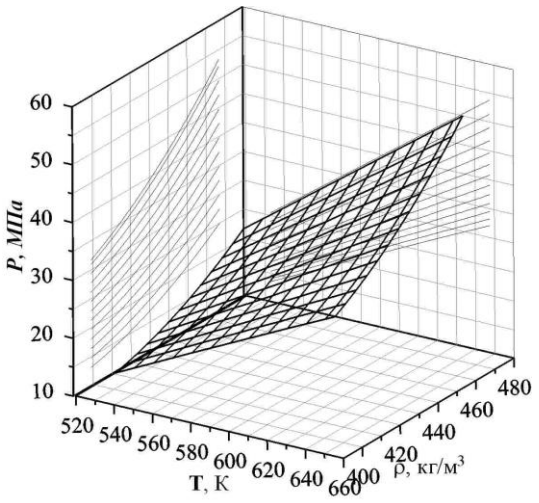


Рис. 4 *p,ρ,T* поверхность системы вода–н-гексан состава *x*=0,2 и ее проекции на *p,ρ*- и *p,T*-плоскости

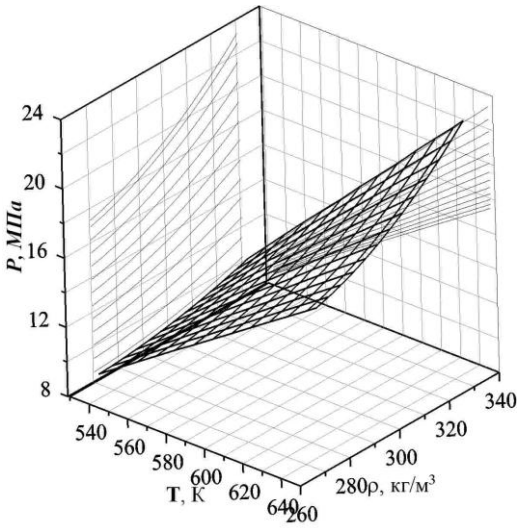


Рис. 5 *p,ρ,T* поверхность системы вода–н-гексан состава *x*=0,3 и ее проекции на *p,ρ*- и *p,T*-плоскости

Таблица 3.

Коэффициенты уравнения

вода–н-гексан	
x=0.2	*x*=0.3
a_{10}= 4.85258903185046100	a_{10}= -29.76922446854098000
a_{11}= -0.46384256948391184	a_{11}= -10.30771571642623600
a_{20}= -7.66222763189313800	a_{20}= 143.01262117534682000
a_{21}= -0.22879608319802974	a_{21}= 21.45435857598701000
a_{30}= 2.25230057626438200	a_{30}= -261.50912851276250000
a_{31}= -0.04627159154018181	a_{31}= -15.82755216324389600
a_{40}= 2.08139937413110500	a_{40}= 230.58250815397260000
a_{41}= 0.01847836826856547	a_{41}= 3.78327887954102600
a_{50}= -1.35446210304787500	a_{50}= -98.88645619986596000
a_{60}= 0.22325211864406780	a_{60}= 16.65740740740500

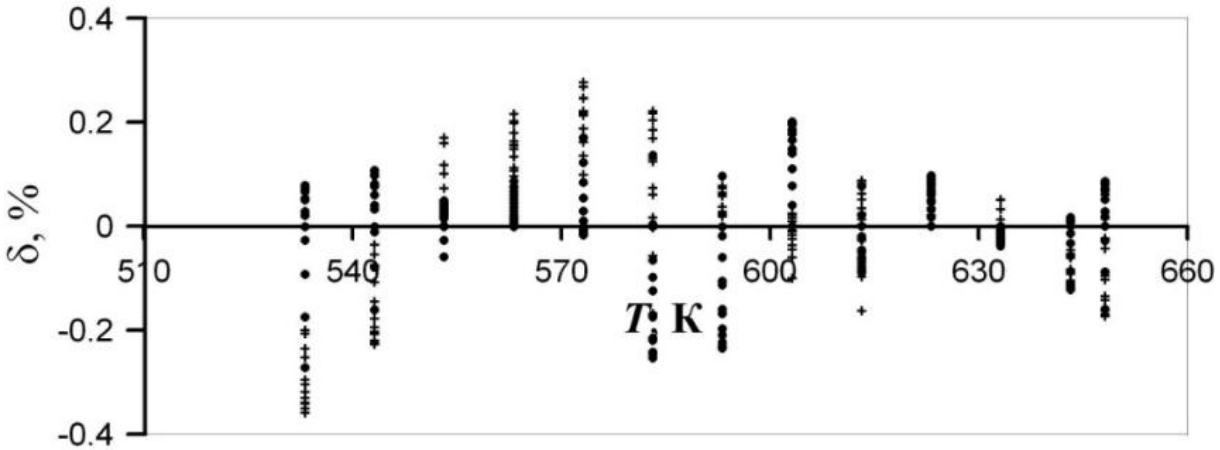


Рис. 6. Относительное отклонение рассчитанных значений давления по уравнению от экспериментальных для системы вода–н-гексан в сверхкритической области: ≈0,2 (●), ≈0,3 (+).

Литература:

1. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений. -М.: Недра. -1989. -299с.
2. Намиот А.Ю. Растворимость газов в воде. –М.: Недра, 1991. –167 с.
3. Валяшко В.М. Фазовые равновесия и свойства гидротермальных систем. -М.: Наука, 1990. –270 с.
4. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: Ч 1. Пер. с англ. –М.: Мир, 1989. –304 с.
5. Леменовский Д.А., Баграташвили В.Н. Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии // Соросовский образовательный журнал. 1999. №10. С. 36-41.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие /Пер. с анг. под. ред. Соколов Б.И. - 3-е изд., перераб. и доп. -Л.: Химия, 1982. -592 с., ил. - Нью-Йорк, 1977.
7. Смирнова Н.А. Молекулярная теория растворов. Букинист. 1987. 336 с.
8. M. Frenkel, R. Chirico, V. Diky, C.D. Muzny, A. Kazakov, J.W. Magee, I.M. Abdulagatov, Jeong Won Kang, NIST ThermoDataEngine, NIST Standard Reference Database 103b- Pure Compound, Binary Mixtures, and Chemical Reactions, Version 5.0, National Institute Standards and Technology, Boulder, Colorado-Gaithersburg, MD, 2010.
9. Tsonopoulos. C.; Wilson, G. M. High-Temperature Mutual Solubilities of Hydrocarbons and Water. Part I: Benzene, Cyclohexane and n-Hexane. AIChE J., 1983, 29, 990-999.
10. Rebert C. J.; Hayworth, K. E. The Gas and Liquid Solubility Relations in Hydrocarbon-Water Systemsю AIChE J., 1967, 13, 118-121
11. Marche, C.; Ferronato, C.; Jose, J. Solubilities of n-Alkanes (C6 to C8) in Water from 30 0C to 180 0C. J. Chem. Eng. Data, 2003, 48, 967-971
12. De Loos, T. W.; Penders, W. G.; Lichtenthaler, R. N. Phase equilibria and critical phenomena in fluid (n-hexane+water) at high pressures and temperatures J. Chem. Thermodyn., 1982, 14, 83-91
13. Brunner E. Fluid mixtures at high pressures. Phase separation and critical phenomena in 23 (n-alkane+water) mixtures // J. Chem. Thermodynamics. –1990. –V. 22. -P. 335-353.
14. Orakova S.M., Rasulov S.M., Abdulagatov I.M. Experimental Study Of The Pvtx Relationship, L-L-V And L-V Phase Boundary Of N-Hexane + Water Mixtures Near The Upper And Lower Critical Lines // Physics and Chemistry of Liquids. 2014. Т. 52. № 1. С. 130-198.
15. Pereda, S.; Awan, J. A.; Mohammadi, A. H.; Valtz, A.; Coquelet, C.; Brignole, E. A.; Richon, D. Solubility of hydrocarbons in water: Experimental measurements and modeling using a group contribution with association equation of state (GCA-EoS) Fluid Phase Equilib., 2009, 275, 52-59.
16. Burd, S. D.; Braun, W. G. Vapor-liquid equilibria of some C6 hydrocarbons with water Proc. - Am. Pet. Inst., Div. Refin., 1968, 48, 464-76.
17. Razzouk, A.; Naccoul, R. A.; Mokbel, I.; Duchet-Suchaux, P.; Jose, J.; Rauzy, E.; Berro, C.Liquid-Liquid Equilibria for Monoethylene Glycol + Hexane and 2,2,4-Trimethylpentane, Water + Hexane and 2,2,4-Trimethylpentane, Monoethylene Glycol + Water + Hexane, and Monoethylene Glycol + Water + 2,2,4-Trimethylpentane in the Temperature Range between T = 283.15 K and T = 323.15 K. J. Chem. Eng. Data, 2010, 55, 1468-1472.
18. Yi-Ling, T.; Michelberger, T.; Franck, E. U. High-pressure phase equilibria and crictical curves of (water+butane) and (water+n-hexane) at temperatures of 700K and pressures to 300MPa. J. Chem. Thermodyn., 1991, 23, 105-12.
19. С.М. Расулов, С.М. Оракова, P,ρ,T-свойства и фазовое равновесие системы вода–н-гексан с малым содержанием воды // ТВТ. 2013. Т.51, в.1, С.67–72.
20. Расулов С.М. Фазовое равновесие в бинарной системе вода+н-гексан // ЖФХ. 2000. Т.73. №2. С.203-206.

21. Базаев А.Р., Намиот А.Ю. Скрипка В.Г. Объемное свойства газовых растворов водяного пара с н-гексаном и н-октаном // Журнал физической химии, Т. 49, вып. 5, 1975, с. 1339
22. Абдулагатов И.М. Bazaev A.R., Рамазанова А.Э. p,ρ,T,x-свойства и вириальные коэффициенты бинарной системы вода–н-гексан //Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30. № 5. С. 897-907.
23. Абдулагатов И.М. Bazaev A.R., Рамазанова А.Э. Избыточные термодинамические функции бинарных систем вода+ углеводород в сверхкритических условиях // Жур. Прикладной Химии. 1993, Т.66, Вып.9, С. 2012-2018.
24. Abdulagatov I.M. Bazaev A.R., Ramazanova A.E. PVTx Properties and Virial Coefficients of the Water-N-Hexane System // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1994. V.98. P. 1596-1600.
25. Abdulagatov I.M. Bazaev A.R., Gasanov R.K. Ramazanova A.E. Measurements of the PVT Properties and Virial Coefficients of Pure Water, Methane, N-Hexane, N-Octane, Benzene and Their Aqueous Mixtures in the Critical Region // J. Chem. Thermodynamics 1996. V.28. P. 1037-1057.
26. Абдулагатов И.М., Базаев А.Р., Базаев Э.А., Саидахмедова М.Б. Исследование межмолекулярных взаимодействий и микроструктуры сверхкритической смесей вода+н-гептан и вода+н-гексан на основе PVTx измерений // Журн. Структурной Химии. -1997.
27. Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Saidakhmetova M.B. Study of Intermolecular Interactions and Microstructure of Supercritical Mixtures Water+N-Heptane and Water+N-Hexane Based On Pvtx Measurements // Journal of Structural Chemistry. 1998. Т. 39. № 1. С. 60-69.
28. Abdulagatov I.M., Bazaev E.A., Bazev A.R., Rabezkii M.G. Pvtx Measurements for Dilute Water + N-Hexane Mixtures in The Near-Critical and Supercritical Regions// The Journal of Supercritical Fluids. 2001. Т. 19. № 3. С. 219-237.
29. Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Kultaeva U.E., Rabetskii M.G. Thermodynamic Properties of Aqueous Solutions of Alkanes Under Supercritical Conditions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2002. Т. 36. № 2. С. 145-148.
30. Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Magee J.W., Kiselev S.B., Ely J.F. Pvtx Measurements and Crossover Equation of State of Pure N-Hexane and Dilute Aqueous N-Hexane Solutions in The Critical and Supercritical Regions // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2005. Т. 44. № 6. С. 1967-1984.
31. Базаев Э.А., Базаев А.Р. Фазовые превращения в двойных системах вода–алифатический спирт // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 2. С. 253.
32. Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Dzhapparov T.A. Pvtx Properties of the Binary 1-Propanol+N-Hexane Mixtures in The Critical and Supercritical Regions // Journal of Molecular Liquids. 2016.
33. Базаев Э.А., Базаев А.Р., Карабекова Б.К. Фазовые превращения (жидкость–пар) и критические свойства смеси н-пропанол-н-пентан // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 21. С. 89-92.
34. *Сычев В.В., Вассерман А.А. и др.* Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов. 1977. 352 с.
35. *Вукалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.* ТВТ. 1967. Т.5. №2. С.265.

ФРАКТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЫ

Магомедов Р.А.[1,*], Мейланов Р.Р.[1], Ахмедов Э. Н.[1],
Бейбалаев В.Д.[1,2], Аливердиев А.А. [1,2]

[1] *Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, пр. Шамиля, 39, Махачкала, Россия*
[2] *Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*
* *ramazan_magomedov@rambler.ru*

В рамках проведения обобщения термодинамики в формализме производных дробного порядка получено однопараметрическое «фрактальное» уравнение состояния с учетом второго вириального коэффициента. В докладе приводятся расчеты теплофизических параметров водяного пара, в том числе в околокритической области.

В основе традиционной статистической физики и термодинамики лежит гипотеза молекулярного хаоса, в свою очередь, основывающаяся на постулировании близкодействия молекул и отсутствия «памяти» в актах столкновений частиц [1]. Однако можно определить достаточно большой круг физических систем, для которых такие условия не выполняется, в частности, фрактальные и самоорганизующихся структуры. Это создает физические предпосылки необходимости обобщения традиционной термодинамики Карно, Клаузиуса и Гельмгольца для равновесной термодинамики.

В настоящее время можно выделить два основных направления такого обобщения. В основе первого направления лежит использование принципа максимума энтропии, впервые предложенного Джейнсом [2]. В этом случае принцип максимума энтропии, исходя из выражения энтропии Больцмана–Гиббса–Шеннона, приводит к каноническому экспоненциальному распределению. Для получения класса неканонических степенных распределений обычно исходят из обобщенных выражений для энтропии. Второе направление обобщения неравновесной термодинамики основано на невыполнении принципа локального равновесия для фрактальных структур [3].

Переход от обычных производных к производным дробного порядка [4] представляет собой один из естественных способов учета принципа локального неравновесия. Реализуя его на основе экспериментально измеренных значений *P,V,T* и полученного однопараметрического «фрактального» уравнения состояния можно определить значение показателя производной дробного порядка □ по термодинамическим параметрам и далее рассчитать термодинамические характеристики пользуясь полученными аналитическими выражениями. Это позволяет естественным образом учесть нелокальные эффекты в термодинамических процессах. Причем переход к традиционной термодинамике Карно, Клаузиуса и Гельмгольца получается в частном случае, когда показатель производной дробного порядка равен единице, что и было исследовано в наших недавних работах [5-8].

В докладе приводится однопараметрическое «фрактальное» уравнение состояния с учетом второго вириального коэффициента *B*, на основе которого проведен расчет теплофизических параметров: энтропии и изохорной теплоемкости C_V для воды и водяного пара в широком диапазоне температур, в том числе на линии насыщения:

$$P = \rho R_{\tilde{A}} T \left\{ 1 + \rho B + (1-\alpha) \cdot \left[\ln\left(\frac{eM}{\rho N_A} \left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2} \right]^{3/2} \right) + \psi(1) - \psi(2-\alpha) - \rho B \right] \right\} \quad (1)$$

$$S = R_{\tilde{A}} \left\{ \ln\left[\frac{e\grave{I}}{\rho N_A} \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \right] + \frac{3}{2} \left[\frac{1}{2-\alpha} + \psi(2) - \psi(3-\alpha) \right] \right\} -$$

$$-R_{\tilde{A}}\frac{\rho}{\grave{I}}\left\{b-(1-\alpha)\frac{5-2\alpha}{(2-\alpha)(3-\alpha)}\frac{a}{N_A kT}\right\}, \qquad (2)$$

$$C_V=\frac{3}{2}\frac{R_{\Gamma}}{\Gamma(2-\alpha)}\left\{1-\frac{18P_c b^2}{N_A kT}+(1-\alpha)\times\right.$$

$$\left.\times\left[\ln\left(\left(\frac{eM}{\rho N_A}\right)^{2/3}\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right)-1-\rho b\left(\frac{2}{3}-\frac{18P_c b^2}{N_A kT}\right)\right]\right\} \qquad (3)$$

где PP – давление, *Па*; ρ – плотность, *кг/м*^{3}; R_{Γ} – удельная газовая постоянная, *Дж/(кг·К)*, рассчитываемая для каждого вещества из универсальной газовой постоянной R и молярной массы; M – молярная масса, *кг/моль*; N_A=6,022141292·10^{23} *моль*$^{-1}$ – постоянная Авогадро; k=1,3806·10^{-23} *Дж·с* – постоянная Больцмана; $B(T)=b-\frac{a}{kT}$ – второй вириальный коэффициент, a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса, $P_c P$ – критическое давление, *Па*; *Г(х)* – гамма-функция.

Результаты, частично представленные к публикации в рецензируемых журналах [9,10], достаточно хорошо согласуются с табличными данными, что позволяет надеяться на перспективность предлагаемого метода для расчета термодинамических характеристик с использованием единственного параметра – показателя дробного порядка по термодинамическому параметру, вычисленного из фрактального уравнения состояния. Таким образом, имеются все основания полагать, что предлагаемый метод расчета на основе дифференцирования дробного порядка и фрактального уравнения состояния позволяет достоверно определить значения термодинамических характеристик в широком *PV*-диапазоне, включающим околокритические области. Более того, переход к производным дробного порядка по времени и координате не является формальным математическим переходом, а связан с фундаментальными аспектами физики многочастичных систем.

Дальнейшие перспективы видятся в приложении предлагаемого подхода к более высоким температурам и давлениям (до мегабарного диапазона) и применение полученного уравнения состояния к моделированию и анализу экспериментальных данных по ударному лазерному сжатию, аналогичным рассмотренным нами в недавних публикациях [11-18]. Действительно, ввиду важности воды во многих приложениях как энергетики, так и астрофизики и планетологии, изучение свойств ее экстремальных состояний, не теряет актуальности [19].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 16-08-00067а.

Литература:

1. *Боголюбов Н.Н.* Избранные труды по статистической физике. М.: Изд-во МГУ, 1979, 344 с.
2. *Jeynes E.T.* Information Theory and Statistical Mechanics Phys.Rev., **106**, 1957, 620-630
3. *Соболев С.Л.* Локально-неравновесные процессы переноса // УФН, **167**, No. 10, 1997, 1095–1106.
4. *Meilanov R.R., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Magomedov R.A. Ragimkhanov G.B., Aliverdiev A.A.* To the theory of non-local non-isothermal filtration in porous medium // Journal of Physics: Conference Series, 2017 (принято к публ.)
5. *Мейланов Р.П., Магомедов Р.А.* Термодинамика в дробном исчислении, Инженерно-физический журнал, **87**, No. 6, 2014, 1455-1465.
6. *Magomedov R.A., Meilanov R.P., Akhmedov E.N., and Aliverdiev A.A.* Calculation of multi-component compound properties using generalization of thermodynamics in derivatives of fractional order, Journal of Physics: Conference Series, **774**, 2016, 012025.

7. *Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э.Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А.* Фрактальное уравнение состояния и расчет теплофизических характеристик аргона // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки, **32,** No. 1, 2017, 6-11.
8. *Магомедов Р.А., Ахмедов Э.Н., Мейланов Р.Р., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А.* Определение теплофизических свойств одноатомных газов // В сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Магомедову М-К.М. Дагестанский государственный технический университет, 2016, 156-158.
9. *Магомедов Р.А., Мейланов Р.П., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э. Н., Аливердиев А.А.* О фрактальном уравнении состояния на примере воды // Вестник НовГУ, 2017 (принято к публ.)
10. *Magomedov R.A., Meilanov R.R., Meilanov R.P., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., and Aliverdiev A.A.* To the fractal equation of state // Journal of Physics: Conference Series, 2017 (принято к публ.)
11. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R., Vinci T., Benuzzi-Mounaix A., Koenig M., and Malka V.* Coronal hydrodynamics of laser-produced plasmas // Phys. Rev. E, **78**, 2008, 046404.
12. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R. and Vinci T.* Porous carbon EOS: numerical analysis // Radiation Effects and Defects in Solids, **165**, 2010, P. 566-572.
13. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R. and Vinci T.* Carbon equation of state at high pressure: the role of the radiative transport in the impedance mismatch diagnostics // Nukleonika 2011, **56**(2), P. 165-169.
14. *Paleari S., Batani D., Vinci T., Benocci R., Shigemori K., Hironaka Y., Kadono T., Shiroshita A., Piseri P., Bellucci S., Mangione A., & Aliverdiev A.* A new target design for laser shock-compression studies of carbon reflectivity in the Megabar regime // Eur. Phys. J. D **67** 2013, P. 136 (1-10)
15. *Aliverdiev A., Batani D., Dezulian R.*. Influence of a laser profile in impedance mismatch techniques applied to carbon EOS measurement // High Power Laser Science and Engineering, **1**(2), 2013, P. 102–104.
16. *Aliverdiev A., Batani D., Antonelli L., Jakubowska K., Dezulian R., Amirova A., Gajiev G., Khan M., and Pant H.C.* Use of multilayer targets for achieving off-Hugoniot states, Phys. Rev. E. **89,** 2014, 053101.
17. *Paleari S., Batani D., Benocci R., Shigemori K., Hironaka Y., Kadono T., Shiroshita A. and Aliverdiev A.* About carbon reflectivity in the Mbar regime // Phys. Scr. **T161**, 2014, 014018 (1-4)
18. *Aliverdiev A., Batani D., Amirova A., Benocci R., Dezulian R., Krousky E., Pfeifer M., Skala J., Dudzak R., Jakubowska K.,* Shock dynamics induced by double-spot laser irradiation of layered targets // Nukleonika **60** (2), 2015, 213-219
19. *Batani D., Jakubowska K., Benuzzi-Mounaix A.,* et al.. Refraction index of shock compressed water in the megabar pressure range // EPL (Europhysics Letters), **112**, No. 3, 36001

РЕЖИМЫ НАГРЕВА ВОДЫ ПО СТВОЛУ НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Азизов Г.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а; e-mail: gsgms@mail.ru

Рассмотрен квазистационарный режим нагрева закачиваемой в пласт воды по стволу скважины, проанализированы зависимость температуры воды на забое нагнетательной скважины от приемистости пласта и глубины расположения забоя скважины.

Проанализируем зависимость температуры воды на забое нагнетательной скважины от приемистости пласта и глубины расположения забоя скважины, ее исходные предпосылки, оценим ее точность для различных условий приложения. Наибольшей известностью для эксплуатационных скважин пользуется формула А.Ю. Намиота. По истечению нескольких суток после пуска в работу нагнетательной скважины термический режим приобретает медленно и монотонно изменяющийся, квазиустановившийся характер, температура вдоль колонны почти не меняется. Для установившегося после длительной эксплуатации режима температура горной породы удовлетворяет уравнению Лапласа и, пренебрегая вертикальной теплопроводностью из-за большого масштаба вдоль вертикали, радиальный профиль температуры в горной породе можно принять логарифмическим

$$T(r,z) = T_c(z) + [T_г(z) - T_c(z)] \cdot \frac{ln(r / r_c)}{ln(r / r_T)}, \qquad (1)$$

где z - вертикальная координата, абсолютная глубина в метрах, $z > 0; r$ - радиальная координата, расстояние до оси скважины в метрах, $r > 0; r_c$ - внешний радиус скважины, в метрах; r_T - радиус температурного влияния скважины, в метрах; $T_г(z)$ - температура горной породы вдали от скважины, ее значения связаны условиями: $0 \le z \le L$, $T_г(0) = T_0$, $T_г(L) = T_{пл}$, $T_г(z) = T_0 + \gamma z$, $\gamma = (T_{пл} - T_0)/L; L$ - глубина забоя или длина колонны вертикальной скважины в метрах; γ - геотермический градиент температуры, около 2-3 °С на 100 метров; T_0 - температура закачиваемой воды на устье скважины, принимаемая равной температуре дневной поверхности; $T_{пл}$ - пластовая температура, равная температуре горной породы на глубине L.

Воспользуемся этим представлением решения как приближенным и для квазиустановившегося режима с целью определения потока тепла из горной породы в колонну скважины. Для единицы длины колонны в единицу времени имеем поток тепла согласно общепринятому закону Фурье

$$q_T = 2\pi r_c \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = 2\pi\lambda \cdot \frac{T_г(z) - T_c(z)}{ln(r_T / r_c)}, \qquad (2)$$

где λ - теплопроводность горной породы, около 2-3 Вт/м·°С;

Изменение температуры воды по стволу скважины обусловлено лишь притоком тепла извне, ибо в силу несжимаемости и малой вязкости воды повышением ее температуры из-за внутреннего трения можно пренебречь. Уравнение баланса количества теплоты для элемента dz колонны в единицу времени запишется в виде

$c_в Q_в dT_c = q_T dz$, (3)

где $c_в$ - удельная объемная теплоемкость воды (в стандартных условиях 4,19 МДж/м^3), $Q_в$ - приемистость нагнетательной скважины в объемных единицах.

Введем для упрощения обозначение

$$\alpha = \frac{2\pi\lambda}{c_в Q_в ln(r_T / r_c)} \qquad (4)$$

Подставив (2) в (3) и произведя некоторые упрощения, для температуры воды в колонне скважины будем иметь уравнение с принятым нами выше начальным условием

$T_c' + \alpha T_c = \alpha T_г(z), T(0)=T_0$ (5)

Решение задачи (5) представить в виде

$$T_c(z) = T_0 + \gamma z - \frac{\gamma}{\alpha}(1 - e^{-\alpha z}), \quad (6)$$

что дает зависимость температуры воды по стволу нагнетательной скважины. Предположив здесь $z = L$ для температуры воды на забое получаем

$$T_c(L) = T_0 + \gamma L - \frac{\gamma}{\alpha}(1 - e^{-\alpha L}) \quad (7)$$

Эта и есть хорошо известная формула А.Ю. Намиота. Придадим ей более удобный для наших расчетов вид, заменив геотермальный градиент разностью температур пласта и дневной поверхности, поделенной на длину колонны скважины. Как условились выше, температуру на забое $T_c(L)$ обозначим $T_в$. Тогда

$$T_в = T_{пл} - \frac{T_{пл} - T_0}{\alpha L}(1 - e^{-\alpha L}), \ \gamma = (T_{пл} - T_0)/L \quad (8)$$

Естественно обозначить новой буквой безразмерный параметр $\alpha L = \xi$ и ввести безразмерную температуру θ

$$\theta = \frac{T_в - T_0}{T_{пл} - T_0}, \ \xi = \frac{2\pi\lambda L}{c_в Q_в \ln(r_T / r_c)} \quad (9)$$

Параметр ξ растет пропорционально росту глубины забоя L и убывает в обратной пропорции с ростом приемистости скважины. Другие параметры можно ориентировочно считать постоянными: r_T ~5 м; $\lambda \approx 2{,}5$ Вт/м·°С; $r_c \approx 0{,}1$ м; $c_в$=4,2 МДж/м^3·°С. При этих значениях параметров для Q = 1000 м^3/сут и L=2000 м; 3000 м и 4000 м получаем соответственно ξ= 0,165; 0,248 и 0,331.

Теперь формула (8) записывается в беспараметрической форме, что позволяет иметь готовые таблицы для пересчета одного параметра в другой

$$\theta = 1 - \frac{1 - exp(-\xi)}{\xi} \quad (10)$$

Таблица

Зависимость параметра ξ от безразмерной температуры воды на забое нагнетательной скважины θ

θ	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
ξ	0,02	0,04	0,103	0,214	0,334	0,464	0,606	0,761	0,934	1,126
θ	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
ξ	1,342	1,593	1,885	2,232	2,657	3,197	3,920	4,965	6,68	10,0

Формулы (8) и (10) удобны для расчета температуры воды на забое при заданной приемистости. Однако нередко приходится проводить обратный счет, определять по заданной температуре на забое подходящее значение приемистости. Результат решения относительно ξ при заданном θ трансцендентного уравнения (10) приводится в таблице, которая облегчает нахождение режима закачки для заданной или желаемой температуры закачиваемой в пласт воды.

Для высоких приемистостей скважин значения ξ малы и формулу (10) можно заменить на приближенную, более простую

$$\theta = \frac{\xi}{2} - \frac{\xi^2}{6} + \ldots, \quad (11)$$

в которой при $\xi < 0{,}1$ достаточно удержать только выписанные два члена.

Если темп закачки мал, параметр ξ будет большим и температура воды на забое будет приближаться к пластовой. При нагнетании не подогретой морской воды желательно поддерживать такой темп нагнетания, при котором температура воды на забое не менее температуры начала массовой кристаллизации парафина. Назовем критической ту приемистость, которая обеспечивает нагрев воды от устья до забоя от значения температуры дневной поверхности T_0 до температуры $T_{кр}$ начала массовой кристаллизации парафина (58-60°С) или для безразмерной температуры θ от нуля до $\theta_{кр}=(T_{кр}-T_0)/(T_{пл}-T_0)$. Для 1 месторождения $\theta_{кр}$=(60-15/(65-15)=45/50=0,9; для 2 месторождения $\theta_{кр}$=(60-30/(90-30)=30/60=0,5; для 3 $\theta_{кр}$=(60-30/(135-30) = 30/105 ≈ 0,3. Соответствующие критические значения параметра ξ составят: для 1-го $\xi_{кр}$ =10; для 2-го $\xi_{кр}$ =1,593; для 3-го $\xi_{кр}$ =0,761.

Ограничение на приемистость нагнетательной скважины, при выполнении которого обеспечивается естественный нагрев закачиваемой воды до критической температуры, имеет вид

$$Q_в \le \frac{2\pi\lambda L}{\xi_{кр} c_в \, ln(r_T / r_c)} \qquad (12)$$

Принимаем, r_T ~5 м; λ ≈ 2,5 Вт/м·°С; r_c≈ 0,1 м; $c_в$=4,2 МДж/м^3·°С. Для условий 1-го месторождения L =2000 м и $\xi_{кр}$ =10, формула (12) дает весьма жесткое ограничение на приемистость $Q_в \le 16$ м^3/сут. Для условий 2-го месторождения L = 3000 м и $\xi_{кр}$ =1,593, формула (12) дает уже несколько мягкое ограничение на приемистость $Q_в \le 150$ м^3/сут. Для условий месторождения 3-го L =4000 м и $\xi_{кр}$ =0,761, формула (12) дает достаточно слабое ограничение на приемистость $Q_в \le 425$ м^3/сут.

Полученные нами уровни ограничений несколько условны и ориентировочны, ибо принятые нами значения параметров могут варьироваться в некоторых пределах. Например, радиус температурного влияния r_m может быть менее 5 м на начальном этапе закачки (тогда ограничение (12) становится слабее), он станет порядка 10 м через год после начала эксплуатации скважины (тогда ограничение (12) становится чуточку жестче). Для конкретных скважин желательно уточнить не только значения радиуса температурного влияния r_T, но и осредненное по всей толще горной породы значение теплопроводности λ и внешнего радиуса колонны r_c.

Приведенные выше формулы (8), (10), а также таблица позволяют ориентировочно оценить нагрев воды по стволу скважины, указать в общих чертах для больших глубин залегания пласта допустимые режимы нагнетания, обеспечивающие естественный подогрев воды до температуры кристаллизации парафина. При приемистости 3000 м^3/сут и выше прирост температуры воды от устья до забоя нагнетательной скважины не превышает и 5% от разности между пластовой температурой и температурой дневной поверхности.

При определении температурного режима закачиваемой воды по стволу скважины радиус температурного влияния был принят медленно меняющимся во времени параметром. Установим закон изменения радиуса температурного возмущения от времени, т.е. определим динамику зоны термического воздействия скважины в процессе ее эксплуатации.

Распространение тепла в горную породу от скважины можно считать процессом, происходящим «послойно», автономно для каждой глубины z. То есть вертикальной кондуктивной передачей тепла можно пренебречь по сравнению с горизонтальной, т.к. горизонтальные размеры температурного влияния-это несколько метров, тогда как вертикальные размеры составляют километры.

Для описания изменения температуры горной породы можно использовать уравнение

$$c\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right),\ r > r_c,\ t > 0 \qquad (13)$$

с граничными условиями

$T(r_c,t) = T_c$, $T(\infty,t) = T_г = T_0 + \gamma z$. (14)

Точное решение этой задачи выписывается, однако возникают трудности вычислительного характера. Чтобы избежать их и оправдать применение профиля температур (1), представим приближенное решение задачи (1 - 2) в виде

$$T = T_г + (T_c - T_г)\cdot\frac{ln(R/r)}{ln(R/r_c)}\ ,R= r_m(t) \quad (15)$$

Для теплового потока от скважины в горную породу на единицу длины колонны в единицу времени будем иметь

$$q_T = -2\pi r_c\lambda\frac{\partial T}{\partial r} = 2\pi\lambda\cdot\frac{T_c(z)-T_г(z)}{ln(R/r_C)} \quad (16)$$

Этот поток обуславливает изменение в единицу времени распределения температуры горной породы в области $r_c < r < R$, следовательно

$$q_T = \frac{d}{dt}\int_{r_c}^{R} c\cdot 2\pi r(T - T_r)dr \quad (17)$$

Непосредственное вычисление дает

$$\int_{r_c}^{R} r\,ln(r/r)dr = -\frac{r_c^2}{2}ln\frac{R}{r_c} + \frac{R^2 - r_c^2}{4}, \quad (18)$$

и при $r_c << R$ этот интеграл можно заменить на $R^2/4$, пренебрегая членами порядка r_c^2 по сравнению с членами порядка R^2. Подставив, получаем

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{(T_c - T_г)R^2}{ln(R/r_c)}\right) = \frac{4\lambda}{c}\cdot\frac{(T_c - T_г)}{ln(R/r_c)} \quad (19)$$

Это и есть приближенное уравнение для определения изменения радиуса зоны термического воздействия скважины во времени $R(t)$. Оно также довольно громоздко, чтобы интегрировать непосредственно. Учтем, что мы уже приняли $r_c << R$ и для таких значений логарифмический член мало меняется, его можно принять за постоянную. Для нагнетательных скважин с неизменным режимом их работы разность $(T_c - T_г)$ достаточно быстро устанавливается и тоже можно принять за константу. Тогда уравнение (19) чрезвычайно упрощается и мы получаем

$$\frac{dR^2}{dt} = 4a^2, a^2 = \frac{\lambda}{c}\ , \quad (20)$$

где a - температуропроводность горной породы, λ - теплопроводность ее, c - объемная теплоемкость. Следовательно, по истечению некоторого промежутка времени t_o с положения $R = R_0$ граница температурного возмущения будет двигаться согласно закону

$$R^2 = R_0^2 + 4a^2(t - t_0)\ ,R_0 >> r_c \quad (21)$$

Отсюда видно, что для больших времен имеет место асимптотическая зависимость $R \sim 2a\sqrt{t}$, обычно используемая для оценок радиуса зоны температурного влияния. Если принять $\lambda \approx 2{,}5$ Вт/м·°С, c=3 МДж/м^3·°С, то a^2=26,3 м^2/год и асимптотические значения радиуса температурного возмущения составят: за три месяца - около 5 метров; за 1 год-около 10 метров; за 4 года - около 20 метров. Основной интервал изменения значений $ln(r_m/r_c)$ за время разработки залежи составляет от 4 до 6 единиц, если не принимать во внимание начальный период запуска скважины (до 1 месяца).

Представление приближенного решения в виде (15) и последующие выкладки, не оправданы для начального периода после запуска (первые несколько суток). Однако достаточно полное представление о характере движения температурного фронта можно получить из решения родственной задачи для галереи (одномерный линейный случай) и с переменной

температурой на границе. Здесь отметим, что многие авторы при решении приближенным методом задач пьезопроводности предложили для фронта распространения следующие формулы: $R = \sqrt{r_c^2 + 4\chi t}$ (И.А. Чарный); $R = \sqrt{r_c^2 + 8\chi t}$ (Ю.Д. Соколов, Г.П. Гусейнов); $R = \sqrt{r_c^2 + 12\chi t}$ (Г.И. Баренблатт); $R = r_c + \sqrt{\pi\chi t}$ (Э.Б. Чекалюк). Разброс формул обусловлен модификациями постановок задач и применяемых приближенных методов.

Литература:

1. Намиот А.Ю. К вопросу об изменении температуры нефтяной или газовой скважины. Труды ВНИИ, вып. 8. - М.: Гостоптехиздат, 1956.
2. Алишаев М.Г., Розенберг М.Д., Теслюк Е.В. Неизотермическая фильтрация при разработке нефтяных месторождений. - М.: Недра, 1985. - 271 с.
3. Алишаев М.Г. Уточнение потерь тепла для геотермальной скважины. Известия РАН. Энергетика. №1, 2010. - С. 36-47.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ОБРАТНУЮ ЗАКАЧКУ В ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ

Джаватов Д.К., Азизов А.А.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: djavatdk@mail.ru

Рассматривается проблема оптимизации энергетических потерь на обратную закачку в геотермальной циркуляционной системе с горизонтальными скважинами. На основе проведенных численных расчетов показано, что существует значение температуры закачки теплоносителя выше которого делает эксплуатацию системы неэффективной. Проведен анализ систем с вертикальными и горизонтальными скважинами.

Бурение горизонтальных скважин стало одним из наиболее важных достижений современной нефтегазодобычи. Многократно увеличивая площадь фильтрации флюида через стенки скважины, приводящее к уменьшению градиентов давления и скоростей притока флюида в приствольной зоне скважины, горизонтальное бурение способно многократно увеличить производительность скважин по сравнению с вертикальными скважинами.

Длительное время основным способом разработки нефтяных и газовых месторождений являлось разбуривание месторождений системой вертикальных скважин и их эксплуатация в процессе разработки. Однако, в ряде случаев вскрытие пластов вертикальным стволом приводило к получению низких дебитов, быстрому обводнению скважины, незначительному коэффициенту извлечению флюидов, а также деформации и разрушению призабойной зоны при создании депрессии выше допустимой, так как при небольших депрессиях производительность скважины была весьма низкой. Поэтому, разработка месторождений системой вертикальных скважин при незначительной толщине пласта, низкой проницаемости, наличии преимущественно вертикальных трещин оказалось малоэффективной, и потребовала использования наклонных и горизонтальных скважин.

Проблема использования горизонтальных скважин приобретает особую актуальность при разработке геотермальных месторождений, где интенсификация добычи термальной воды является одним из основных способов улучшения технико-экономических показателей геотермального производства и повышения конкурентоспособности геотермальной отрасли по сравнению с традиционными энергетическими отраслями.

В вопросах практического использования геотермальной энергии, получаемой на основе геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) важное значение имеет доля энергетических затрат на закачку в общей массе энергии, получаемой ГЦС. Когда полезная энергия, получаемая в результате эксплуатации ГЦС, будет равна или меньше энергии на обратную закачку теплоносителя, эксплуатация ГЦС становится неэффективной. В связи, с чем становится актуальной проблема правильного выбора технологических параметров ГЦС, обеспечивающих ее эффективную эксплуатацию. Одним из таких параметров является температура закачиваемого в пласт теплоносителя.

Рассмотрим процесс тепломассопереноса в нагнетательной скважине, который запишется уравнением [1]:

$$c_H \cdot Q \cdot \partial T_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_H \cdot K \cdot (T_0 + \Gamma \cdot z - T_1) \cdot \partial z\,, \qquad (1)$$

где z – вертикальная координата, абсолютная глубина в метрах; T_0 - температура пород нейтрального слоя, ºС; Q – массовый дебит ГЦС, кг/с; r_H - радиус нагнетательной скважины, м; c_H - теплоемкость нагнетаемого теплоносителя, Дж/(кг·ºС); Г - геотермический градиент, ºС/м; К - коэффициент теплопередачи от потока теплоносителя к окружающим нагнетательную скважину горным породам, Вт/(м^2·ºС).

Интегрирование уравнения (1), при начальном условии $T_1(0) = T_{ну}$ ($T_{ну}$ - температура на устье нагнетательной скважины, ºС) дает зависимость:

$$T_1(z) = T_y \cdot e^{-A \cdot z} + \Gamma \cdot z + (T_0 - \frac{\Gamma}{A}) \cdot (1 - e^{-A \cdot z})\,, \qquad (2)$$

где $A = \dfrac{2 \cdot K \cdot \pi \cdot r_H}{c_H \cdot Q}$, .

Наличие значительных энергетических затрат на обратную закачку теплоносителя, является основным недостатком ГЦС. Эти затраты связаны с потерями энергетической мощности на обеспечение циркуляции по нагнетательной и добычной скважинах, наземных коммуникациях и фильтрации по пласту.

Рассмотрим ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами.

Мощность, затрачиваемая на обратную закачку теплоносителя N_H, зависит от многих технологических параметров ГЦС и параметров пласта:

$$N_H = Q \cdot \frac{\Delta P}{\rho_H}\,, \qquad (3)$$

где ρ_H - плотность нагнетаемого теплоносителя, кг/м^3; ΔP - давление нагнетания в циркуляционном контуре ГЦС, которое определяется выражением [2]:

$$\Delta P = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} + \Delta P_F + (\rho_D - \rho_H) \cdot g \cdot H\,, \qquad (4)$$

где ΔP_H, ΔP_D, ΔP_{HK} - соответственно гидравлические потери давления в нагнетательной и добычной скважинах, и наземных коммуникациях, Па; ΔP_F - фильтрационные потери давления в пласте, Па; ρ_D - плотность теплоносителя в добычной скважине, кг/м^3; ρ_H - плотность теплоносителя в нагнетательной скважине, кг/м^3; g - ускорение свободного падения, м/с^2; H - глубина скважины, м.

Гидравлические потери давления для ГЦС с горизонтальной нагнетательной скважиной и фильтрационные потери давления определяются по формуле [2]:

$$\Delta P_\Gamma = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} = \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{\lambda_H \cdot H}{d_H^5 \cdot \rho_H} + \frac{\lambda_D \cdot (H + R)}{d_D^5 \cdot \rho_D} \right) + \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{\lambda_H \cdot a_H}{d_H^5 \cdot \rho_H} \right), \qquad (5)$$

$$\Delta P_F = \frac{Q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot a_H \cdot \rho_H} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot R^2}{d_H \cdot d_D} \right), \qquad (6)$$

где λ_H, λ_D - коэффициенты гидравлических потерь для нагнетательной и добычной скважин; R - расстояние между нагнетательной и добычной скважинами, м; μ - динамическая

вязкость закачиваемой воды, Па·с; k - проницаемость пласта, м^2; h - мощность пласта, м; d_H, d_D - диаметры нагнетательной и добычной скважин, соответственно, м.

Из формул (5) и (6) следует, что давление нагнетания зависит от таких технологических параметров ГЦС как: μ, d_H, d_D, Q.

Потери мощности на обратную закачку теплоносителя связаны с использованием электрической энергии. Коэффициент полезного действия, в существующих технологиях преобразования тепловой энергии в электрическую, составляет около 0,1 [3]. С учетом этого выражение (3) примет следующий вид:

$$N_H = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho_H}, \quad (7)$$

где η - коэффициент полезного действия.

Энергетические затраты на обратную закачку будут зависеть от того с какой температурой $T_{ну}$ теплоноситель будет закачиваться обратно в пласт. Это связано с тем, что важнейшая характеристика, определяющая фильтрационные потери давления в пласте ΔP_F - вязкость μ, имеет сильную температурную зависимость. В литературе имеется много формул такой зависимости, мы будем рассматривать следующую формулу [4]:

$$\mu(T) = \frac{35 + 0{,}7 \cdot C + 0{,}0227 \cdot C^2}{T_{нз} + 15{,}7} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

$$C = 100\% \cdot \frac{M}{\rho_н}, \quad (9)$$

где $T_{нз}$ - температура теплоносителя на забое нагнетательной скважины, ºС; С - концентрация солей в термальной воде, %; М - минерализация, г/л.

Полная мощность $N_{ПОЛ}$ ГЦС равна:

$$N_{ПОЛ} = Q \cdot (c_D \cdot T_D - c_H \cdot T_H), \quad (10)$$

где c_D - теплоемкость теплоносителя в добычной скважине, Дж/(кг·ºС); T_D - температура теплоносителя на входе в теплообменник, ºС; T_H - температура теплоносителя на выходе из теплообменника, ºС.

Важнейшим показателем эффективности эксплуатации ГЦС выступает температура, с которой закачивается теплоноситель обратно в пласт. При этом необходимо, чтобы получаемая полезная мощность была не меньше мощности, затрачиваемой на обратную закачку. Температуру закачиваемого теплоносителя на устье скважины, при которой мощность закачки теплоносителя будет равна полезной мощности, получаемой ГЦС, назовем критической.

Рассмотрим существование критической температуры и ее зависимость от параметров ГЦС.

Полезная мощность $N_П$, вырабатываемая ГЦС, определяется как разность между полной мощностью $N_{ПОЛ}$ и мощностью, затрачиваемой на обратную закачку N_H:

$$N_П = N_{ПОЛ} - N_H = Q \cdot \left((c_D \cdot T_D - c_H \cdot T_H) - \frac{\Delta P}{\eta \cdot \rho_H} \right), \quad (11)$$

Для определения критической температуры закачиваемого теплоносителя были произведены расчеты для гипотетического месторождения со следующими параметрами: $T_{пл}$=110 ºС, H=2000 м, R=1000 м, Г=0,03 ºС/м, T_0=10 ºС, М=6 г/л, k=0,2·10^{-12} м^2, λ=0,03.

При проведении расчетов учитывалась температурная зависимость таких важных характеристик как плотность и теплоемкость теплоносителя [5]:

$$c(T) = T^2 \cdot 10^{-5} - 0{,}0014 \cdot T + 4{,}2, \quad (12)$$

$$\rho(T) = -2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0{,}0004 \cdot T + 1{,}0121, \quad (13)$$

Таблица 1.

Расчетные значения критической температуры $T_{ну}$ в зависимости от дебита для различных значений мощности пласта и радиуса нагнетательной $r_н$ и добычной $r_д$ скважин для ГЦС с вертикальными скважинами.

r=0,09 м					
Q, кг/с	h=20 м	h=40 м	h=60 м	h=80 м	h=100 м
	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС
40	**15,09**	**71,09**	**84,62**	**90,89**	**94,51**
60	0	**34,59**	**64,31**	**75,14**	**80,99**
80	0	0	**27,76**	**53,03**	**62,96**
100	0	0	0	0	**34,81**
130	0	0	0	0	0
r=0,1 м					
Q, кг/с	h=20 м	h=40 м	h=60 м	h=80 м	h=100 м
	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС
40	**23,53**	**73,79**	**86,97**	**93,15**	**96,74**
60	0	**44,48**	**70,36**	**80,61**	**86,24**
80	0	0	**46,19**	**64,6**	**73,28**
100	0	0	0	**39,82**	**56,01**
130	0	0	0	0	0
r=0,11 м					
Q, кг/с	h=20 м	h=40 м	h=60 м	h=80 м	h=100 м
	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС	$T_{ну}$, ºС
40	**28,55**	**75,36**	**88,29**	**94,4**	**97,97**
60	0	**49,55**	**73,61**	**83,55**	**89,08**
80	0	0	**54,17**	**70,57**	**78,74**
100	0	0	0	**52,98**	**65,92**
130	0	0	0	0	**2,6**

* - жирным цветом отмечены значения критической температуры.

Таблица 2.

Расчетные значения критической температуры $T_{ну}$ в зависимости от дебита для различных значений мощности пласта и радиуса нагнетательной $r_н$ и добычной $r_д$ скважин для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами ($r_н$= $r_д$=0,09 м)

Q, кг/с	**40**	**60**	**80**	**100**	**130**
$a_н$=20 м					
$T_{НУ}$, °С	15,09	0	0	0	0
$N_{НАГ}$, *МВт*	7,91	23,29	47,79	83,31	159,45
$N_{ПОЛ}$, *МВт*	15,81	27,5	36,67	45,84	59,59
$N_{П}$, *МВт*	7,91	4,21	-11,12	-37,47	-99,86
$a_н$=60 м					
$T_{НУ}$, °С	84,62	64,31	27,76	0	0
$N_{НАГ}$, *МВт*	2,14	5,74	13,71	31,43	61,85
$N_{ПОЛ}$, *МВт*	4,28	11,48	27,41	45,84	59,59
$N_{П}$, *МВт*	2,14	5,74	13,71	14,41	-2,26
$a_н$=100 м					
$T_{НУ}$, °С	94,51	80,99	62,96	34,81	0
$N_{НАГ}$, *МВт*	1,31	3,66	7,88	15,67	42,35
$N_{ПОЛ}$, *МВт*	2,62	7,33	15,76	31,34	59,59
$N_{П}$, *МВт*	1,31	3,66	7,88	15,67	17,24
$a_н$=300 м					
$T_{НУ}$, °С	103,68	94,84	83,29	68,71	39,31
$N_{НАГ}$, *МВт*	0,54	1,92	4,5	8,66	19,16
$N_{ПОЛ}$, *МВт*	1,07	3,85	9	17,31	38,33
$N_{П}$, *МВт*	0,54	1,92	4,5	8,66	19,16

Таблица 3.

Расчетные значения критической температуры $T_{ну}$ в зависимости от дебита для различных значений мощности пласта и радиуса нагнетательной $r_н$ и добычной $r_д$ скважин для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами ($r_н$= $r_д$=0,1 м)

Q, кг/с	40	60	80	100	130
$a_н$=20 м					
$T_{НУ}$, °C	23,53	0	0	0	0
$N_{НАГ}$, МВт	7,2	21,48	43,91	76,36	145,85
$N_{ПОЛ}$, МВт	14,41	27,5	36,67	45,84	59,59
$N_{П}$, МВт	7,2	6,02	-7,24	-30,53	-86,26
$a_н$=60 м					
$T_{НУ}$, °C	86,97	70,36	46,19	0	0
$N_{НАГ}$, МВт	1,94	4,99	10,65	27,31	53,34
$N_{ПОЛ}$, МВт	3,88	9,98	21,31	45,84	59,59
$N_{П}$, МВт	1,94	4,99	10,65	18,53	6,25
$a_н$=100 м					
$T_{НУ}$, °C	96,74	86,24	73,28	56,01	0
$N_{НАГ}$, МВт	1,12	3	6,17	11,29	34,85
$N_{ПОЛ}$, МВт	2,25	6,01	12,34	22,58	59,59
$N_{П}$, МВт	1,12	3	6,17	11,29	24,74
$a_н$=300 м					
$T_{НУ}$, °C	105,9	99,81	92,2	82,91	65,27
$N_{НАГ}$, МВт	0,35	1,3	3,01	5,7	12,18
$N_{ПОЛ}$, МВт	0,7	2,59	6,01	11,41	24,36
$N_{П}$, МВт	0,35	1,3	3,01	5,7	12,18

Таблица 4.

Расчетные значения критической температуры $T_{ну}$ в зависимости от дебита для различных значений мощности пласта и радиуса нагнетательной $r_н$ и добычной $r_д$ скважин для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами ($r_н$= $r_д$=0,11 м)

Q, кг/с	40	60	80	100	130
$a_н$=20 м					
$T_{НУ}$, °C	28,55	0	0	0	0
$N_{НАГ}$, МВт	6,79	20,12	41	71,21	135,88
$N_{ПОЛ}$, МВт	13,57	27,5	36,67	45,84	59,59
$N_{П}$, МВт	6,79	7,38	-4,33	-25,38	-76,29
$a_н$=60 м					
$T_{НУ}$, °C	88,29	73,61	54,17	0	0
$N_{НАГ}$, МВт	1,83	4,58	9,33	24,6	47,84
$N_{ПОЛ}$, МВт	3,66	9,17	18,67	45,84	59,59
$N_{П}$, МВт	1,83	4,58	9,33	21,23	11,74
$a_н$=100 м					
$T_{НУ}$, °C	97,97	89,08	78,74	65,92	2,6
$N_{НАГ}$, МВт	1,02	2,65	5,26	9,24	29,08
$N_{ПОЛ}$, МВт	2,04	5,3	10,52	18,47	58,17
$N_{П}$, МВт	1,02	2,65	5,26	9,24	29,08
$a_н$=300 м					
$T_{НУ}$, °C	107,13	102,54	97,08	90,62	78,8
$N_{НАГ}$, МВт	0,24	0,95	2,19	4,09	8,53
$N_{ПОЛ}$, МВт	0,49	1,9	4,37	8,18	17,06
$N_{П}$, МВт	0,24	0,95	2,19	4,09	8,53

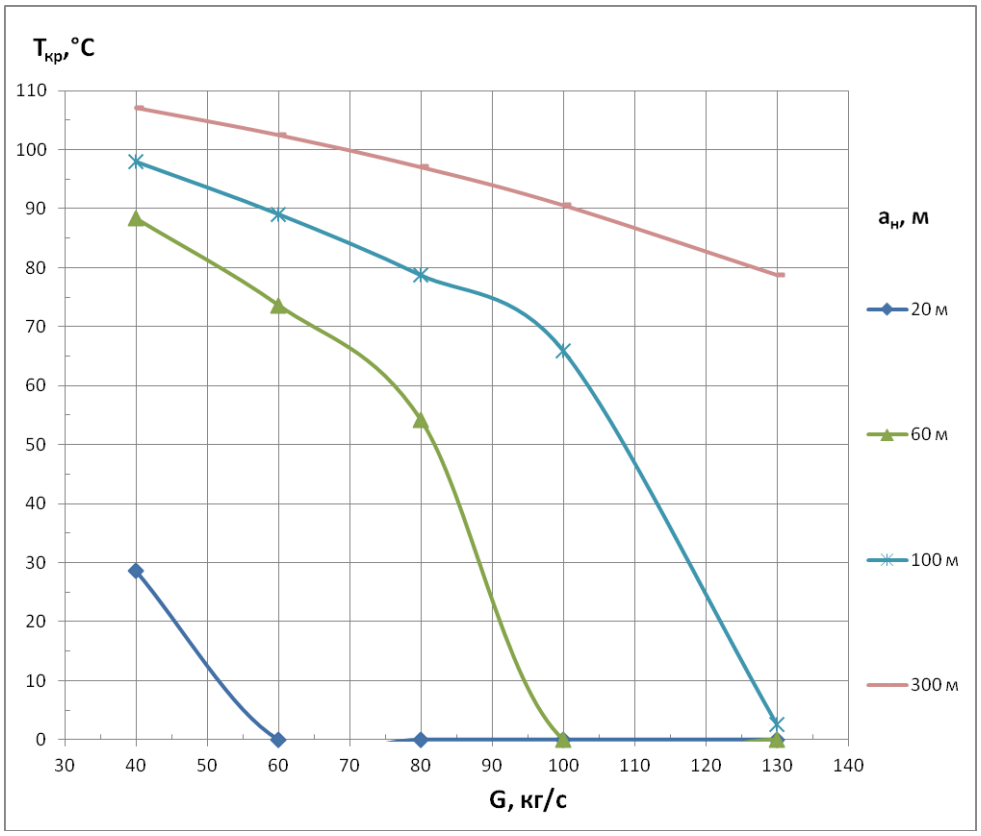


Рис. 1. Зависимость критической температуры закачиваемого теплоносителя от дебита при различных значениях длины горизонтального ствола нагнетательной скважины ($r_н$=$r_д$=0,11 м)

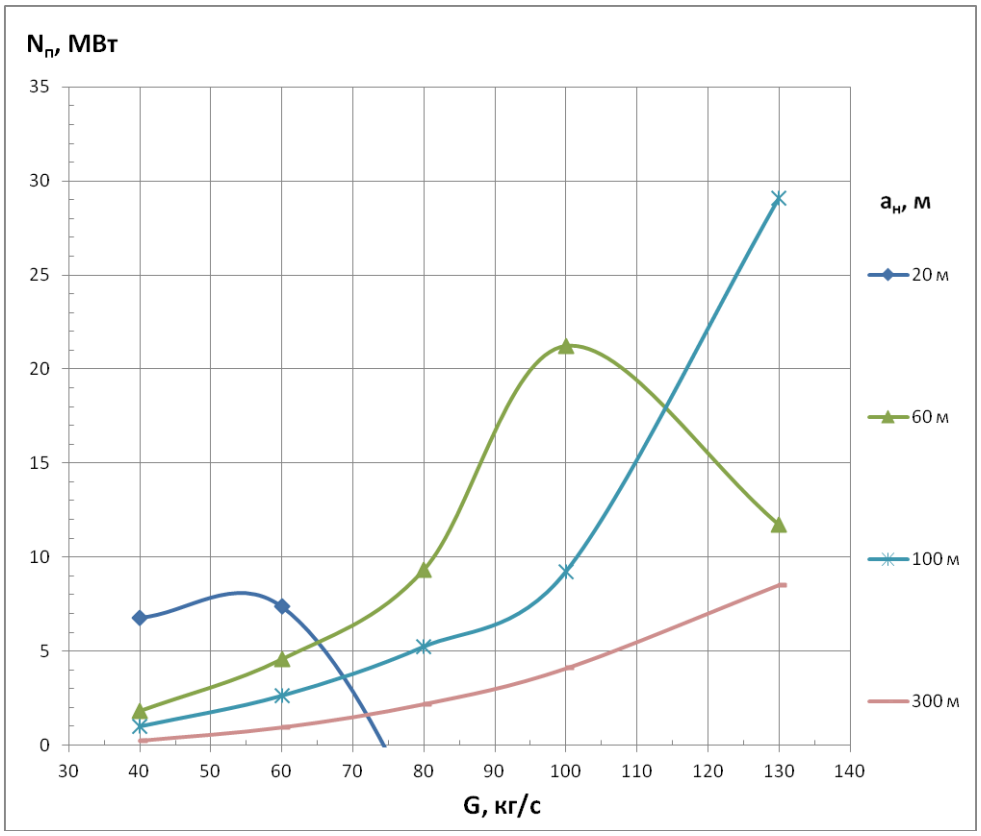


Рис. 2. Значения $N_П$ при критической температуре закачиваемого теплоносителя ($r_н$=$r_д$=0,11 м)

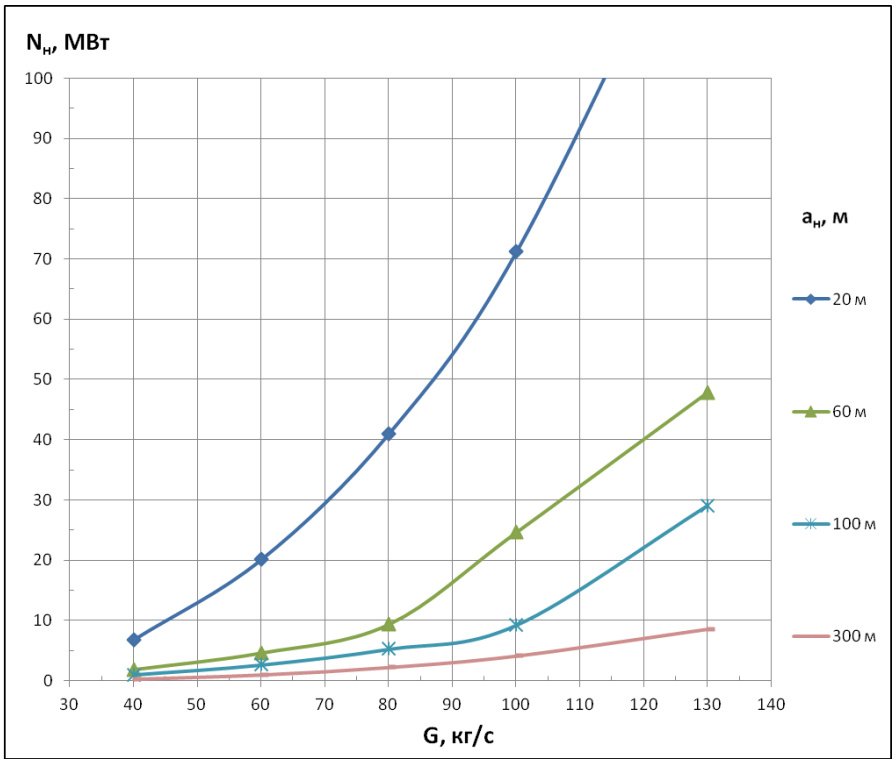


Рис. 3. Значения N_H при критической температуре закачиваемого теплоносителя ($r_н=r_д=0{,}11$ м)

Из таблицы 1 наглядно видно, существование критической температуры и, что повышение температуры закачиваемого теплоносителя выше этого значения делает эксплуатацию ГЦС нецелесообразной. Значения дебита, для которых критическая температура равна 0, являются неприемлемыми. При этих значениях, для заданных параметров ГЦС, не выполняется условие $N_H=N_П$, т.е. при любых значения $T_{ну}$ $N_H>N_П$. Это видно из расчетных значений, указанных в таблицы 3. Помимо существования критической температуры, т.е. максимальной допустимой температуры закачиваемого теплоносителя, существует и максимальное допустимое значения дебита. Значение критической температуры зависит от такого параметра как мощность пласта. Чем больше мощность пласта, тем выше значения критической температуры и максимального допустимого дебита. Связано это с уменьшением фильтрационных потерь, что в свою очередь влияет на уменьшение энергетических затрат на закачку.

На основе проведенных расчетов можно сделать некоторые выводы:

1. С увеличением длины горизонтального ствола нагнетательной скважины для ГЦС:

- растет значение приемлемого дебита ГЦС. Так, если при **$a_н$=20 м** приемлемым является только значение дебита, равное 40 кг/с, то для **$a_н$=300 м** таковыми являются практически все значения;
- растет значение критической температуры для одного и того же значения дебита;
- растет значение критической температуры и с увеличением радиуса скважин ГЦС.

2. Сравнение расчетных данных для ГЦС с вертикальными скважинами и для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами показывает, что значения критической температуры для второй ГЦС выше.

Это еще раз подтверждает факт большей эффективности ГЦС с горизонтальными скважинами.

Литература:

1. *Дядькин Ю Д.* Разработка геотермальных месторождений. М., Недра, 1989. 229 с.
2. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.

3. *Алишаев М.Г.* Лазурному берегу – геотермальное тепло. // АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕУРСОВ: Материалы IV Школы молодых ученных им. Э.Э.Шпильрайна./ Под ред. д.т.н. А.Б.Алхасов – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2011, С.44-49.
4. *Алишаев М.Г.* Гидродинамические основы разработки нефтяных месторождений со структурно-механическими свойствами нефтей в пластовых условиях: дис. … д-ра техн. наук. Москва, 1974.
5. *Джаватов Д.К., Дворянчиков В.И.* Температурная зависимость термодинамических параметров геотермальных флюидов в задачах оптимизации геотермальных систем // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № S3. С. 69.

ПОЛУЧЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ГЕОТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА ВОДЫ

Магомедов Ш.А., Мамаев О.А., Чупалаев Ч.М., Расулов Г.С.

ФБГУН Институт проблем геотермии ДНЦ РАН

Подземные термальные, минеральные и промышленные воды представляют собой сложные многокомпонентные физико-химические системы, включающие минеральные и органические вещества, газы, микроорганизмы, формирующиеся в определенных структурно-тектонических, литолого- стратиграфических и термодинамических условиях. Воды эти сформированы преимущественно за счет поверхностных (атмосферных и морских) и глубинных (магматических, вулканогенных и метаморфических) растворов, претерпевших различные преобразования в земной коре в периоды геологической истории.

В районах развития современных гидротермальных систем поверхностная вода, проникшая на большую глубину, может потерять кислородную «метку» за счет взаимодействия с нагретыми до высокой температуры магматическими породами, но полностью сохранить при этом изотопное отношение D/H. Эта консервативность изотопии водорода, проявляющаяся при взаимодействии воды с вмещающими породами, и позволяет устанавливать её генетическую принадлежность. Общеизвестно, что минералы пород содержат мало водорода (Д), кроме того, отношения вода/порода в геотермальных системах редко бывают так малы, чтобы водород минералов пород мог значительно повлиять на изотопию водорода воды. По этой причине водородного сдвига метеорной воды в гидротермальных растворах практически нет

Величина изотопного сдвига по кислороду зависит от начальных концентраций его изотопов в воде и породе, минералогии пород, температуры, отношения вода/порода и времени контакта. Наибольший сдвиг отмечается для воды из систем, содержащих карбонатные породы, начальные значения $\delta^{18}O$ для которых лежат в пределах +20÷ +30‰. Этот сдвиг достигает максимальных значений при малых отношениях вода/порода, высокой температуре и продолжительном времени контакта.

Для оценки формирования и генезиса геотермальных вод в настоящее время широко используются изотопные методы и, в частности, определение содержания изотопов водорода и кислорода. Кислород имеет три стабильных изотопа ^{16}O=99,63%, ^{17}O=0,0375% и ^{18}O=0,1995%, а водород два –H=99,9852% и D=0,0148%.

Наибольшую роль в геохимических исследованиях природных вод играют отношения стабильных изотопов водорода (D/H=1/6700) и кислорода ($^{18}O/^{16}O$=1/500). Стабильные изотопы легких элементов (H, O, C и S) характеризуются большими величинами относительных изотопных вариаций, поэтому нашли широкое применение в различных областях геохимических исследований. Широкий диапазон изменений изотопных вариаций водорода (δD=0÷-

150‰) и кислорода ($\delta^{18}O$=-20÷+22‰) и высокая степень точности измерения на масс-спектрометрах позволяет с высокой точностью определять величины естественных изотопных вариаций водорода и кислорода.

Применяя изотопные методы, успешно решают вопросы, связанные с выяснением генезиса термальной воды и возобновлением её запасов. Выявляют области питания подземных горизонтов, определяют температуру флюидов в глубинных резервуарах. Кроме того, с помощью изотопных методов контролируют процессы фазового разделения флюидов при подземном кипении и решают много других задач, связанных с поиском, разведкой и эксплуатацией высокотемпературных месторождений термальных вод.

Поверхностные и грунтовые воды горно-складчатых районов сильно облегчены по изотопному составу и близки к типичным для атмосферных осадков. Легкий изотопный состав основных речных вод Дагестана можно объяснить тем, что основным источником питания рек являются высокогорные ледники (р.Сулак δD= -98,5‰, $\delta^{18}O$=

-9,6‰, р.Терек δD=-83,2‰, $\delta^{18}O$= -8,71‰, р.Самур δD= -92,0‰, $\delta^{18}O$ = -8,82‰).

В таблице 1 ниже приведены наши экспериментальные данные изотопного состава вод геотермальных месторождений Восточного Предкавказья.

Таблица 1

Месторождение, №скв.	Интервал перфорации, м	Возраст отлож.	δD, ‰ SMOW	$\delta^{18}O$, ‰ SMOW
Русский Хутор, №95	1710-1716	N_1	-84,3	-6,4
СКВ.№96	1505-1511	N^1	-87,5	-6,5
Сква№103	1739-1741	N^1	-83,5	-4,3
Сухокумское, СКВ.№69	3772-3978	T_2	-45,2	+4,2
СКВ.№35	3277-3279	K_2	-41,3	+6,1
Юбилейное, СКВ.№29	4439-4443	J_1	-41,0	+7,6
СКВ.№13	4412-4413	T_1	-50,0	+7,8
СКВ.№9	4576-4586	T_1	-43,5	+6,4
Солнечная СКВ.№1	4484-4498	T_1	-34,0	+7,8
СКВ.№2	4356-4364	T_2	-40,5	+5,5
СКВ.№3	4480-4487	T_2	-35,2	+8,2
СКВ.№38	4374-4383	T_1	-36,3	+5,6
СКВ.№56	4364-4380	T_1	-47,0	+6,2
Солончаковая СКВ.№2	4498-4505	T_1	-33,0	+8,5
СКВ.№12	3936-3956	K_1	-34,8	+5,4
СКВ.№15	4324-4350	J_1	-35,6	+6,1
СКВ.№38	4374-4383	T_1	-37,2	+5,4
Рифовая, СКВ.№4	4256-4275	T_2	-42,5	+5,3
Центральная, СКВ.№3	3978-3997	K_1	-38,4	+6,2
Таловая, СКВ.№6	4324-4356	T_1	-43,7	+5,1
Кумухская, СКВ.№4	4247-4289	T_1	-45,6	+6,4

Усредненные значения экспериментальных данных вариаций изотопных составов водорода и кислорода геотермальных вод для отложений различных геологических периодов приведены в таблице 2

Таблица 2

Периоды геологические		**δD, ‰ (SMOW)**	**$\delta^{18}O$, ‰ (SMOW)**
Плиоцен-четвертичные отложения.		-104±7,6	-10,9±1,25
Миоценовые отложения		-85,1±2,4	-5,73±0,95
Мезозойские отложения	Мел	-48,8±2,1	+5,75±0,35
	Юра	-45,4±3,5	+6,85±0,75
	триас	-44,2±3,2	+6,82±1,45

К плиоцен-четвертичным отложениям приурочены холодные и слаботермальные (до 55-60°С) пресные подземные воды, которые по своему химическому составу являются типичными инфильтрационными водами и характеризуются сильно облегченным изотопным составом, как по водороду, так и по кислороду.

Воды миоценового комплекса слабоминерализованные (от 3-10 до 30 г/л) термальные воды с температурой 65-120°С. Химический и изотопный состав этих вод свидетельствует об их смешанном генезисе, наряду с седиментационными, в их составе большая доля инфильтрационных вод.

Геотермальные бассейны мезозойских отложений генетически представляют собой захороненные морские седиментационные воды с примесью древней инфильтрационной воды (до 20-30%) и воды, выделяемой при дегидратации глинистых минералов при высоких РТ условиях. В Терско-Кумском бассейне воды мезозойского комплекса по изотопному составу водорода и кислорода сильно не отличаются. Так, в водах меловых отложений $\delta^{18}O$ составляет +(5,75±0,35), юрских-+(6,85±0,75), триасовых-+(6,82±1,45)‰, а изотопный состав водорода в этих водах характеризуется довольно узким интервалом значений δD=-(44,27÷48,61)‰.

Обобщая экспериментальные данные различных геотермальных месторождений (в основном Восточного Предкавказья) можно построить график зависимости δD и $\delta^{18}O$ для вод различных генетических типов. Обобщенный график приведен на рис .1. По изотопному составу воды неисследованного геологического месторождения по графику на рис.1 можно получить много полезной информации о геотермальном источнике: определить глубину залегания и возраст пласта, установить генетический тип воды и оценить вазобновляемость её запасов, выявить область питания подземного горизонта, определить температуру флюидов в глубинных резервуарах и т.д.

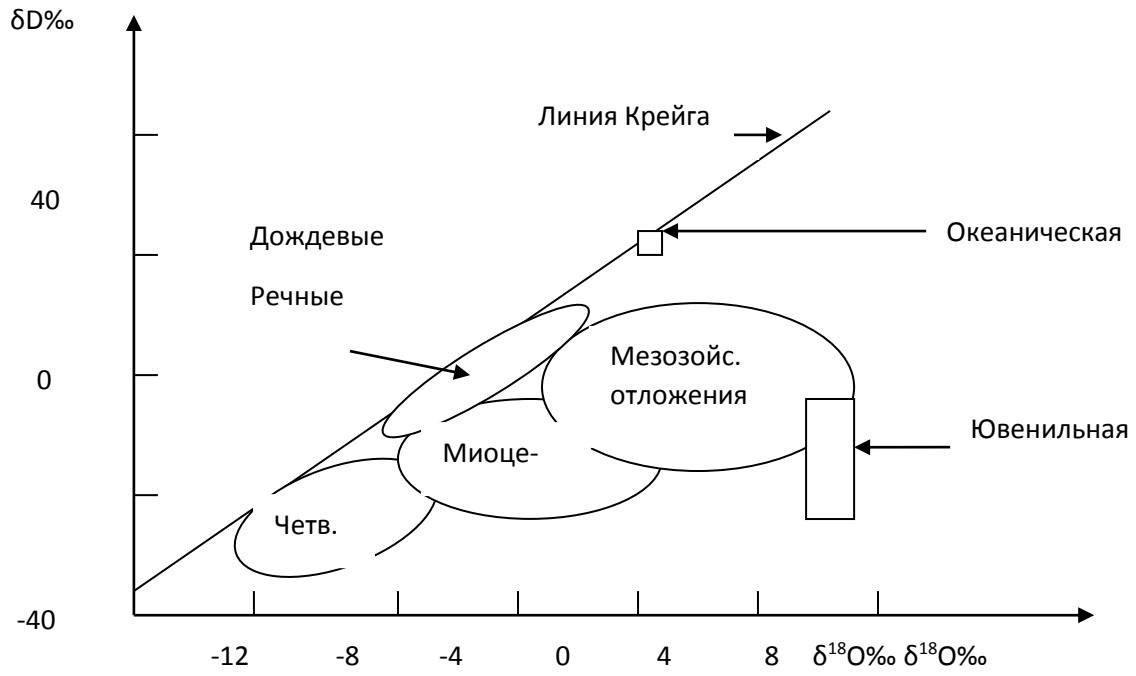


Рис. 1. Изменения изотопного состава вод различных генетических типов

В последние годы в глубоких горизонтах седиментационных бассейнов обнаружено широкое развитие опресненных вод. Суждения о генезисе этих вод остаются пока дискуссионными. Некоторые исследователи считают, что в данном случае изотопная диагностика может существенно помочь, так как уже сейчас она позволяет различать воды современной и

древней инфильтрации, дегидратационные воды глинистых минералов, конденсатогенные воды, приуроченные к залежам углеводородов, и флюиды ювенильного происхождения.

Основные выводы:

1. Подземные воды, зоны активного водообмена плиоцен-четвертичных отложений, по значениям δD и $\delta^{18}O$ полностью соответствуют питанию атмосферными и поверхностными источниками.

2. Термальные воды среднемиоценовых отложений являются преимущественно инфильтрационными. При одинаковых физико-химических условиях в пласте, приуроченные к карбонатным коллекторам воды характеризуются относительно высокими значениями $\delta^{18}O$ по сравнению с водами терригенных коллекторов.

3. Геотермальные бассейны мезозойских отложений генетически представляют собой захороненные морские седиментационные воды с примесью древней инфильтрационной воды (до 20-30%0 и воды, выделяемой при дегидратации минералов при высоких РТ- условиях.

Определенная доля ювенильной воды может образоваться и за счет восходящих флюидов в форме летучих компонентов, мигрирующих субвертикально вдоль глубинных разломов в фундаменте. По изотопному составу мезозойские воды характеризуются сильным изотопным сдвигом по кислороду ($\delta^{18}O$) вправо- в сторону утяжеления; $\delta^{18}O$ меняется в пределах от +1,0 до +9‰. Примесные воды как инфильтрационные, магматические, дегидратационные и ювенильные, попадая в пластовые воды морского генезиса, вызывают облегчение изотопного состава по водороду и утяжеление по кислороду.

ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ РАДИОТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ ВОСТОЧНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

Маммаев О.А., Маммаев Б.О.

ФБГУН Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия;
e-mail: o_mammaev@rambler.ru

Изучение геотермического поля очень важно при решении как глобальных вопросов эволюции Земли, источников геотектонических движений, геофизики глубоких оболочек, так и для интерпретации глубинных процессов с разными энергетическими эффектами (магматизм, метаморфизм и др.) и специфики геофизических полей. Имеется множество работ в которых перечисляются источники внутреннего тепла Земли к которым относят: тепло, выделяющееся при распаде радиоактивных элементов; тепло, образующееся при гравитационной дифференциации вещества Земли; остаточное тепло, сохранившееся со времен формирования земли; гравитационная энергия; энергия полиморфных фазовых переходов и химических реакций в недрах Земли; тепло, связанное с действием нейтрино и космического излучения; выделение тепла в процессе приливного трения и другие источники.

Особый интерес для нас представляют исследования по изучению радиогенного тепла. По исследованиям отечественных и зарубежных авторов в различных регионах Земли прямая пропорциональная зависимость между генерацией радиогенного тепла в верхних слоях земной коры и фиксированным на поверхности тепловым потоком установлена только для отдельных областей. Вклад радиогенной (коровой) составляющей в общий тепловой поток колеблется от 50–60% до 10% и ниже для стабилизированных блоков литосферы континентов. Имеется мнение (Булашевич, Хачай, 1983) и по данным авторов [1, 2, 3, 7, 8 и др.], что анализируя экспериментальные данные о динамике потоков тепла и гелия через земную по-

верхность, присутствие в мантии первичного гелия, цикличность тектоно-магматической активности и некоторые особенности дифференциации вещества по фиксированным значениям изотопии стронция ($^{87}Sr/^{86}Sr$) и Rb/Sr, можно обосновать модель, в которой в качестве основных энергетических источников эволюции коры и мантии рассматриваются радиоактивные элементы.

Известно, что для гранитоидов первичного мантийного происхождения характерны соотношения ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 0,702–0,710, а для пород корового магматизма, появляющегося на завершающем этапе областей магматизма, это отношение составляет значение около 0,730.

В Лаборатории изотопии и радиогенного тепла (ЛИРТ) Института проблем геотермии (ИПГ) Дагестанского научного центра РАН с участием автора были определены изотопные отношения стронция в термальных водах мезозойских отложений Прикумской и Терско-Сунженской зон. Изотопный состав стронция термальных вод зависит от ряда факторов: от литологического состава вмещающих пород, степени метаморфизма подземных вод и вмещающих пород, содержания в них рубидия и абсолютного возраста горных пород.

По полученным значениям изотопных соотношений ($^{87}Sr/^{86}Sr$) в термальных водах можно проследить некоторые тенденции. При прочих равных условиях в водах, приуроченных к карбонатным породам, наблюдаются относительно высокие значения изотопных отношений, что вероятно получается за счет радиогенного ^{87}Sr. Выделяется изотопное отношение в водах глубокой термальной скважины Тарумовская, где имеются высокие термобарические условия. Не исключается содержание в этих водах определенной доли компонентов и глубинного происхождения, в пользу чего говорят геолого-тектонические условия, геохимические аномалии и АВПД. Место расположения скважины Тарумовская приурочено к зоне тектонического нарушения, и глубинные газофлюидные компоненты могут поступать в пластовые воды данной площади.

В настоящее время, по мнению большого числа исследователей, предполагается, что главным источником тепловой энергии недр Земли является радиоактивный распад долгоживущих естественных радиоактивных элементов (изотопов). Для радиоактивных элементов известна скорость энерговыделения, но прямые данные о содержании урана, тория и калия на долю которых приходится до 99% радиогенного тепла, имеются только для верхней части земной коры. Для внутренних оболочек предполагают содержания этих элементов на основе разных моделей первоначального состава Земли, исходя из состава ксенолитов мантийных пород и метеоритов. Оценки полного количества естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) и их вклада в энергетику Земли продолжают оставаться еще спорными.

Дискуссионными являются и вопросы об энергетических источниках геотектонических процессов. Природу источников тепла нельзя определить по одним только тепловым измерениям. Задача заключается в выборе такого комплекса регистрируемых на поверхности Земли эффектов, являющихся следствием дифференциации вещества при термической эволюции, который позволит увеличить достоверность оценки вклада ЕРЭ в энергетический баланс коры и мантии. Как показали исследования экспериментальных данных по динамике потоков тепла и гелия через земную поверхность, присутствия в мантии первичного гелия, цикличности тектономагматической активности и некоторых особенностей дифференциации вещества при этом, фиксируемых изотопией стронция, удается объяснить модель, в которой в качестве основных энергетических источников эволюции коры и мантии рассматриваются естественные радиоактивные элементы (уран, торий, калий) [1, 2, 3, 7 и др.]. В работе [7] приводятся сведения об оценке удельной радиотеплогенерации в породах характерных консолидированным слоям земной коры в $n \cdot 10^{-12}$ Вт/кг: гранит – 940, базальт – 170, перидотит – 2,7, хондрит – 5,2, верхняя континентальная кора – 390, Земля в среднем – 4,2.

Большое внимание изучению радиогенного тепла в связи с эволюцией Земли и образованием земных оболочек придавал А.П. Виноградов [1]. Он считал: «… во всей проблеме ба-

ланса тепла в Земле исключительное значение имеет точное знание количеств урана, тория и калия-40 в веществе мантии и земной коры».

Благодаря новым аналитическим методам за последние годы собран огромный материал по распространенности естественных радиоактивных элементов в различных породах земной коры, а также в образцах метеоритов. В среднем каменные метеориты (хондриты) содержат: K – $8{,}5\cdot10^{-2}$, Th – $3{,}8\cdot10^{-6}$, U – $1{,}5\cdot10^{-6}$ % [1].

Таблица 1.

Генерация тепла в Земле, эрг/г [1].

Элемент	Тепловая энергия, генерируемая за год	Тепловая энергия, генерируемая за год в настоящее время мантией (вещество хондритов)	Общее количество тепла на грамм вещества мантии, образовавшееся в течение $4{,}5\cdot10^9$ лет
^{40}K	$0{,}912\cdot10^7$	0,920	$1750\cdot10^7$
^{232}Th	$0{,}824\cdot10^7$	0,313	$157\cdot10^7$
^{235}U	$18{,}02\cdot10^7$	0,019	$162\cdot10^7$
^{238}U	$2{,}95\cdot10^7$	0,439	$285\cdot10^7$
	$22{,}706\cdot10^7$	1,7	$2354\cdot10^7$

Содержания радиоактивных элементов в различных горных породах земной коры и ее оболочках неодинаковые. В веществе земного ядра содержание радиоактивных элементов считаются ничтожно малыми по сравнению с каменными метеоритами (хондритами) состав которых принимается за первоначальное вещество Земли. В породах мантии их значительно меньше, чем в породах земной коры.

Максимальные количества естественных радиоактивных элементов сконцентрированы в осадочных породах и гранитах (особенно кислых) и значительно меньше в базальтах. По проведенным [1] экспериментальным работам обогащение горных пород земной коры – базальтов и гранитов, радиоактивными элементами связано с процессами выплавления и дегазации легкоплавкого вещества мантии под влиянием тепла, генерируемого этими элементами. По данным (табл. 1) радиогенное тепло, воспроизведенное земным шаром, получается $2354\cdot10^7$ эрг/г $\cdot$ $4\cdot10^{27}$ г (для силикатной фазы Земли, мантии и земной коры), что составит $9{,}4\cdot10^{37}$ эрг за $4{,}5\cdot10^9$ лет. Эта тепловая энергия разогревала недра Земли. Часть тепловой энергии, генерируемой радиоактивными элементами, теряется Землей. По многочисленным определениям теплового потока на поверхности Земли за среднее значение принято 50 мВт/м^2. А в среднем же тепловой поток на континентах несколько меньше чем на дне океана.

При этом среднем значении теплового потока с поверхности Земли ежегодно излучается $9\cdot10^{27}$ эрг. тепловой энергии.

При принятых значениях ЕРЭ в земных породах и среднем тепловом потоке Земли, наблюдается некоторый дефицит в количестве радиоактивных элементов, что можно объяснить не полнотой знания условий потери тепла Землей, а также за счет радиоэлементов, с короткими периодами полураспада, которые тоже оставили тепло и других источников внутриземной энергии.

Нами достаточно подробно изучено распределение урана, тория и калия в литологических разностях осадочной толщи Восточного Предкавказья [6]. Образцы горных пород для анализа выбирались из кернового материала опорных и промысловых скважин.

На основе имеющихся радиогеохимических данных нами произведена оценка доли радиогенного тепла в наблюдаемом на поверхности тепловом потоке, а также оценка потенциальной петротермальной энергии, заключенной в определенном объеме осадочных пород на примере площади Южно-Буйнакская (скв. 1) и других месторождений. Состав пород литологического разреза по керновому материалу был подробно изучен на содержание радиоактивных элементов, а также собраны и систематизированы теплофизические и геофизические параметры этих пород.

С целью оценки вклада радиогенного тепла, генерируемого в процессе распада естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) - урана, тория, калия, проведено исследование их содержания по разрезу осадочной толщи на примере пл. Южно-Буйнакская. Изучено распределение ЕРЭ в горных породах как по литологическим разностям, включая граниты палеозойского фундамента, так и в зависимости от возраста отложений. Чувствительность определения радиоактивных элементов в породах составила: урана – $3 \cdot 10^{-4}$ %, тория – $3 \cdot 10^{-4}$ %, калия – 0,01%.

Концентрации радиоэлементов в различных по литологии породах осадочной толщи убывают соответственно от аргиллитов и алевролитов до доломитов и известняков. По разрезу площади Южно-Буйнакская для литологически однотипных пород в зависимости от возраста отложений значительных вариаций содержания радиоэлементов не наблюдается. Максимальными концентрациями отличаются образцы керна гранитов палеозойского фундамента. Расчет величины радиотеплогенерации (А) проводился по формуле [9] с послойным определением величины радитеплогенерации (ПОРТ) согласно [2].

$$A = (9{,}707 \cdot 10^{4} \cdot U + 2{,}636 \cdot 10^{4} \cdot Th + 3{,}582K)\ \rho\ [\text{мкВт/м}^3], \quad 1.$$

где U, Th, K – концентрации элементов в горных породах в г/г; ρ – плотность пород г/см^3.

Радиотеплогенерация в породах меняется соответственно содержаниям ЕРЭ – от минимального значения 0,48 мкВт/м^3 в известняках апшеронских отложений до значений (1,78–2,86) мкВт/м^3 соответственно в аргиллитах и алевролитах триаса и достигает максимальных значений (3.76–4,2) мкВт/м^3 в гранитах палеозойского фундамента. Рассчитанное значение величины радиотеплогенерации, включая 210 м вскрытой части гранитов, создает по площади Ю-Буйнакская тепловой поток 7,1 мВт/м^2, что составляет ~ 10,0 % от наблюдаемого на поверхности теплового потока, равного 73,6 мВт/м^2.

Следует отметить, что значения радиотеплогенерации для сухих пород даны без учета количества ЕРЭ в пластовых флюидах. Для более точной оценки генерации тепла в осадочной толще, особенно в породах с хорошими коллекторскими свойствами, необходимо учесть и ЕРЭ в пластовых флюидах, что по нашим подсчетам составит в среднем около 5% от приведенных выше значений. При концентрациях урана в породах ниже предела чувствительности метода, для расчета теплогенерации принимались соответственно кларковые значения.

Данные ГСЗ по Прикумской зоне позволяют выделить слои мощностью до 10 км, где скорость V_p составляет (6,4–6,6) км/с, что считается характерным для гранитного слоя. Если принять значение радиотеплогенерации во всем гранитном слое равным расчетному согласно нашим данным, то доля теплового потока от радиогенного тепла возрастает до 61,0% и составляет величину 44,70 мВт/м^2. Принимая для Прикумской зоны мантийную составляющую теплового потока аналогично, как для западной части Прикаспийской впадины и вала Карпинского, равной 20 мВт/м^2, получим равенство для наблюдаемого теплового потока:

$$q = 44.70 + 20 + \sum_{i}^{n} \text{ТП}i = 73.6, \quad 2.$$

где ТПi – поток, генерируемый в слоях консолидированной земной коры; n – число слоев.

Оставшуюся часть теплового потока: 73,6 − 64,70 = 8,90 (мВт/м^2), можно отнести на радиотеплогенерацию в других слоях земной коры – базальтовом. Баланс наблюдаемого теплового потока, таким образом, можно объяснить только радиогенными источниками тепла, что приводится в работах и других авторов [2]. Аналогичные расчетные данные получаются и по другим геотермальным месторождениям Восточного Предкавказья [6]. Полученные экспериментальные данные по оценке радиогенного тепла в земной коре не противоречат

тому, что большая часть наблюдаемого на поверхности теплового потока обеспечивается за счет процессов распада ЕРЭ.

Такая оценка величины радиотеплогенерации в осадочной толще нами проводилась и по другим геотермальным месторождениям Дагестана. Результаты наших расчетов показывают, что в осадочной толще мощностью до 5 км за счет процессов радиотеплогенерации может образоваться до 10% наблюдаемого на поверхности теплового потока или (5-7) мВт/м^2.

Литература:

1. *Виноградов А.П.* Избранные труды. Геохимия океана. М.: Наука, 1989. 220 с.
2. *Боганик Н.С.* Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М.: Наука, 1975. 160 с.
3. *Вовк И.Ф.* Радиолиз подземных вод и его геохимическая роль. М.: Недра, 1979. 231 с.
4. *Мирзоев Д.А., Шарафудинов Ф.Г.* Геология месторождений нефти и газа Дагестана. Махачкала: Даг. кн. изд-во, 1986. 311 с.
5. *Моисеенко У.И., Смыслов А.А.* Температура земных недр. Л.: Недра, 1986. 180 с.
6. *Маммаев О.А.,* Подземные воды Восточного Предкавказья (формирование, гидрогеохимия и процессы радиотеплогенерации). Махачкала: ДНЦ РАН, 2006. 280 с.
7. *Шарма.* Геофизические методы в региональной геологии / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 487 с.
8. *Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П.* Изотопный состав гелия и тепловой поток – геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника. 1979. № 5. С. 3–23.
9. *Смыслов А.А., Моисеенко У.И., Чадович Т.З.* Тепловой режим и радиоактивность Земли. Л.: Недра, 1979. 191 с.
10. Маммаев О. А., Абдуллаева А. С., Асварова Т. А. Естественные радионуклиды в горных породах и почвах Дагестана. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Почвенные ресурсы и проблемы продовольственной безопасности» Тр. ИГ ДНЦ РАН. Вып. 65, Махачкала, 2015. С. 186-189.

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КПД ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ НА СМЕСИ ВОДА–Н-ПРОПАНОЛ

Османова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: badji@mail.ru

На основе собственных прецизионных экспериментальных данных о p,ρ,T,x-зависимостях гомогенных смесей вода–н-пропанол состава x (0.2, 0.5 и 0.8 мольных долей н-пропанола) аналитически рассчитаны их дифференциальные и интегральные термодинамические свойства в однофазной (жидкой, паровой) области, вдоль кривой сосуществования фаз, в критической и сверхкритической областях параметров состояния в диапазоне по: температуре 373.15–623.15 К, плотности 3-820 кг/м^3 и давлению до 50 МПа. Экспериментально установлено, что характер p,ρ,T-зависимости смеси вода–н-пропанол в исследованном диапазоне температур такой же как у индивидуальной жидкости, а давление паров смеси на линии насыщения при данной температуре больше давления паров воды и н-пропанола в отдельности. Критическая линия смесей вода–н-пропанол, в отличии от критических линий смесей вода–метанол и вода–этанол, имеет ярко выпуклую форму для значений x до 0.5 мольные доли н-пропанола.

Установлено, что замещение воды смесью вода–н-пропанол состава до 0.2 мол. доли н-пропанола в циклах паротурбинной установки (ПТУ) позволяет понизить нижний предел диапазона рабочих температур установки до 50 К. Сравнительным энергетическим анализом циклов ПТУ на воде и на смесях вода–н-пропанол, проведенным в одинаковых термобарических условиях показано, что термический КПД цикла ПТУ на смеси 0.2 мол. доли н-пропанола больше, чем на воде. На основе этого сделан вывод о возможности эффективного использования смеси вода–н-пропанол состава до 0.2 мол. доли н-пропанола в качестве рабочего вещества (тела) цикла ПТУ.

Эффективность энергетических установок, в частности преобразователей тепловой энергии в электрическую, зависит не только от конструкции их тепломеханического обору-

дования и выбора термодинамического цикла, но и от полноты использования в расчетах теплофизических свойств рабочего вещества (тела). Поскольку диапазон рабочих температур энергоустановок находится в критической области и выше, знание теплофизических свойств рабочего вещества в этих термобарических условиях очень важно. Основным рабочим веществом ПТУ является вода, теплофизические свойства которой исследованы подробно, и для инженерных расчетов принята Международная система уравнений [1].

Исследователями для повышения эффективности преобразователей тепловой энергии в электрическую рекомендовано в качестве рабочего тела во вторичном контуре использовать смеси (бинарные энергоустановки) [2,3]. Преимущество смесевых рабочих веществ по сравнению с индивидуальными состоит в возможности регулировать диапазон рабочих температур энергоустановки путем изменения их состава, что позволяет унифицировать значительную часть тепломеханического оборудования преобразователей, рассчитанных для различных источников тепла.

Цель данной работы – понизить нижний предел диапазона рабочих температур паротурбинной установки (ПТУ), работающей на воде, замещением её систеиой вода–н-пропанол оптимального состава. Выбор этой системы обоснован тем, что н-пропанол относительно термически стабилен при температурах выше его критической и в водном растворе при малых концентрациях практически не разлагается [4].

Подробные сведения об экспериментальных данных о p,ρ,T - зависимости и термодинамических свойствах чистого н-пропанола и смесей его с водой можно найти в наших ранних работах [5-11]. Ниже приведены выборочно диаграммы, характеризующие термодинамическое поведение основных свойств смесей вода–н-пропанол (рис.1-4).

Как видно из рис.1 и 2, характер p,ρ,T,x-зависимости смеси вода–н-пропанол такой же как у индивидуальной жидкости, что упрощает аналитическое описание их, в частности, определение параметров кривых фазового равновесия и критического состояния. Критическая линия смесей вода–н-пропанол, в отличии от критических линий смесей вода–метанол и вода–этанол [5-7], имеет ярко выраженную несимметричную выпуклую форму (рис.3).

Из таблицы 1 и рис.3 видно, что изменением состава смеси можно регулировать её критические параметры и подбирать оптимальный диапазон рабочих температур энергоустановки. Как будет показано ниже, термический и эффективный КПД цикла ПТУ достигают максимального значения на смеси состава 0.2 мол. доли н-пропанола.

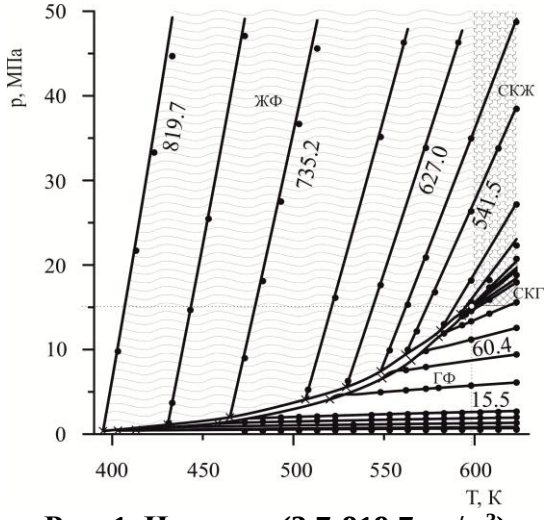


Рис. 1. Изохоры (3.7-819.7 кг/м^3) зависимости давления от плотности смеси вода–н-пропанол состава *x=0.2* (линия – расчет, точки - эксперимент)

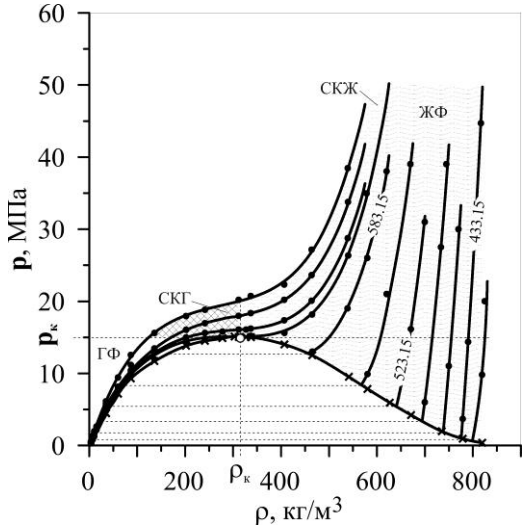


Рис. 2. Изотермы (*413.15-623.15 K*) зависимости давления от плотности смеси вода–н-пропанол состава *x=0.2* (линия – расчет, точки - эксперимент)

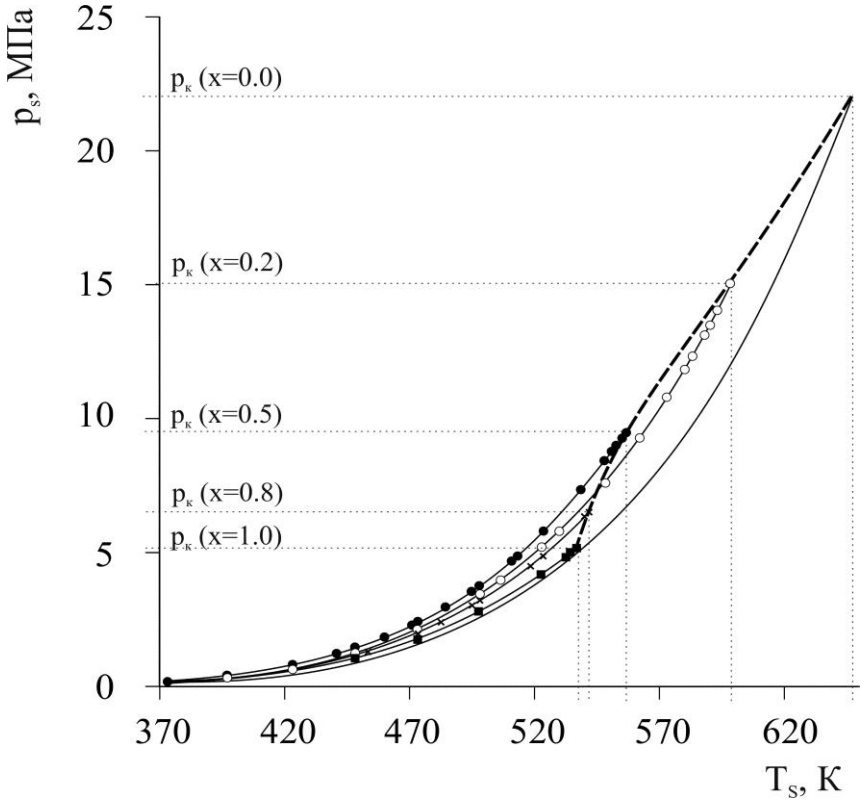


Рис. 3. Зависимость давления насыщения от температуры вдоль критических изохор воды (—)[1], н-пропанола (■)[13], смесей состава *x:* *0.2* (○)*; 0.5*(●)*; 0.8*(×)[10]; критическая кривая (---).

Таблица1.

Значение критических параметров смеси вода–н-пропанол [10].

x, мол.доли н-пропанола	$T_к$, K	$p_к$, МПа	$\rho_к$, кг/м^3	$Z_к$
0.0	647.096	22.064	321.96	0.2295
0.2	598.15 ±0.3	15.1 ±0.2	303.2 ±0.5	0.2613
0.5	557.15 ±0.3	9.5 ±0.2	287.5 ±0.5	0.2752
0.8	541.15 ±0.3	6.5 ±0.2	284.2 ±0.5	0.2654
1.0	536.11	5.28	273.23	0.2577

x, мол.доли н-пропанола	Тк, K	рк, МПа	ρк, кг/м3	Zк
0.0	647.096	22.064	321.96	0.2295
0.2	598.15 ±0.3	15.1 ±0.2	303.2 ±0.5	0.2613
0.5	557.15 ±0.3	9.5 ±0.2	287.5 ±0.5	0.2752
0.8	541.15 ±0.3	6.5 ±0.2	284.2 ±0.5	0.2654
1.0	536.11	5.28	273.23	0.2577

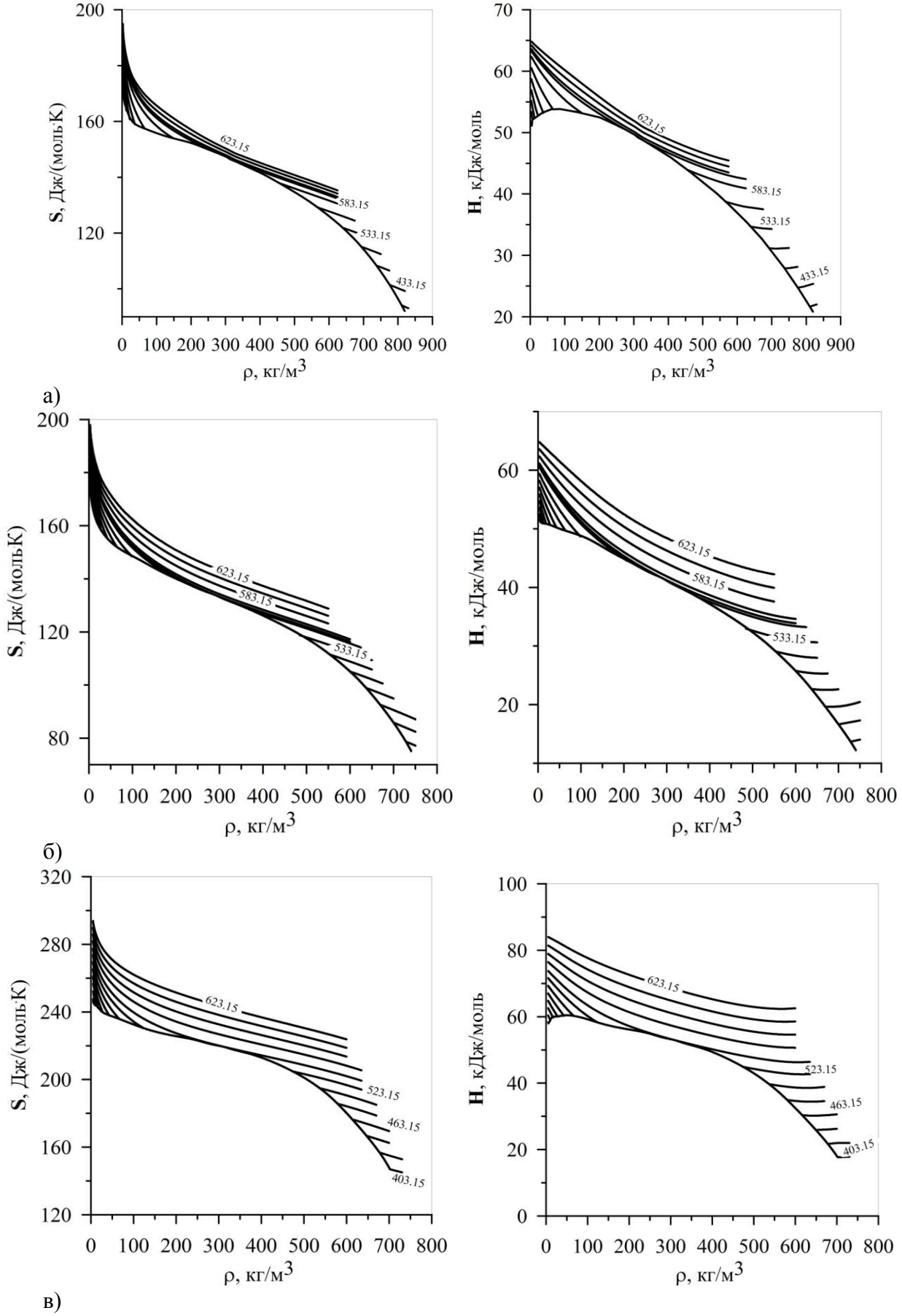


Рис. 4. Изотермы (*403.15-623.15 K*) зависимости энтропии и энтальпии от плотности смеси вода–н-пропанол состава *x*, мол.доли: *0.2*(а), *0.5*(б) и *0.8*(в)

Для оценки энергетической эффективности ПТУ проведен расчет циклов её на воде и на смесях вода–н-пропанол по методике из работы [12] в одинаковых условиях (давление и температура пара на входе в турбину p_1=16 МПа и T_1=623.15 К; температура пара в конденсаторе T_2=403.15 К; КПД парового котла $\eta_к$=0.91; внутренний относительный КПД турбины η^T_{oi}=0,88; внутренний относительный КПД насоса η^H_{oi}=0,85; механический КПД η_M=0.99; КПД электрического генератора $\eta_Г$=0.98). Как видно из рис.5, при одинаковых термобарических условиях (623.15 К и 16 МПа) водяной пар насыщенный, а смеси воды с н-пропанолом находятся в сверхкритической области. Следовательно, для перевода насыщенного пара в сверхкритическое состояние необходимо его подогреть, затратив дополнительную энергию. Результаты расчета приведены в таблице 2 и демонстрирует рис.6.

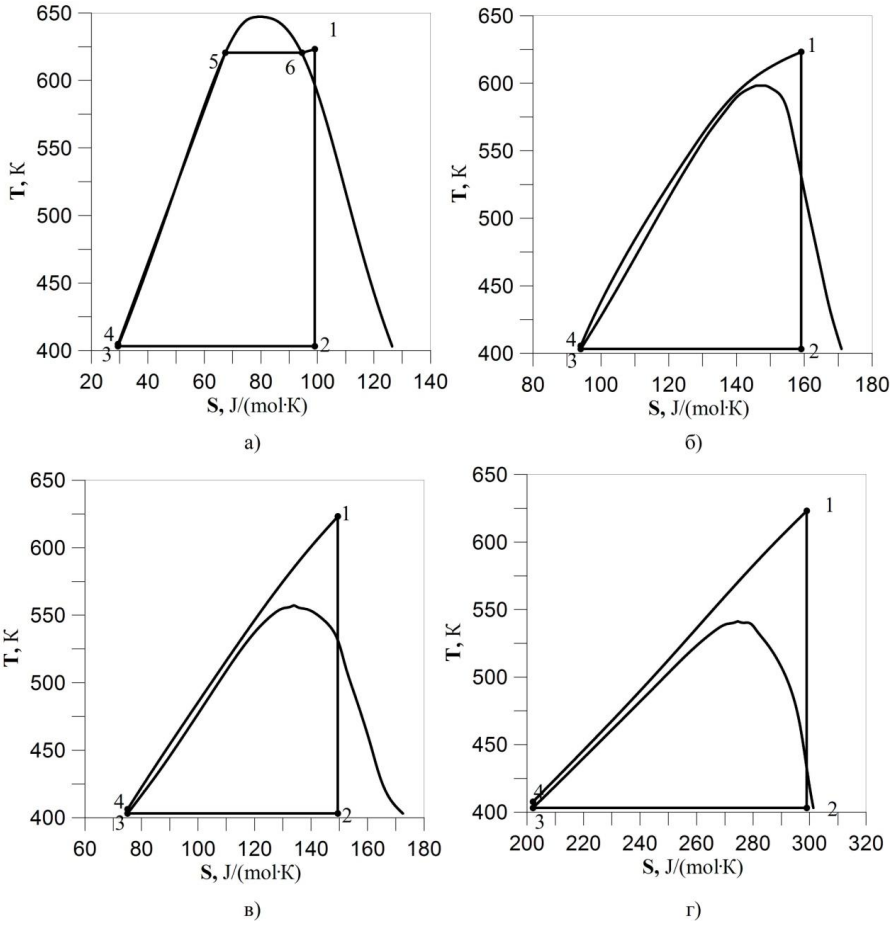


Рис. 5. *T-S* диаграмма цикла ПТУ, совершаемого водой (а) и смесями вода–н-пропанол состава *x*, мол. доли: 0.2(б), 0.5(в), 0.8(г)

Таблица 2.

Значения КПД для цикла с водой и со смесью вода–н-пропанол 0.2, 05, 08 мол. доли.

Рабочее вещество	вода	Вода–н-пропанол, x=0.2	Вода–н-пропанол, x=0.5	Вода–н-пропанол, x=0.8
Термическое КПД η_t, %	24.4	27.6	22.9	20.9
Внутреннее КПД η_i, %	21.3	23.9	19.7	17.8
Эффективный КПД $\eta_e^{ПТУ}$, %	18.7	21	17.2	15.7

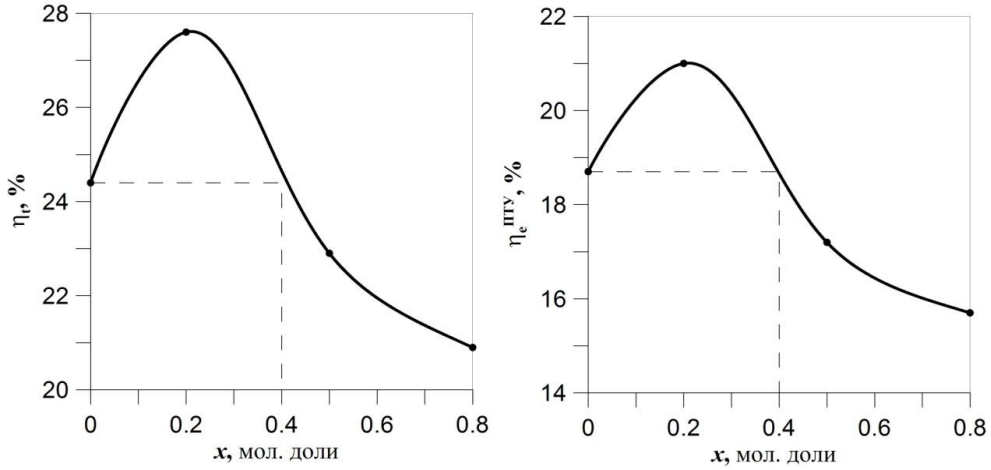


Рис. 6. Зависимость термического и эффективного КПД ПТУ от состава *x* смеси вода–н-пропанол

Как видно из рис.6 и таблицы 2, величина термического и эффективного КПД ПТУ на смеси вода–н-пропанол растёт с ростом концентрации н-пропанола и достигает максимума при *x=0.2*, при дальнейшем росте концентрации КПД плавно уменьшаются, и при *x→0.4* приближаются к КПД цикла ПТУ на воде.

Таким образом, замещение воды смесью вода–н-пропанол состава до 0.2 мол. доли н-пропанола в циклах ПТУ позволяет:

1. понизить нижний предел диапазона рабочих температур установки до 50 К, что оправдано с точки зрения энергосбережения;

2.увеличить термический и эффективный КПД;

3.унифицировать значительную часть тепломеханического оборудования энергоустановок, что экономически целесообразно.

Литература:

1. IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam // Executive Secretary R.B.Dooley. Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA 94304. USA.
2. *Васильев В.А., Крайнов А.В., Говорков И.Г.* Расчет параметров унифициро- ванной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси // Теплоэнергетика, №5, 1996, С. 27–32.
3. *Калина А.И.* Новая бинарная энергосистема с бинарным циклом. // Калекс, LLC., 2630 Карлмонт Драйв, Бельмонт, Калифорния, 94002 США.
4. *Dzhapparov T A, Bazaev A R* //Journal of Materials Science and Engineering 2012, №12, С.786-
5. *Abdurashidova A.A., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Abdulagatov I. M.* The Thermal Properties of Water-Ethanol System in the Near-Critical and Supercritical States //J. High Temperature, Vol.45, №2, 2007, P.178–186.
6. *Bazaev A.R., Abdulagatov I.M., Bazaev E.A., Abdurashidova A.A. and Ramazanova A.E.* PVT measurements for pure methanol in the near-critical and supercritical regions //J. of Supercritical Fluids, Vol.41, №2, 2007, P.217-226.
7. *Bazaev A.R., Abdulagatov I.M., Bazaev E.A. and Abdurashidova A.A.* p,V,T,x Measurements of $\{(1-x)_{H2}O+x_{C2H5}OH\}$ mixtures in the near-critical and supercritical regions // J. of Chemical Thermodynamics, V.39, №3, 2007, P.385–411.

8. *Bazaev A.R., Karabekova B.K., Abdurashidova A.A. p,* ρ, *T*and *x* Dependences for Supercritical Water–Aliphatic Alcohol Mixtures // Russian Journal of Physical Chemistry, Vol.7, №8, 2013, P.955-967.
9. *Karabekova B.K, Bazaev E.A., Bazaev A.R.* Thermodynamic Properties of Water–Aliphatic Alcohol Systems in a Wide Range of Parameters // Russian Journal of Physical Chemistry B,Vol.9, №8, 2015, P.35-60.
10. *Bazaev E.A., Bazaev A.R.* Calculating Critical Exponents of the phase-equilibrium curve for liquid-vapor aqueous solutions of aliphatic alcohol// Russian Journal of Physical Chemistry B, 2013, Vol. 87, No. 6, pp. 952–955.
11. *Abdulagatov I.M., Bazaev A.R., Bazaev E.A., Dzhapparov T.A.* PVT properties of 1-propanol in the critical and supercritical regions //The Journal of Supercritical Fluids, Vol.117, 2016,P. 172-193.
12. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. 158 с.

НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ. I.УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОГО ТИПА

Петрик Г.Г.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: galina_petrik@mail.ru

Представлены результаты, полученные автором при системном подходе к поиску простого физически обоснованного уравнения состояния (УС). Первая часть работы содержит информацию о малопараметрических УС ван-дер-ваальсового типа – их систематизацию и анализ. Подчеркнут основной недостаток этих уравнений – отсутствие связи с микроуровнем. Сформулированы вопросы к УС, на которые невозможно получить ответы при стандартном к ним подходе. Сложившаяся ситуация требует нового подхода к проблемам.

Введение. В основе любой энергетики – от традиционной до возобновляемой – лежат теплофизические исследования, частью которых является моделирование свойств технически важных веществ – чистых и смесей – с помощью уравнений состояния. Проблемы получения и выбора УС сохраняют актуальность вследствие нерешенности. В информационном поле УС сосуществуют два тренда. Один – это малопараметрические, а второй – многоконстантные УС (в виде полиномов, где число подгоночных параметров может быть и 100, и 150). Что касается малопараметрических уравнений, то «мало» теперь может означать и 10, и 15 параметров. Очевидно, что они также являются подгоночными и вряд ли стоит искать в них физический смысл, поскольку простое увеличение числа параметров не приводит к новому знанию. В то же время сохраняется двуединый интерес к простым УС с числом параметров от 2 до 5. (Именно в отношении этих УС известные авторы задавались вопросами типа – «Уравнение состояния – какое?» [1] и «Где мы находимся и куда нам идти?» [2], вынесенными в заглавия работ). Актуален практический интерес к УС как инструменту расчета, т.е. как математической модели. Не менее очевиден фундаментальный интерес к ним как физической модели, как средству приближения к обоснованному прогнозу и описанию свойств веществ из конкретных молекул. В таком случае особое внимание должно быть уделено молекулярным моделям, лежащим в основе соответствующих уравнений. Именно УС, параметры которых связаны с характеристиками молекулярных моделей, положенных в их основу, представляют особый интерес. Причина в том, что чем более проработана молекулярная мо-

дель и связи ее с параметрами и структурой уравнения, тем больше вероятность получить простое УС.

Поиск подобных УС логично начать с анализа известной информации. На временной шкале истории проблемы явно отмечены три начала. Первое - это открытие первых газовых законов, более трехсот лет назад. «Второе начало» - это появление УС Ван-дер-Ваальса, которое вызвало в конце XIX в. бум в области УС. Оценкой выдающегося результата стала Нобелевская премия (в 2015 г. ей исполнилось 105 лет), которую ученый получил с формулировкой за «успехи в теории уравнений состояния». Примечательно, что к тому времени знаменитое УС оказалось практически побежденным многоконстантными уравнениями. «Третье начало» в середине XX в. отмечено УС Редлиха-Квонга [3]. Заслуга авторов - возрождение интереса к малопараметрическим УС. Это время охарактеризовано появлением огромного числа работ - независимых эмпирических модификаций двух самых известных кубических УС – ВДВ и Редлиха- Квонга, которые называют теперь УС вдв-типа (вида, формы). Предложено большое количество частных форм УС вдв-типа [4-6]; исследованы общие кубические уравнения [7,8]. Показано, что при надлежащем подборе параметров все известные частные формы могут быть получены из общих УС. На этом основании делается вывод, что проблема простых кубических УС исчерпана и новой информации получить не удастся. При этом основным недостатком УС вдв-типа считается их слабая связь с микроуровнем (вернее, ее отсутствие). Именно это является как причиной вопросов, имеющихся к различным УС вдв-типа, так и невозможности получить на них ответы. В то же время накопленный материал требует проведения интеллектуального анализа, результатом которого должны стать новые знания и их корректная интерпретация. Мы убеждены, что значимость простого УС будет только усиливаться с углублением найденной его связи с молекулярной моделью (объекты и взаимодействия).

Две самые простые молекулярные модели объектов – это точечные центры и жесткие сферы. Разработка двух моделей, сравнительный анализ их возможностей на уровне УС, взаимные переходы, вопросы к одной и ответы на эти вопросы в рамках другой составляет содержание нашей работы.

УС ван-дер-ваальсового типа. Систематизация и анализ. Проблемы

1. Классификация УС вдв-типа по сходству их структуры с УС ВДВ. УС Ван-дер-Ваальса (1), которое до сих пор многими считается физически наиболее обоснованным, в количественном отношении оставляет желать много лучшего. Можно допустить, что недостаточно адекватное описание свойств на основе этого УС является следствием трех различных ситуаций и все множество подобных уравнений-модификаций можно разбить на три группы, по признаку формального сходства их структуры со структурой УС Ван-дер-Ваальса:

Группа 1: «термический» член адекватен описанию свойств системы, поэтому $\frac{RT}{V-b} = idem$; надо улучшить член $\frac{a}{V^2}$, отвечающий силам притяжения;

Группа 2: член $\frac{a}{V^2} = idem$, так как достаточно правильно отображает поведение реальной системы; неадекватность в описание вносит «неправильный» член $\frac{RT}{V-b}$, следовательно, надо улучшить вклад, связанный с отталкиванием,

Группа 3: оба вклада не адекватны; оба должны быть улучшены.

Опора на смысл вкладов УС подчеркивает, очевидно, физическую сущность модели. Если «рассортировать» множество УС по указанному признаку, то выясняется, что у каждого из трех подходов имеются свои явные или неявные сторонники. Перечислим некоторых из них, наиболее известные:

✓ 1-ая группа УС, авторы: Клаузиус (1880), Бертло (1900), Редлих и Квонг (1949), Пенг и Робинсон (1975), Мартин (1979), Харменс, Кнапп (1980), Тейа (1986), Баталин, Брусиловский (1992);

✓ 2-ая группа УС, авторы: Лоренц (1881), Егер (1891), Больцман и Мах (1899), Вукалович, Новиков (1939), Карнахан, Старлинг (1972), Каплун, Мешалкин (2001);

✓ 3-я группа УС, авторы: Шиллер (1890), Кэм (1919), Мартин (1967), Ишикава, Чанг, Лу (1980), Явери, Юнгрен (1988).

Вид этих и многих других уравнений можно найти в обзорной литературе [4-6, 9]. Напомним, что все УС вдв-типа рассматриваются как независимые.

2. Классификация УС вдв-типа по числу параметров. Обычный способ классификации УС – «сортировка» по числу параметров. Такой подход к УС, очевидно, подчеркивает математический аспект модели.

2а. «Двухпараметрические» уравнения состояния. Приведем вид нескольких двухпараметрических УС, начиная с самого знаменитого:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \text{ – УС Ван-дер-Ваальса (1873)} \qquad (1)$$

Напомним суть оригинальной модели ВДВ: цель УС - учесть наличие собственного объема у молекулы – жесткой сферы (с ним связан параметр b, это делает первый вклад в (1)) и существование очень слабого притяжения между ними (оно настолько слабое, что не влияет на трансляцию), a – когезионный параметр; об отталкивании речь не шла.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)} \text{ – УС Редлиха и Квонга (1949);} \qquad (2)$$

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \text{ – УС Пенга и Робинсона (1976);}$$

Современное представление – первый вклад в этих УС отвечает отталкиванию жестких сфер. Как правило, авторы считают, что два параметра b, a новых УС имеют тот же смысл, что и в УС Ван-дер-Ваальса. Некоторые авторы объясняют достаточно хорошее качество этих известных УС тем, что хотя оба вклада соответствующих уравнений некорректны, но ошибки взаимно уничтожаются. Вероятно, такой взгляд имеет право на существование именно при эмпирической модификации УС. В то же время мы ставим своей целью получение и поиск «физических» УС, в основе которых лежат модели с имеющими смысл параметрами. И потому переход к более адекватной молекулярной модели автоматически должен обозначать более адекватное описание отдельных вкладов УС. Уже на этом этапе можно привести **ряд вопросов** к этим УС, на которые невозможно получить ответы, если оставаться в рамках обычного подхода. Например, почему УС Редлиха-Квонга, которое как математическая модель совсем ненамного сложнее УС ВДВ, намного успешнее его в расчетах, что отмечали многие авторы? Почему УС ВДВ, будучи предложено для описания свойств газов, хуже описывает свойства разреженного газа, чем свойства твердого тела при температуре, близкой к температуре плавления [10]? Каков «корректный» смысл параметра b в УС Редлиха-Квонга [11]?

2б. Трехпараметрические уравнения состояния – две формы. Первая группа УС (RT/(V-b)=idem). Впервые третий параметр был введен Клаузиусом в 1880г в УС, специально построенное для описания результатов знаменитых опытов Эндрюса по двуокиси углерода. Трехпараметрические УС в общей для УС 1-й группы форме (3) были предложены независимо в трех работах [12-14] – почти сто лет спустя. Смысл нового параметра c авторами работ не обсуждался

$$P = \frac{RT}{(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)} \qquad (3)$$

Многие из известных УС (в том числе и приведенные выше двухпараметрические), относящиеся к первой выделенной группе УС вдв-типа, после простого преобразования могут быть записаны в общем виде (3) трехпараметрического (b,c,a) уравнения. Приходится признать существование **проблемы третьего параметра *c*** УС. **Первый вопрос** – о смысле нового параметра, который входит в притягивательный вклад. Непонятно, почему этот вопрос не обсуждается. Вернее, этому есть объяснение - научный авторитет нобелиата – Я. Ван-дер-Ваальса, согласно которому за притяжение отвечает параметр *a*. С учетом другого современного положения (автор неизвестен, но это не Ван-дер-Ваальс), согласно которому в УС первый вклад связан с отталкиванием сфер – на долю параметра *c* «смысла не остается». Однако этот вклад не описывает отталкивания сфер. Это уравнение с коволюмом, которое учитывает наличие у объектов собственного объема и представляет УС невзаимодействующих потенциально жестких сфер. (Собственно, так полагал и сам Ван-дер-Ваальс, предлагая свое УС). К чему это ведет?

Второй, важный **вопрос** – к чему вообще ведет появление в УС третьего параметра? Этот вопрос был нами поставлен в [15]. Как это может отразиться на двух первых параметрах? (в литературе ни вопроса, ни дискуссии мы не встречали). Очевидно, можно предложить несколько вариантов ответа. Если УС рассматривается формально как математическая конструкция, неважен смысл параметров. Если же оно рассматривается как уравнение, в основе которого лежит конкретная молекулярная модель, ***все*** параметры должны иметь смысл. Подтверждением первого варианта является УС Химпана и его подход [16]

$$(P+\frac{a}{f(T)V(V-b)})(V-c)=RT \quad P=\frac{RT}{V-c}-\frac{a}{f(T)V(V-b)}$$

Порядок введения в первом уравнении параметров – *a,b,c* - поочередно - будучи сохранен во втором, выглядит, как демонстрация автором тезиса, что **введение в УС третьего параметра лишает два первых общепринятого смысла либо изменяет его**, но т.к. автор не знает, как именно, он вообще не затрагивает эту проблему. Подтверждением второго варианта ответа служат результаты, полученные нами для модели взаимодействующих точечных центров, где все три параметра УС имеют смысл и связаны с проявлением межмолекулярных сил. (Об этом – во второй части работы). А вот УС вдв-типа из этой схемы выпадают. Авторы УС-модификаций (т.е. новых уравнений) утверждают, что параметры *a, b* имеют тот же смысл, что в модели ВДВ, следовательно, **введение третьего параметра не сказывается на смысле первых двух**. Корректно ли такое допущение – должен показать анализ.

Весьма интересно с новых позиций оценить УС Ван-дер-Ваальса, которое, очевидно, также является частным случаем УС (3). Логично задать вопрос – чем выделяется среди всех других УС этой формы знаменитое УС, считающееся наиболее физически обоснованным? Возможный ответ – тем, что для него равен нулю некий параметр c, не имеющий в этой модели смысла.

УС второй и третьей групп. Обратимся ко второй выделенной по сходству структуры группе УС вдв-типа. Анализ УС вдв-типа был бы неполон без уравнения возмущенной жесткой сферы, предложенного Карнаханом и Старлингом [17]. Считают, что в этой модели учет действия сил отталкивания является теоретически обоснованным и вклад представлен полиномом:

$$\frac{RT}{V}\left(\frac{1+y+y^2-y^3}{(1-y)^3}\right), y=b/4V\,.$$

Самые известные УС на этой основе образованы добавлением к нему притягивательных вкладов УС Ван-дер-Ваальса и Редлиха – Квонга. (Заметим, что полученные УС в этом случае уже не являются кубическими). Согласно нашей (формальной) классификации УС, только в первом случае мы получаем УС из группы №2 (где a/V^2=idem). Во втором же случае, как и во всех других, где изменен притягивательный вклад, получаем УС из группы №3.

Это УС применил Праузнитц, исследуя УС Редлиха-Квонга и сравнивая качество описания, и сделал важные выводы [11,18], из которых мы отметим два. Во-первых, Праузнитц пришел к заключению, что смысл константы b (если, следуя Ван-дер-Ваальсу, связывать ее с объемом молекул, причем именно обычной формулой $b = 4 \times \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3$, где d - это диаметр молекулы) здесь не определен, затемнен, а само значение - «некорректное». Он показал, что добиться улучшения совпадения при расчете фактора сжимаемости Z для двух случаев – уравнения Карнахана-Старлинга и второго, термического, общего для многих УС вдв-го типа (где RT/(V-b)=idem), можно, если принять, что во втором случае параметр b имеет «эффективное» значение, в два раза меньшее, чем b для отталкивательного вклада уравнения Карнахана - Старлинга). Во-вторых, было отмечено, что если для чистых веществ эту величину можно рассматривать как подгоночный параметр, то при расчетах свойств смесей необходимо ясно представлять физический смысл этой величины. **Вопросы остались без ответа,**

Отметим весьма интересную, на наш взгляд, работу Ишикавы, Чанга и Лу [19], в которой авторы предложили УС с более простым первым вкладом, чем полином в уравнении Карнахана-Старлинга. Разработанное ими УС очевидным образом объединяет модифицированный первый вклад и притягивательный «хвост» в виде вклада, взятого от УС Редлиха-Квонга и представляет кубическое уравнение (что желательно для многих):

$$P = \frac{RT}{V}\left[\frac{2V+b}{2V-b}\right] - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)}. \qquad (4)$$

Числовые коэффициенты Ω_a и Ω_b, появляющиеся в УС (4) после перевода его к приведенному виду (относительно критических параметров), были определены авторами для 22 веществ. Как считают сами авторы, предложенное ими УС дает лучшие результаты, чем УС Пенга – Робинсона,

Включим в рассмотрение УС А.Б.Каплуна и А.Б.Мешалкина [20], которое было выделено нами в ходе работы по систематизации и анализу УС:

$$P = \frac{RT}{V}\left(1+\frac{c}{V-b}\right) - \frac{a}{V^2}. \qquad (5)$$

Вид уравнения (5) был получен на основании анализа опытных данных для шести хорошо изученных веществ – сюда вошли аргон, метан, двуокись углерода, аммиак, кислород и четырехфтористый углерод. Параметры a,b,c УС (5) рассматривались авторами как подгоночные константы, их значения были восстановлены по опытным данным для индивидуальных веществ. Было получено, что отношение $c/b > 1$ и изменяется от $1{,}8$ (для аргона) до $3{,}3$ (для двуокиси углерода). Расчеты показали преимущество нового УС по сравнению с некоторыми известными. Авторы [20], подобно многим, утверждают, что молекулярные представления Ван-дер-Ваальса не изменялись, т.е. смысл параметров b,a – обычный; они связаны соответственно с размером «молекул» и их притяжением. О физическом смысле параметра c УС (5) в опубликованных до 2010г работах авторы вообще не упоминают, т.к. он им непонятен.

Очевидно, что теперь мы уже явно выходим на когнитивную «проблему смысла третьих параметров» в УС двух сформированных групп.

К простому УС (5), в котором «сохранен дух идей Ван-дер-Ваальса», авторы пришли не сразу. Вначале первый вклад в УС имел вид полинома шестой степени по нечетным степеням плотности (с шестью коэффициентами, не имеющими физического смысла). И уже от него перешли к простой функции.

Явно или неявно авторы двух из последних анализируемых работ [19] и [20] следуют напутствию, высказанному много лет назад [21] Л.П.Филипповым: «Важно подчеркнуть желательность отхода от традиционных бездумно-полиномных способов описания PVT-

соотношений, поисков компактных и физически осмысленных форм представления термического (и калорического) УС». Прежде чем представить результаты своих исследований, полученных в этом направлении, затронем вопрос об УС с числом параметров, большим трех.

3. **Четырехпараметрические УС.** Известны несколько вариантов наиболее общего вида кубического УС для уравнений 1 группы. В монографии [22] Баталина, Брусиловского, Захарова исследовано кубическое УС вида:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T,V)}{(V+c)(V+d)}. \qquad (6)$$

Авторы считают, что параметры *b, c, d* являются константами, *a* – зависит от температуры. Формулы для расчета параметров УС работают, если заданы два независимых параметра: Z_C, $\Omega=\alpha^{1/3}$. При этом Z_c - это математический параметр, определяемый формой уравнения, но не экспериментальное значение КФС.

Была проведена большая расчетная работа и показано, что УС в форме (6) существенно лучше по сравнению с УС Пенга-Робинсона описывает свойства исследованных веществ (что касается этого УС, то оно было признано наилучшим в середине 70-х годов прошлого века при расчетах углеводородных систем). В то же время, получив такой результат для нового УС, авторы не предпринимают попыток его объяснить. Они демонстрируют стандартный подход в отношении УС – модель тем лучше, чем больше в ней подгоночных параметров. Поэтому УС (6) с 4-мя параметрами лучше, чем УС (3) – с тремя. **Вопросы** остаются.

4. Пятипараметрическое УС вдв-типа 1-й группы. Обратимся в качестве примера стандартного подхода к исследованию в [23] общей формы кубического УС первой группы с пятью параметрами: a, b, k_1, k_2, k_3

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(V-k_3 b)}{(V-b)(V^2+k_1 bV+k_2 b^2)}. \qquad (7)$$

Параметры k_1, k_2, k_3 могут быть константами. При переходе к приведенному виду УС (7) к ним добавляется еще критический фактор сжимаемости (КФС) Z_c и, кроме того, авторы привлекают значение приведенного второго вириального коэффициента B. Согласно [23]: «Три параметра из этого набора могут быть ***произвольно*** (курсив наш) выбраны как независимые переменные и когда этот выбор сделан, значения четырех других могут быть получены из основных уравнений». Логическим представляется подход, когда в таком качестве выбирается тройка имеющих (по мнению автора) физический смысл величин - Z_c, B_c, b. Однако успешные УС получаются, когда берется $k_3=1$, а k_1 и k_2 затем подбираются, чтобы свойства попали в желаемый интервал.

Проведя расчеты фугитивности для метана (36 наборов), авторы приходят к выводу, что в тройках-наборах возможны не любые, но только некоторые комбинации величин (объяснения почему? - нет). И самое главное, неясно – **почему именно задание не имеющих физического смысла параметров дает успешные УС?** Нам неизвестно, чтобы были даны ответы на эти **вопросы.**

Заключение. В работе проведен анализ УС вдв-типа, которые представляют эмпирические модификации уравнений ВДВ и Редлиха-Квонга. Приведем еще одну цитату из Филиппова [21] - «Альтернативой голого эмпирического подхода, естественно, должны быть работы, основанные на тех или иных концепциях и более или менее обоснованных моделях…». Собственно, наши работы преследуют именно эту цель. Разработке УС на основе новой модели посвящена вторая часть нашей работы. Здесь же мы еще раз повторим, что у УС вдв-типа имеются проблемы, порождающие вопросы, на которые невозможно дать ответы, оставаясь в рамках стандартного подхода. Сложившаяся ситуация отвечает предпосылкам применения такого метода исследования как абдукция [24]. Требуется предложить новую гипотезу, новую модель. И если в рамках новой модели будут получены ответы на все вопросы, она должна быть принята в качестве адекватной. Уравнения состояния, полученные на основе новой молекулярной модели, представлены во второй части работы.

Литература:

1. Martin J.J. Cubic Equation of State- Which?, Ind. Eng.Chem. Fundam., 1979, 18, 2, 81-97.
2. Tsonopoulos C. and Heidman J.L. From Redlich – Kwong to the Present. Fluid Phase Equilibria.24 (1985) 1-23.
3. Redlich O. and Kwong J.N.S., On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of state. Fugasities of gaseous solutions// Chem.Rev., 1949, 44, 233-244.
4. Вукалович М.П., Новиков И.И. Уравнения состояния реальных газов. М. 1948.
5. Anderko A. Equation of state methods for the modeling of phase equilibria // Fluid Phase Equilibria 1990.61. P.145-225.
6. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч.- М.: Мир, 1989.
7. Abbott M.M. Cubic Equation of State: an interpretative review.-Adv. in Chem.Series.1979.182, 47-70.
8. M.M.Abbott. Cubic Equation of State, AIChE J., 1973, 19, 595.
9. Anderko A. Cubic and generalized van der Waals equations/ Equations of state for fluids and fluid mixtures. Part I. Experimental Thermodynamics Volume V. Edited by J.V.Sengers, R.F.Kayser, C.J. Peters and H.J.White, Jr. 2000. Elsevier .p.75-126.
10. Кипнис А.Я., Явелов Б.Е. Иоганнес Дидерик Ван-дер-Ваальс. Л.: Наука, 1985. 309с.
11. J.M.Prausnitz. Equation of State from van der Waals Theory: the Legacy of Otto Redlich. Fluid Phase Equilibria. 1985. 24. P. 63-76.
12. Fuller G.G**.** A modified Redlich-Kwong-Soave equation of state capable of representing the liquid state. Ind.Eng.Chem.Fundam.1976. 15. P**.** 254.
13. E.Usdin**,** I.C.McAuliffe. One-parameter family of equations of state. Chemical engineering science. 1976. 31. 11. P. 1077.
14. Adashi Y**.**, Lu B.C.-Y., Sugie H. Three-parameter Equations of State. Fluid Phase Equilibria. 1983. 13. P**.** 133-142.
15. Петрик Г.Г. О возможном решении проблемы третьего параметра малопараметрических уравнений состояния. Ч.1. Критический анализ трехпараметрических уравнений состояния единой формы// Мониторинг. Наука и технологии. 2017. 2. С. 70-81.
16. Himpan J. Eine neue thermische Zustandsgleichung.I. Zeitschrift fuer Physik. Bd.131.17-27 (1951)
17. Carnahan, N.F., and K.E.Starling, Equation of State for non-attracting Rigid Spheres, J.Chem.Phys. 1969. 51. P. 635.; Intermolecular Repulsions and the Equation of State for Fluids. AIChE J. 1972. 18. P. 1184.
18. Wong J.O., Prausnitz J.M. Comments concerning a simple equation of state of the van der Waals form// Chem.Eng. Commun. 1985. 37, 41-53.
19. Ishikawa T., Chung W., Lu B. A Cubic Perturbed, Hard Sphere Equation of State for Thermodynamic Properties and Vapor- Liquid Equilibrium Calculations. AIChE J. 1980. 26. P.372-378.
20. А.Б.Каплун, А.Б.Мешалкин. Журнал физической химии. 2001. Т.75. 12. С. 2135-2141.
21. Филиппов Л.П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ. М.: Моск.ун-т,1988.252 с.
22. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И., Захаров М.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. М: Недра, 1992. 272 с.
23. Vera J. H., Huron M.J., Vidal J. On the Flexibility and Limitations of Cubic Equations of state. Chem.Eng.Commun. 1984, 26, 311-318.
24. Рузавин Г.И. Абдукция как метод поиска и обоснования объяснительных гипотез/ Теория и практика аргументации. М.: ИФ РАН.2001. с.44.

НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ. 2.УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТОЧЕЧНЫХ ЦЕНТРОВ

Петрик Г.Г.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: galina_petrik@mail.ru

Содержание первой части работы составили систематизация уравнений состояния (УС) ван-дер-ваальсового типа и анализ самых известных из них. Считают, что в основе этих многочисленных УС, как и в модели ван-дер-Ваальса, лежит модель жестких сфер. В противоположность этому для еще более простой модели молекулы в виде точечного центра до последнего времени было известно только одно УС. Это УС идеального газа, в котором, очевидно, не учитывается взаимодействие объектов, связанное с наличием у них потенциальной энергии. Во второй части мы анализируем и обобщаем результаты, полученные нами для нового УС, разработанного на основе модели взаимодействующих точечных центров.

Введение. Следующий, 2018 год двумя знаменательными датами, связанными с самыми простыми моделями, напомнит о нерешенных проблемах теплофизики: исполнится 145 лет УС вещества, предложенному Ван-дер-Ваальсом [1] на основе **модели жестких шаров**, и 115 лет потенциалу межчастичного взаимодействия, предложенному Георгом Ми [2]. Значимость второй работы для нас конкретно определена ближайшей целью – получением простого физически обоснованного УС, в основе которого лежит именно эта молекулярная **модель взаимодействующих точечных центров (ВТЦ)**.

Ван-дер-Ваальс допустил существование молекул в виде объектов, имеющих форму и объем, когда реальность молекул еще не была доказана, и, предположив определенный характер притяжения, построил свое УС. Прошло почти полтора века, в течение которых оно было эталоном, и на его основе были предложены многочисленные эмпирические модификации. Модель жестких сфер как основа УС ВДВ, т.е. модели термодинамического уровня, считается простой, но физически обоснованной. Однако при моделировании на молекулярном уровне на первом месте стоит модель еще более простая (и даже примитивная) в отношении объекта – это точечный центр (материальная точка). Учет притяжения и отталкивания делает эту модель реалистичной. Можно было бы ожидать, что она активно отразится и в виде соответствующих УС. Но анализ обнаружил [3] пробел в иерархии – УС на основе модели взаимодействующих ТЦ отсутствует. Анализ ситуации подвел нас к основным идеям системного подхода к проблеме. И теперь, привлекая минимум известной информации о реальных молекулах, мы реализуем возможности модели точечных центров. Однако их взаимодействие не такое, как принято Ван-дер-Ваальсом. Оно учитывает наличие оптимизированного притяжения (условие слабости снято) и жесткого отталкивания (которого ВДВ не учитывал). Характер отталкивания и форма связанного с ним вклада в УС ВТЦ определились благодаря принятому на молекулярном уровне допущению. Его суть в том, что в приближении касающихся оболочек равнозначны пара жестко отталкивающихся центров, разделенных расстоянием d, и пара невзаимодействующих жестких сфер того же диаметра. Перенос допущения на термодинамический уровень, на язык УС определил форму отталкивательного вклада. А привлечение идей подобия позволило обосновать форму притягивательного вклада.

УС на основе модели взаимодействующих точечных центров

1. Модель ВТЦ. Однопараметрическое семейство УС (жесткое отталкивание и оптимизированное притяжение). Исходя из доваальсовой информации, нами было сконструировано УС взаимодействующих точечных центров - трехчленное трехпараметрическое кубическое. УС имеет вид (для одного моля, обозначения переменных - стандартные) [4-6]:

$$P = \frac{RT}{V_f(PC/no/\mathrm{int})} + \frac{RT\Delta V_f(rep)}{V_f(no/\mathrm{int})V_f(rep)} - \frac{a}{V_f(no/\mathrm{int})V_f(attr)} \qquad (1)$$

*PC - point center (*точечный центр*).* Нижний индекс «f» (от слова “free”) при V фиксирует то, что это свободный, т.е. доступный для ТЦ объем. Первый вклад в давление – термический, УС невзаимодействующих потенциально ТЦ, два остальные – конфигурационные («структура»), связанные с учетом отталкивания и притяжения между ТЦ. При отсутствии взаимодействия (1) переходит в УС идеального газа. В связи с громоздкостью выражения (1) используем эквивалентную ему запись в виде уравнения (2):

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)} \qquad (2)$$

V – объем системы, полностью доступный для ТЦ, когда между ними отсутствует взаимодействие: $V=V_f(no/int)$. Все три параметра – *b, c, a* - имеют смысл. Два из них равны изменениям доступного для ТЦ объема, вызванным действием сил притяжения: $-c=\Delta V_f(attr)$ и отталкивания $b=\Delta V_f(rep)$, третий параметр *a* связан с *c*, но отличен от него (он возникает из-за различия в характере сил притяжения и отталкивания на микроуровне). Мы не называем параметр *a когезионным,* т.к. непосредственно с притяжением связан параметр *c.*

Допущений о слабости сил притяжения мы не делали. Следовательно, (2) есть **УС системы ВТЦ с притяжением и жестким отталкиванием.** Причем пока мы рассматриваем только функциональную *P-V* зависимость притягивательного вклада, исключив температурную, т.к. этот вопрос требует отдельного анализа.

Управляющий параметр термодинамического уровня модели. По УС (2), состояние «вещества» из ВТЦ определяется значениями термодинамических параметров и набором трех параметров *b, c, a,* которые связаны с проявлением сил межмолекулярного взаимодействия. Вполне логично допустить, что именно **соотношение проявлений двух сил и определяет состояние модельного вещества.** На основании этого предположения был введен [6] параметр

$\chi_v=c/b$ ($\chi = \frac{-\Delta V_f(attr)}{\Delta V_f(rep)}$).

Перейдя в УС (2) к приведенным (относительно критических параметров) величинам: $\varphi=V/V_c$, $\tau=T/T_c$, $\pi=P/P_c$, $\beta=b/V_c$, $\sigma=c/V_c$, $\alpha=a/(RT_cV_c)$, $\chi=\sigma/\beta$, получим УС ВТЦ, которое содержит четыре параметра – критический фактор сжимаемости (КФС) Z_c и β, α, χ. Применение определения критической точки, где обращаются в нуль две первые производные от давления по объему, дает соотношение между тремя параметрами *c, b,* V_c, которое приводится к кубическому уравнению (3) для параметра β при заданном χ:

$$\chi^2\beta^3 + 3\chi\beta^2 + 3\beta - 1 = 0. \qquad (3)$$

В случае, когда *c* и *b* – постоянные, и следовательно, χ=const, возможно точное решение кубического уравнения (3). При этом аналитические выражения для всех параметров УС, включая КФС Z_C, получены [7,8] в виде функций только от параметра χ (был использован метод из [9]). Выражения имеют вид:

$$\beta = \frac{1}{\chi}\left(\sqrt[3]{(1+\chi)} - 1\right),\ \alpha = \frac{\chi^2}{(\sqrt[3]{(\chi+1)}(\chi-1) + 2\chi + 1)(\sqrt[3]{\chi+1} - 1)}$$

$$\sigma = \left(\sqrt[3]{(1+\chi)} - 1\right),\ Z_C = \frac{\chi}{\sqrt[3]{(\chi+1)}(\chi-1) + 2\chi + 1}$$

При этом трехпараметрическое УС ВТЦ (2) (или четырехпараметрическое приведенное УС) переходит в однопараметрическое семейство УС, для которого величина χ является **управляющим параметром термодинамического уровня.**

Порожденное множество (семейство) уравнений может быть записано в форме, которая подчеркнет его однопараметрическую суть

$\pi = \pi(\varphi, \tau, \chi)\ \ Z = Z(\varphi, \tau, \chi)$.

Полученные результаты выводят нас в область исследований, связанных с термодинамическим подобием веществ и поиском критериев, определяющих это подобие. Упомянем

самые известные из них – критический фактор сжимаемости (КФС), ацентрический фактор Питцера, критерии Риделя и Филиппова. Важным и нерешенным до сих пор вопросом для этого направления исследований является вопрос общей формы УС. В нашей модели структура и форма УС определяются на первых шагах его построения. В качестве физически обоснованного критерия подобия выступает найденный управляющий фактор модели ВТЦ, что позволяет поставить его в один ряд с перечисленными выше.

УС ВТЦ с реалистичными значениями КФС. Простая модель привела к новой проблеме – в связи с **параметром χ.** Какими могут быть значения управляющего параметра χ? Конечно, этот параметр можно рассматривать как подгоночный, и находить его значения по свойствам вещества, но его связь с ММВ заставляет искать другие способы оценки. Если исходить из установленного для χ смысла, спектр соотношений между проявлением сил может быть весьма широк. Допустив, что значения изменяются от нуля до тысячи, провели расчеты (см. таблицу). Видно, что с ростом параметра χ, т.е. с нарастанием влияния сил притяжения, уменьшаются значения КФС – от завышенных до реалистичных.

Обращает на себя внимание факт, что однопараметрическое семейство УС ТЦ включает множество уравнений, КФС которых имеет экспериментальные значения. В то же время известно, что подобные простые УС в литературе отсутствуют. Авторы различных простых УС [10] специально подчеркивают, что рассчитываемые значения КФС являются характеристиками самого УС и должны быть больше экспериментальных значений КФС (на 15-20%). Попытаемся ответить на **вопрос** почему. При этом придется обсудить еще один важный **вопрос** – имеет ли параметр *b*, входящий в различные УС, один и тот же смысл. Подобный вопрос (в отношении *смысла и правильности значения* параметра *b* УС Редлиха-Квонга) поднимался Праузнитцем в [11], но остался без ответа.

Таблицу можно условно разделить на три части. Первой части отвечают небольшие значения параметра χ (0 – 1), для коэффициента 1/β (см.третий столбец), связывающего параметр *b* и V_c, они дают умеренные значения (3 – 4); а для КФС - значения от 0.375 до 0.333, т.е. завышенные, которые больше наиболее вероятных экспериментальных. Вторую часть таблицы формирует параметр χ из интервала (2.0 – 7), который дает экспериментальные значения КФС (0.31 - 0.26), при этом коэффициент 1/β оказывается довольно большим (4.5 -7). Можно выделить еще одну часть таблицы – ей отвечают еще большие значения χ, большие коэффициента 1/β и меньшие значения КФС (меньше 0.25).

Таблица.

Параметры УС ВТЦ как функции управляющего параметра

$\chi=c/b$	$b/V_C=\beta$	$V_C=(1/\beta)b$	$a/RT_CV_C=\alpha$	Z_C	УС (автор)
0	1/3	3	1.125	0.375	**Ван-дер-Ваальс**
0.1	0.32	3.125	1.143	0.372	(УС, **лучшие**, чем УС ВдВ)
0.5	0.29	3.44	1.207	0.35	
1	0.26	3.847	1.282	0.333	**Редлих-Квонг**
1.5	0.238	4.2	1.346	0.320	
2	0.22	4.54	1.402	0.310	УС, дающие **реалистичные** значения критического фактора сжимаемости
2.5	0.207	4.82	1.458	0.302	
3	0.196	5.109	1.508	0.295	
3.5	0.186	5.376	1.550	0.288	
4	0.177	5.62	1.595	0.283	
5	0.163	6.13	1.673	0.274	
6	0.152	6.58	1.746	0.266	
10	0.1224	8.17	1.99	0.244	
100	0.036	27.7	4.08	0.151	
1000	0.009	111.11	10.18	0.083	

Два аспекта проблемы УС с реалистичными значениями КФС. В рассматриваемой модели ТЦ проблема УС с реалистичными значениями КФС имеет два аспекта. Первый касается значений параметра χ, определяющих подобные УС. Могут ли они быть обоснованы с физических позиций? Этот вопрос мы рассматривали в [12,5,6] и показали, что такие значения фактора χ возможны. Был проведен анализ модели ТЦ, образующих идеальную структуру кристалла (простую кубическую, объемно - и гранецентрированную) для двух случаев - когда объекты взаимодействуют (это приводит к появлению у них ЭСО) и когда взаимодействие отсутствует (тогда это материальные точки). Оценка дала для параметра χ значения: 7, 3.5, 2.5. Для реального вещества, тем более в жидком состоянии (или состоянии флюида) эти отношения, вероятно, будут отличаться от найденных предельных значений. В то же время, учитывая сходство структур вещества в твердом и жидком состоянии, на чем базируются многие теории, можно допустить, что реальные значения будут к ним достаточно близки.

Отсюда следует, что значения других параметров УС, определяемых параметром χ, также возможны. Первым из этих параметров является β. При этом мы выходим на второй аспект указанной выше проблемы. Он касается соотношений, связывающих критический молярный объем V_c и параметр b. Если судить по таблице, то значениям χ, дающим УС с реалистичными значениями КФС, отвечают соотношения вида V_C=(4.5-7)b. Известные УС дают другой, умеренный интервал для соответствующего коэффициента: $V_c = 3b$ (УС ВдВ), $V_c = 3.847b$ (УС Редлиха-Квонга). Единое мнение насчет истинности этого соотношения отсутствует. Однако УС, которые дают большие значения множителя в этом выражении $V_c = b*(8,\ldots 10)$, в доступной нам литературе не рассматриваются. Это можно объяснить единственно тем смыслом, который авторы вкладывают в параметр b, (полагая вслед за Ван-дер-Ваальсом, подчиняясь его авторитету), что он связан с полным объемом молекулы - величиной, которая в модели жестких сфер должна быть практически постоянной. Именно поэтому, на их взгляд, значения коэффициента, выпадающие за пределы интервала (3-4), некорректны и авторы фиксируют их в указанном промежутке.

Однако **вопрос**. Имеет ли параметр b один и тот же смысл для УС ВдВ и других УС - модификаций? (Мы уже упоминали важный вопрос Праузнитца. За 40 лет ответа никто не предложил). Ответ на этот вопрос дадим в третьей части.

Пока же выскажем предположение, что реалистичные значения КФС дают те УС ВТЦ, в которых **притягивательный вклад, наиболее важ**ный при описании свойств в критической области, оказывается оптимизированным. Напомним, что пока мы допускаем, что параметр χ представляет постоянную величину, и это следовало из условия постоянства параметров b и c.

Уточненное УС ВТЦ. О структуре управляющего параметра и возможной связи ее с характером молекулярных движений. Отказ от условия постоянства параметра χ позволил получить новые результаты. В [13] было установлено, что управляющий параметр модели имеет структуру, связанную с проявлением двух степеней свободы точечного центра, а значение его определяется набором двух генерирующих чисел и плотностью вещества. (Уместно вспомнить здесь о направлении поисков Ван-дер-Ваальса, который на протяжении долгих лет искал зависимость параметра b своего УС именно от плотности). Теперь параметр χ УС ВТЦ должен быть снабжен индексом, отмечающим его зависимость от объема

$\chi_v = c/b = \kappa_1 + \kappa_2 b\rho$; для критической точки получим: $\chi_C = \kappa_1 + \kappa_2 b/V_C = \kappa_1 + \kappa_2\beta$.

Учтем в УС (2) ВТЦ с жестким отталкиванием выявленную структуру параметра c, связанного с проявлением сил притяжения на доступный для ТЦ объем. Получим «структурированное» УС ВТЦ:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V + b(k_1 + k_2 b/V))}. \qquad (4)$$

Обратим внимание на то, что, в выявленной форме кубического УС подчеркивается «физика» модели, связывающая его параметры с проявлением сил притяжения и отталкивания на доступный для ТЦ объем, т.е. одну из термодинамических переменных.

Преобразовав, получаем кубическое уравнение для β

$$\beta^3(k_2 - k_1(k_2 + k_1)) - 3\beta^2(k_1 + k_2) - 3\beta + 1 = 0. \quad (5)$$

Из полученных общих выражений следует, что все параметры УС определяются заданием пары чисел k_1 *и* k_2, которые мы назвали генерирующими. Задание пары чисел (плюс плотность системы) определяет значение управляющего параметра χ, то, как будут соотноситься проявления сил, что, в конечном счете, определит свойства системы.

Пойдем дальше в поиске смысла чисел. В модели реальную молекулу заменяет точечный центр. Очевидно, что для него возможны поступательное и колебательное движения. Тогда можно предположить, что в формировании параметра $\chi_v = c/b$, который собственно определяется изменениями доступного объема, вызванными проявлением сил притяжения и отталкивания между ТЦ, должны проявиться оба вида движения: $\chi_v = \chi_v$(поступательн.)+χ_v(колебательн.). Можно предположить, что в случае горячего разреженного газа, т.е. состояния, близкого к идеально-газовому, будет выполняться условие χ_v(кол.)=0 и изменение доступного объема будет определяться в результате поступательного движения ТЦ, χ_v(пост.)≠0. При большой плотности и низких температурах поступательное движение будет затруднено, практически отсутствуя, и тогда χ_v(пост.)=0, а χ_v(кол.)≠0. При промежуточных условиях оба типа движения будут вносить свой вклад в формирование параметра χ. Эти рассуждения помогают в некоей мере расшифровать выражение для $\chi_v = \kappa_1 + \kappa_2 b\rho$, где два числа k_1 и k_2, очевидно, связаны с возможными степенями свободы, отвечая колебательному и поступательному видам движения.

Пока мы представили малую часть результатов, полученных для модели ВТЦ, - самой простой среди молекулярных. Однако новое УС – даже «структурированное» - никак не может рассматриваться в качестве общего, т.к. отталкивание здесь носит жесткий характер. И это одно из возможных направление для оптимизации физически обоснованного УС.

2. Модель ВТЦ. Однопараметрическое семейство УС с оптимизированным отталкиванием. Управляющий параметр γ модели ВТЦ.

Даже впервые полученные для УС ВТЦ результаты не дают оснований рассматривать его в качестве общего уравнения модели. Этому мешает жесткий (нереалистичный) характер отталкивания ТЦ. (В то же время именно это допущение и дало возможность получить само УС). Однако раздельная запись конфигурационных вкладов – от сил притяжения и отталкивания, реализованная в новом УС - позволяет внести предполагаемое изменение во второй вклад и записать УС ВТЦ, в котором не только притяжение оптимизировано, но и отталкивание (второй член в УС) смягчено, сделано более реалистичным:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTd}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)} \quad (6)$$

Поясним смысл коэффициентов, для чего привлечем потенциалы Ми($n-m$), которые описывают взаимодействие пары центров: два параметра: $b = \Delta V$ (ТЦ, отталкивание) и $c = -\Delta V$ (ТЦ, притяжение) – фиксируют сам факт наличия в системе сил отталкивания и притяжения, противоположную их направленность, а также неравенство – в общем случае – величин, $b \neq c, b > 0, c > 0$; параметр d – фиксирует отличия в характерах сил реалистичного отталкивания ($n \neq \infty$): $d \geq b$ от «жесткосферного» ($n = \infty$), $d = b$; параметр $a(V,T)$ – фиксирует отличие проявления характера сил притяжения ($n \neq m$) от «реалистичного» характера сил отталкивания. УС (6) с учетом оптимизации проявлений обеих сил может рассматриваться как общее уравнение модели ВТЦ.

Примем, что параметр $c = 0$, т.е. будем считать, что силы притяжения между ТЦ настолько слабы, что они не изменяют межмолекулярных расстояний, а значит, и эффективный собственный объем (ЭСО). Это дает основания рассуждать о собственном объеме модельного объекта (МО), заменяющего реальную молекулу, и связывать его с проявлением только сил отталкивания (обратим внимание, как это похоже на содержание оригинальной модели Ван-дер-Ваальса). Можно считать, что объемные параметры b и d связаны с двумя характерными эффективными размерами МО, определяемыми двумя межмолекулярными расстояниями, отвечающими жесткому и «смягченному» отталкиванию ТЦ. Заметим, что эта легкость объяснения и наглядность смысла исчезает в общем случае, когда становится заметным проявление сил притяжения, т.е. имеет место $c \neq 0$, в результате чего мы вынуждены перейти к общему УС ВТЦ (6). При анализе этого УС особого внимания потребуют когнитивные проблемы.

УС, отвечающее смягченному отталкиванию и слабому притяжению ТЦ:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTd}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+0)}. \qquad (7)$$

Допустим, что параметры a, b, d – константы. Введем обозначения для приведенных параметров: $\beta = \frac{b}{V_C}$, $\delta = \frac{d}{V_C}$. Из стандартных условий в критической точке (обращение в нуль двух первых производных давления P по объему V) получим кубическое уравнение для β:

$$\beta^3(\gamma - 1) - 3\beta^2(\gamma - 1) - 3\beta + 1 = 0. \qquad (8)$$

Новый параметр $\gamma = \frac{d}{b} = \frac{\delta}{\beta}$ сравнивает проявления сил отталкивания в отношении доступного объема для двух случаев – когда сила отталкивания смягчена и когда она имеет жесткий характер. Решение кубического уравнения (8) дает значение параметра β. (Для этого уравнения общего решения получить не удалось). Для соотношений, определяющих параметры, получили

$$Z_C = \frac{1}{3-\beta},\ \alpha = \frac{1}{\beta(3-\beta)}. \qquad (9)$$

Таким образом, фактор $\gamma - 1$ оказывается управляющим параметром для однопараметрического семейства, в которое переходит в рассматриваемом случае УС (7). При $\gamma - 1 = 0$ имеем: $\beta = 1/3, \alpha = 9/8, Z_c = 3/8$, (то же дает УС Ван-дер-Ваальса). Поскольку по смыслу величина β должна быть положительна, из (9) и (8) следует, что УС (7) семейства дают значения $Z_c > 1/3$. Если судить по КФС, то множество этих уравнений можно обозначить, как группу УС, лучших, чем УС Ван-дер-Ваальса, но худших, чем УС Редлиха – Квонга (однако само оно в семейство не входит – в нем важен вклад, связанный с притяжением). (Заметим, что для семейства УС взаимодействующих ТЦ с жестким отталкиванием группа уравнений с завышенным значением КФС составляет малую долю). Следовательно, улучшения описания свойств в критической области в результате изменения отталкивательного вклада в УС ВТЦ, не происходит.

Интересно, что для этого семейства УС можно найти уравнения, которые дают «экспериментальные» значения для коэффициента k_x, равного отношению $V_c / d = 1/\delta = k_x$, (коэффициент, связывающий критический молярный объем и ЭСО МО, имеет реалистичные значения; интервал $2,2 - 2,5$ для величины V_c / b_w приводит Б.М.Смирнов [14], опираясь на идеи скейлинга применительно к веществам из молекул разных типов). Однако КФС таких УС при этом завышен по сравнению с экспериментальным (см. Таблицу), а это значит, что недо-

статочно адекватно учтено притяжение объектов. Это видно из анализа непосредственно самого определения КФС $Z_c = \frac{P_c V_c}{RT_c} = \frac{V_c^{real}}{V_c^{id.gas}}$. Поскольку $Z_c < 1$, это значит, что в результате проявления действующих в критической точке сил молярный объем должен уменьшиться и произойти это может только в результате действия сил притяжения. Можно предположить, что адекватное общее УС ВТЦ (или УС на основе более реалистичных модельных объектов) сможет при определенных соотношениях между проявлением сил дать и реалистичное значение КФС и требуемое значение коэффициента k_x, которые будут отвечать конкретному веществу. В пользу того, что такие УС получить возможно, говорит известное УС Дитеричи, которое можно отнести к совсем немногочисленной группе УС, где вклады в давление не разделяются – это УС дает $V_c = 2b, Z_c = 0,270$.

Заключение. В третьей заключительной части работы мы намерены продемонстрировать некоторые возможности простой модели на основе ВТЦ. Мы дадим ответы на ряд тех важных вопросов, которые были сформулированы в отношении известных УС вдв-типа в первой части работы.

Refeences:

1. Van der Waals J.D. Over de continuiteit van den gas-en Vloeistoftoestand, doctoral dissertation, Leiden, Holland (1873).
2. Mie G. Zur Kinetishen Theorie der einatomigen Korper. Annalen der Physik. 1903. 11. S. 657-672.
3. Petrik G.G. Equation of the state on base of the molecular model, more general, than van-der-Waals model.// XVI Intern. Conf. on Chem. Thermodynamics in Russia (RCCT 2007), Suzdal, July 1-6, 2007.Abstracts.V.1. 1S-37.
4. Петрик Г.Г. Новый взгляд на старую проблему. Ч.1. О смысле коэффициентов малопараметрических уравнений состояния // Сб.трудов межд. конф. «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсир. средах». 2005. Россия. Махачкала. С. 109-112.
5.Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. В поисках адекватных моделей. О новом подходе к получению термических уравнений состояния и его возможностях. Вестник ДНЦ РАН. 2007.-№27.с.5-12.
6. Петрик Г.Г. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния.1.Модель взаимодействующих точечных центров // Мониторинг. Наука и технологии. 2009, 1, 45-61.
7. Петрик Г.Г. Уравнение состояния на основе модели взаимодействующих точечных центров и его связь с однопараметрическим законом соответственных состояний// Сб. трудов межд.конф «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсир. средах». 2009.199-203
8. Петрик Г.Г., Гаджиева З.Р. Однопараметрическое семейство уравнений состояния на основе модели точечных центров и его связь с однопараметрическим законом соответственных состояний // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. 1. С. 67-78.
9. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч.- М.: Мир, 1989.
10. Anderko A. Equation of state methods for the modeling of phase equilibria. Fluid Phase Equil. 1990.61.145-225.
11. Wong J.O., Prausnitz J.M. Comments concerning a simple equation of state of the van der Waals form. Chem.Eng. Commun. 1985. 37, 41-53.
12. Петрик Г.Г. К проблеме адекватного моделирования термических свойств. Уравнение состояния на основе модели взаимодействующих центров. Труды XII Российской конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов».т.1.Моделирование и рас-

чет структуры и свойств неупорядоченных систем в конденсированном состоянии. Екатеринбург. 2008.с. 258-261.
13. Петрик Г.Г. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния. 2.Поиски оптимальной функциональной формы притягивательного вклада // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. 2. С.79-92.
14. Boris.M.Smirnov Statistical Physics and Kinetic Theory of Atomic Systems // M.: Inst. For High Tempr. of RAS. 2001.

НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ. 3.УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОГО ТИПА В МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТОЧЕЧНЫХ ЦЕНТРОВ

Петрик Г.Г.

ФГБУН Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail:galina_petrik@mail.ru

Третья часть работы продолжает аналитическое исследование малопараметрических уравнений состояния (УС). Содержание двух первых частей работы составили:1) систематизация и анализ УС ван-дер-ваальсового типа. Формулировка вопросов к самым известным УС; 2) результаты, полученные автором для физически обоснованной модели взаимодействующих точечных центров, составившие цикл статей. Здесь мы демонстрируем возможности новой простой модели. В ее рамки можно включить многие известные УС вдв–типа. Тем самым снимается их основной недостаток– отсутствие связи с микроуровнем. Создаются новые возможности для их анализа и применения, которые частично рассмотрены в представленной работе.

В первой части работы в ходе анализа УС вдв-типа был выявлен ряд вопросов. Некоторым из них много лет, они зафиксированы в статьях, но ответов на них нет в литературе различных рейтингов. Цель нашей работы - показать, что получить ответы удается в рамках новой простой модели взаимодействующих точечных центров (ВТЦ), частично представленной во 2-й части.

Приведем формы УС, полученные нами в модели ВТЦ, которые потребуются в этой части работы:

$P = \frac{RT}{V}$ (невзаимодействующие ТЦ) $P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)}$ (жесткое отталкивание ТЦ) (1)

$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)}$ (жесткое отталкивание и оптимизированное притяжение (снято условие слабости), c=const=χb) (2)

$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+b(k_1+k_2 b/V))}$ (Те же проявления сил, c≠const, $c = b(k_1 + k_2 b/V)$) (3)

$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTd}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+0)}$ (смягченное отталкивание, d=γb и слабое притяжение ТЦ, c=0) (4)

$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTd}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)}$ (смягченное отталк-е, d=γb,оптимизир-ное притяжение, c=χb) (5)

О включении в модель ВТЦ известных УС вдв-типа. Со времени получения первых результатов в модели ВТЦ возник вопрос – можно ли подключить к анализу и использовать накопленную в литературе информацию по УС вдв-типа и как это сделать, если ни о каких управляющих параметрах для этих УС речь нигде не идет? Можно ли включить эти УС в рамки модели ВТЦ?

Оказалось [1-3], что проще всего включить в рассмотрение 1-ю группу УС вдв-типа - самую многочисленную. Авторы некоторых УС: Ван-дер-Ваальс (1873), Клаузиус (1880), Бертло (1900), Редлих, Квонг (1949), Эбботт (1973), Пенг и Робинсон (1976), Фуллер (1976), Юздин и Макаулиф (1976), Мартин (1979), Харменс и Кнапп (1980), Шмидт и Венцель (1980), Патель и Тейа (1986), Баталин, Брусиловский (1992), Эберхарт (2007). В этих УС первый вклад имеет форму *RT/(V-b)*. При этом мы возвращаем ему истинный смысл УС с коволюмом как **УС невзаимодействующих** жестких сфер. Во-вторых, это становится возможным благодаря основному допущению о жестком характере отталкивания ТЦ в УС (1). Указанный первый вклад этих УС распадается на сумму двух, согласно:

$$\frac{RT}{V-b}=\frac{RT}{V}+\frac{RTb}{V((V-b)}$$

и такое изменение формы вклада, преобразование УС – модели термодинамического уровня - отвечает изменению молекулярной модели, состоящему в переходе от невзаимодействующих жестких сфер к жестко отталкивающимся ТЦ. Следующий шаг состоит в преобразовании притягивательных вкладов, явном выделении третьего параметра *c*, для которого возможны две позиции. После этого различные УС вдв-типа могут быть приведены к виду, отвечающему УС ВТЦ (2) и/или (3). Информация о χ будет найдена по виду самих УС. **В результате такого перехода между молекулярными моделями (от сфер к центрам) все параметры переформулированных УС вдв-типа приобретают определенный смысл, и мы получаем целую группу конкретных УС - известных и исследованных, но принадлежащих модели ВТЦ [3-5].** Главное преимущество такого перехода – проявленный физический смысл у всех параметров, установление связи с молекулярным уровнем, что определяет повышенную информационность модели. В этом случае УС, предложенные в свое время независимо различными авторами в качестве общих, уже не являются таковыми, но представляют уравнения одного семейства, различие между которыми определяется различием в соотношении проявлений межмолекулярных сил, что обеспечивается разными значениями χ. Впервые появляется физическая основа для прямого сравнения качества УС. На первый взгляд изложенное представляется почти очевидным, но легкость перехода объясняется только предположениями о жестком отталкивании ТЦ. Случай более реалистичного отталкивания уже не является столь простым.

Апробация модели. УС ВДВ и Редлиха-Квонга в модели ВТЦ. Будем исходить из введенного параметра χ и его смысла в модели ВТЦ. Значение параметра χ определяется непосредственно по виду самих УС из условия: $c=\chi b$. *Рассмотрим сначала* ***случай, когда χ - константа***. В литературе нашлось только три подобных УС (ВдВ, χ=0, Редлиха-Квонга, χ=1, Вонга-Праузнитца, χ=0.2). Покажем, как из представления в форме УС ВТЦ можно сделать ряд выводов относительно свойств УС, ответив, в том числе на ряд «нерешаемых» вопросов для случая, когда они записаны в обычной двучленной форме УС вдв-типа [1-5].

1. Две формы УС Ван-дер-Ваальса

$$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a}{V^2}$$ (жесткие сферы) $$P=\frac{RT}{V}+\frac{RTb}{V(V-b)}-\frac{a}{V(V+0*b)}$$ (модель ВТЦ) (**6**,а,б)

Получаем, что для УС ВдВ χ=0 - *c*=0, и это полностью отвечает предположению самого Ван-дер-Ваальса о слабости сил притяжения и отсутствии их влияния на трансляцию объектов, на межмолекулярные расстояния.

2. Две формы УС Редлиха-Квонга

$$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a}{\sqrt{T}V(V+b)}$$ (вдв-тип) $$P=\frac{RT}{V}+\frac{RTb}{V(V-b)}-\frac{a}{V(V+1*b)}$$ (ВТЦ) (7,а,б)

Первым встает вопрос о смысле параметра *b*. При обычном подходе в модели вдв-типа смысл его неясен. В модели ВТЦ он решается просто – *b* в первом конфигурационном вкладе

связан с проявлением отталкивания, *b* во втором конфигурационном вкладе – с проявлением притяжения; на самом деле во втором - это *c*, но на параметры наложено условие равенства *c=b*.

Для УС Редлиха-Квонга χ=1 - *c=b*, следовательно, проявления сил уравновешены, что соответствует, вероятно, наиболее энергетически выгодному состоянию. Интересно, что имеются указания [6] на то, что это УС наиболее пригодно для описания свойств при умеренных термобарических условиях.

Еще одно малоизвестное УС: Вонга–Праузница [7]. Здесь χ=0.2. Возникает **вопрос** обязательно ли значения управляющего параметра должны быть такими небольшими? Эту проблему мы обсуждали в части 2, где затронули два аспекта УС с реалистичными значениями КФС. Второй аспект проблемы был связан с параметром *b* УС вдв-типа – его смыслом и корректным значением [1]. Здесь мы рассмотрим его подробно.

О смысле параметра b в разных УС вдв-типа. УС Ван-дер-Ваальса. Напомним общую форму УС 1-й группы УС ван-дер-ваальсового типа $P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+c)}$. (8)

При стандартном подходе к этим УС определены два параметра, третий параметр *c* не имеет смысла. Нет сомнений, что УС ВдВ входит в эту группу при c=0. Тогда оказывается, что в модели жестких сфер уникальность УС ВдВ определена тем, что для него равен нулю некий параметр, не имеющий смысла!

Возник **вопрос-догадка.** А не может ли быть так, что именно обращение в нуль третьего параметра *c* и придает определенный смысл параметрам *b* и *a*, и именно тот, что вложил в них Ван-дер-Ваальс? Если же параметр *c≠0*, то смысл параметров *b* и *a*, скорее всего, должен измениться. Проверим гипотезу.

Проследим за отличиями в физическом смысле параметра *b* двух форм УС ВдВ – (6а) вдв-типа и (6б) ВТЦ. В форме (6а) оригинальное УС учитывает вклад, связанный с наличием собственного объема жестких сфер. По Ван-дер-Ваальсу, величина *b* равна учетверенному объему молекул, другие авторы дают другие значения этого множителя. Теперь рассмотрим УС ВдВ в форме (6б) для ВТЦ. У ТЦ собственный объем отсутствует, и параметр *b* имеет другой смысл. Он связан с учетом одной из действующих сил - отталкивания, $b=\Delta V_f(rep)$. Появление же у ТЦ некоего эффективного собственного объема (ЭСО), определенного конкретным расстоянием между центрами, обеспечивает совместное проявление отталкивания и притяжения. Другими словами, отталкивание определяет только часть ЭСО. Но поскольку, как считал сам Ван-дер-Ваальс, – силы притяжения настолько слабы, что не влияют на расстояние между объектами, т.е. параметр *c* ($c=-\Delta V_f(attr)=V_i(att)=0$) в УС (6б) равен нулю, то *весь эффективный собственный объем объекта в этом (!) случае определяется только силами отталкивания.* Таким образом, **УС ВдВ** оказывается единственным и в модели ВТЦ, но не с формальной точки зрения, как это было выше для сфер, а физически обоснованно. **Только для него ЭСО полностью определяется силами отталкивания.** В любом ином УС ЭСО ТЦ определяется не только отталкиванием, но и притяжением. Кроме того, только в УС Ван-дер-Ваальса - в виде (6а) для сфер и в виде (6б) для ТЦ - смысл двух параметров, обозначенных одинаково - через *b*,- совпадает. И можно говорить, что *b* в (6б) есть ЭСО ТЦ или *b* в (6а) определен силами отталкивания. Иначе: для УС ВдВ параметр *b* равен (или пропорционален) эффективному собственному объему объекта, полностью определенному силами отталкивания.

В то же время, в любом другом уравнении ван-дер-ваальсового типа, приведенном к виду (2), где *c≠0,* смысл *b* не совпадает с тем, который был вложен в него Ван-дер-Ваальсом в УС (6а). Приходится признать, что в случае УС (8) вдв-типа не только смысл третьего параметра *c* не определен, но и смысл параметра *b* тоже не очень ясен (и не только для УС Редлиха).

УС Редлиха-Квонга. Сравним две формы – оригинальное, вдв-типа,(7а), которое считается двухпараметрическим, и то же уравнение, но для ВТЦ – (7б).

Вопрос, который поставил Праузниц [8], исследуя критическую изотерму этого УС для аргона, представляется очень важным. На первую половину его – о смысле параметра *b* - мы ответили выше. Осталось ответить - почему его значение оказывается почти точно в два раза меньше «правильного», рассчитанного согласно модели ВДВ? Приведем коротко наши рассуждения из [9].

В модели ВТЦ – по ходу конструирования – появляются два характерных сферических объекта (и соответственно два объема *b*). Один, b^{hr} (hard repulsion))– это эффективный собственный объем (ЭСО) ТЦ при их жестком отталкивании. Очевидно, что в исходном УС (1) должен стоять этот объем *b* как результат единственно жесткого отталкивания ТЦ. Что касается УС ВТЦ (2), которое содержит оба конфигурационных вклада, то входящий в него параметр *b* уже не есть b^{hr}, но некоторый b^{res} ($=b^{ES}$) – конечный результат того же отталкивания («то, что от него остается»), когда учтено влияние притяжения:

$$b^{hr} - c = b^{res}.$$

Тогда, очевидно, разность двух этих объемов определит параметр *c*, т.е. вклад притяжения в формирование ЭСО объекта:

$$b^{hr} - b^{res} = c$$

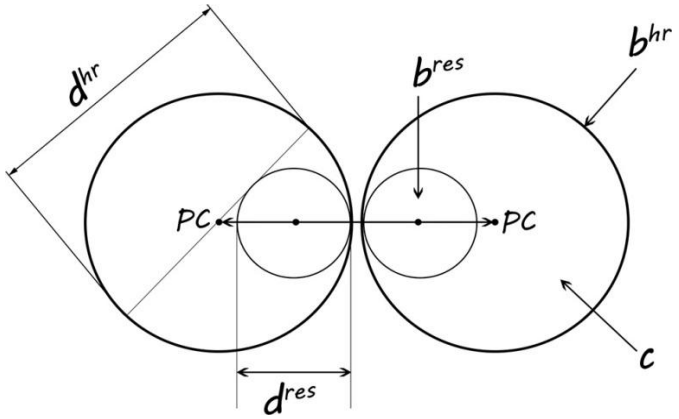


Рис. 3. К обоснованию физического смысла параметров в УС ВТЦ

Согласно определению, управляющий термодинамический параметр χ

$$\chi = \frac{c}{b^{res}} = \frac{b^{hr} - b^{res}}{b^{res}} = \frac{b^{hr}}{b^{res}} - 1$$

Тогда он очевидным образом связан с отношением эффективных объемов жестких сфер:

$$\chi + 1 = \frac{b^{hr}}{b^{res}}$$

Полученные соотношения применим, чтобы дать ответ на вопрос Праузница. Для УС Редлиха-Квонга в семействе ВТЦ все объясняется просто – в обоих вкладах параметры – это изменения свободного объема, *b* - вызванные действием сил отталкивания, *c* - притяжения, которые связаны условием *c*=*b*:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb^{ES}}{V(V - b^{ES})} - \frac{a}{V(V + b^{ES})}$$

Из этого условия и определения управляющего параметра χ следует

$$\chi = \frac{c}{b^{res}} = \frac{b^{hr} - b^{res}}{b^{res}} = \frac{b^{hr}}{b^{res}} - 1 = 1$$

Отсюда сразу получаем, что значение параметра b^{res} в УС Редлиха-Квонга должно быть в два раза меньше того, что было бы получено без учета вклада притяжения (собственно, так расшифровал условие слабости сил притяжения сам УС ВДВ: они слабы настолько, что не влияют на трансляцию):

$b^{hr}/b^{res}=2$

Следовательно, **это свойство самого УС Редлиха–Квонга**. И расчеты должны это подтвердить не только для аргона, но и для других веществ.

Возможности структурированного УС. УС ВДВ и общее кубическое. В ходе работы были выявлены ограничения, связанные с условием χ=const. Этот результат потребовал дальнейшей оптимизации модели. Анализ ряда УС вдв-типа (Пенга-Робинсона, Клаузиуса, Пателя-Тейа, Харменса-Кнаппа, Шмидта-Венцеля и других) показал, что теперь параметр *c* зависит от молярного объема. (Напомним о поисках Ван-дер-Ваальсом зависимости для своего параметра *b* от плотности). УС ВТЦ принимает вид (см. в [3,2,10]; там же ссылки на работы автора):

$$P=\frac{RT}{V}+\frac{RTb}{V(V-b)}-\frac{a}{V(V+b(k_1+k_2b/V))},\ \chi_V=c/b=\kappa_1+\kappa_2 b\rho$$

k_1, k_2 – некие числа, смысл которых должно прояснить. Предлагаемая нами запись второго вклада подчеркивает физику модели – в отличие от записи знаменателя этого вклада в виде квадратичного трехчлена. Перейдя к приведенным (относительно критических параметров) величинам и использовав условия в критической точке, получили кубическое уравнение для β при заданной паре чисел k_1, k_2 (мы назвали их генерирующими):

$\beta^3(k_2-k_1(k_2+k_1))-3\beta^2(k_1+k_2)-3\beta+1=0$.

Задание пары генерирующих чисел (плюс плотность системы) определяет значение параметра χ, то, как будут соотноситься проявления силы притяжения и отталкивания, что, в конечном счете, определит термические свойства системы.

Исходя из того, что ТЦ имеет две степени свободы, отвечающие поступательному и колебательному движению, мы предположили [3,2], что в формировании параметра χ_V, который определяется изменениями доступного объема, вызванными проявлением сил притяжения и отталкивания между ТЦ, должны проявиться оба вида движения: χ_V = χ_V (поступательн.)+χ_V (колебательн.).

В таком случае в выражении для управляющего параметра: $\chi_V=\kappa_1+\kappa_2 b\rho$ два числа k_1 и k_2, очевидно, связаны с двумя степенями свободы. Есть основания считать, что число k_1 связано с колебательным движением, а k_2 – с поступательным. Тогда условия $k_2=0$, $k_1\neq0$ отвечают колебательному движению ТЦ; если наоборот $k_1=0$, $k_2\neq0$ – это поступательный характер движения объекта.

Обратимся к двум самым известным уравнениям (переформулируем их для ТЦ в виде (6б) и (7б)), подойдем к ним как к физическим моделям и расшифруем структуру управляющего параметра. Для УС Редлиха - Квонга: $\chi_V=1=\kappa_1+\kappa_2 b\rho=1+0*b*\rho$. Структура параметра фиксирует отсутствие поступательного движения и наличие колебательного, характер которого (гармонический, когда проявления сил притяжении и отталкивания уравновешены, χ=1) отвечает нахождению ТЦ на расстояниях, отвечающих минимумам потенциальных ям. Весьма интересно, что имеется ряд указаний на то, что УС Редлиха-Квонга наиболее применимо при умеренных термобарических условиях. Результаты численного эксперимента показали [11], что УС ВДВ лучше описывает свойства твердого тела вблизи температуры плавления, чем свойства разреженного газа. Для УС Ван-дер-Ваальса имеет место: $\chi_V=0=0+0*b*\rho$. Равенство нулю управляющего параметра – его составляющих - и его структура в полном

соответствии с классическими представлениями объясняют неудачу этого уравнения при попытке описать свойства разреженного газа; скорее они отвечают состоянию вещества с затрудненными движениями обоих типов.

Здесь же удается ответить на вопросы из 1-й части – почему успешные УС определяются заданием не тех величин, которые имеют физический смысл, но «бессмысленных чисел и почему не всякие наборы троек успешны?»

«Бессмысленные» числа имеют смысл (это показано в ч.2 для модели ВТЦ). Они определяют значение имеющего физический смысл параметра χ, связавшего проявление сил ММВ – притяжения и отталкивания - на доступный для движения ТЦ объем системы. А успешными оказываются те УС, для которых наборы параметров определены одним и тем же набором чисел $k_{i,,}$ задающим параметр χ. Подробности исследования - в наших работах [3, 10].

Обобщенное УС ВДВ. Обратимся к трехпараметрическому УС Каплуна-Мешалкина, рассмотренному во 2-й части. УС - «в духе идей ВдВ». Смысл параметров *a,b,* как у Ван-дер-Ваальса, смысл третьего авторам непонятен. Вид УС (мы приблизили его к модели ВТЦ, записав в виде трех вкладов)

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTd}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+0)}. \qquad (9)$$

Сравнивая УС (9) с УС (4) взаимодействующих ТЦ, видим и фиксируем совпадение структуры УС и формы вкладов. Отсюда вывод, что в основе УС (9) Каплуна лежит та же молекулярная модель ТЦ с конкретным характером взаимодействия – очень слабое притяжение центров (по Ван-дер-Ваальсу) и смягченное по сравнению с жестким отталкивание. Именно это УС, на наш взгляд, имеет все основания называться **обобщенным УС Ван-дер-Ваальса**. Нами этот частный случай общего УС ВТЦ [12] был выделен потому, что здесь легко объяснить смысл третьего параметра УС, непонятный самим авторам УС.

Об общем УС ВТЦ и одном УС вдв-типа из третьей группы. Вернемся к УС из работы [13], которое было предложено в качестве общего УС

$$P = \frac{RT}{V}\left[\frac{2V+b}{2V-b}\right] - \frac{a}{T^{0.5}V(V+b)} \qquad (10)$$

Пока мы занимаемся изучением только функциональной зависимости $P(V)$ термического УС. Преобразуем выражение в квадратной скобке:

$$\frac{2V+b}{2V-b} = \frac{(2V-b)+b+b}{2V-b} = 1 + \frac{2b}{2V-b} = 1 + \frac{b}{(V-b/2)}.$$

Тогда УС (10) примет вид:

$$P = \frac{RT}{V}\left(1 + \frac{b}{(V-b/2)}\right) - \frac{a}{V(V+b)}. \qquad (11)$$

Сравним новую форму УС (11) с предложенной нами общей формой УС ВТЦ (5). Совпадение структуры двух уравнений очевидно. Переобозначим коэффициенты в (11): $b_{eff} := b/2, c = b = 2b_{eff}, d = b = 2b_{eff}$. Тогда вид УС:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RT\,2b_{ef}}{V(V-b_{ef})} - \frac{a}{V(V+2b_{ef})}$$

Этому отвечают следующие значения введенных нами в модели ТЦ параметров: $\chi = 2, \gamma = 2$. Очевидно, что и это уравнение не может рассматриваться в качестве общего термического УС. Оно представляет частный случай общего УС ВТЦ (5), с конкретным соотношением между параметрами, определяемыми проявлением сил притяжения и отталкивания ТЦ.

Мы представили в трех работах далеко не все результаты, впервые полученные в рамках модели ВТЦ для известных УС вдв-типа. Однако понятно, что и они образуют фунда-

мент для дальнейших исследований более сложных молекулярных моделей в качестве основы для новых УС. В заключение наметим в качестве возможной оптимизации полученного УС - переход от примитивной модели молекулы в виде точечного центра к более реалистичной, в качестве которой может рассматриваться модель сфер (или сферических оболочек).

Почему ч**етырехпараметрическое кубическое УС лучше трехпараметрического. М**ы можем в рамках нашей модели предложить объяснение этому. Итак. Для молекулярной модели взаимодействующих ТЦ (которую мы позиционируем как самую простую) нами получено УС вида (2):

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{RTb}{V(V-b)} - \frac{a}{V(V+c)}$$

Здесь V - это объем системы, который совпадает с доступным объемом, если модельные объекты - в данном случае - точечные центры – не взаимодействуют. Коэффициенты b, c имеют смысл изменений доступного объема, вызванного действием отталкивания и притяжения.

Перейдем к более реалистичной модели молекулы, заменив точечный центр жесткой сферой определенного диаметра (объема). Применим тот же подход и запишем трехчленное УС жестких сфер, между которыми действуют силы отталкивания и притяжения, сохранив тот же смысл у параметров УС:

$$P = \frac{RT}{V-b_1} + \frac{RTb}{(V-b_1)(V-b_1-b)} - \frac{a(T)}{(V-b_1)(V-b_1+c)}$$

Параметры этого УС имеют следующий смысл: b_1 определен наличием у жесткой сферы собственного объема, b, c и a связаны с проявлением действующих сил – отталкиванием, притяжением и различием в их характере соответственно. Преобразуем УС следующим образом:

$$P = \frac{RT(V-b_1-b)+RTb}{(V-b_1)(V-b_1-b)} - \frac{a(T)}{(V-b_1)(V-b_1+c)}$$

$$P = \frac{RT}{(V-b_1-b)} - \frac{a(T)}{(V-b_1)(V-b_1+c)}. \quad (12)$$

Переопределим константы уравнения (12).

$$P = \frac{RT}{V-(b_1+b)} - \frac{a(T)}{(V-b_1)(V+(c-b_1))}.$$

$b+b_1=b'$; $-b_1=c'$; $c-b_1=d'$.

Уравнение примет окончательный вид:

$$P = \frac{RT}{(V-b')} - \frac{a(T)}{(V+c')(V+d')}.$$

По форме это уравнение совпадает с тем общим кубическим уравнением, что предложено в [14]. Следовательно, успех УС Брусиловского, Баталина, Захарова и его преимущества по сравнению с (одним – самым оптимальным) УС Пенга-Робинсона могут быть физически обеспечены не формальной оптимизацией математической модели, не тем, что оно включает 4 параметра, но тем, что в его основе лежит молекулярная модель сфер, более реалистичная по сравнению с очень простой моделью точечных центров.

Результаты, приведенные в работе, демонстрируют некоторые возможности полученного нами простого УС ВТЦ. В его рамки удается включить многие известные УС вдв-типа и впервые получить решение связанных с ними проблем. Последнее доказывает адекватность и информативность новой физически обоснованной модели [15] и требует продолжения исследований.

Литература:

1. Петрик Г.Г. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния. 1.Модель взаимодействующих точечных центров // Мониторинг. Наука и технологии. 2009. 1. 45-61.
3. Петрик Г.Г. О системном подходе к поиску адекватного уравнения состояния и первых нестандартных результатах // Процессы в геосредах. 2016. 3. С. 255-266.
4. Петрик Г.Г. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния. 2.Поиски оптимальной функциональной формы притягивательного вклада // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. 2. С.79-92.
5. Петрик Г.Г. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса и его модификации в модели взаимодействующих точечных центров / Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Тверской государственный университет, 2012. – Вып.4. – С. 235-247.
6. Петрик Г.Г. О малопараметрических уравнениях состояния: незамеченный юбилей, упущенные и реализованные возможности // Вестник Новгородского университета.2017.5(103). 36-43.
7. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч.- М.: Мир, 1989
8. Wong J.O., Prausnitz J.M. Comments concerning a simple equation of state of the van der Waals form // Chem.Eng. Commun. 1985. 37, 41-53.
9. J.M.Prausnitz. Equation of State from van der Waals Theory: the Legacy of Otto Redlich// Fluid Phase Equilibria. 1985. 24. P. 63-76.
10. Петрик Г.Г. О когнитивных проблемах в теплофизике, связанных с передачей информации, на примере малопараметрических уравнений состояния // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. 3. С.58-71.
11. Петрик Г.Г. Новое термическое уравнение состояния - физически обоснованная математическая модель / Труды II Международной школы молодых ученых «Физико-математическое моделирование процессов в геосредах», Москва, ИПМ РАН, 19-21 окт. 2016. С. 130-134.
12. Кипнис А.Я., Явелов Б.Е. Иоганнес Дидерик Ван-дер-Ваальс. Л.: Наука, 1985. 309с.
13. Петрик Г.Г. О новом подходе к получению физически обоснованных уравнений состояния. 3.Поиски оптимальной формы отталкивательного вклада // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. 3. С.84-97.
14. Ishikawa T., Chung W., Lu B. A Cubic Perturbed, Hard Sphere Equation of State for Thermodynamic Properties and Vapor- Liquid Equilibrium Calculations. AIChE J. 1980. 26. P.372-378.
15. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И., Захаров М.Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. М: Недра, 1992. 272 с.
16. Рузавин Г.И. Абдукция как метод поиска и обоснования объяснительных гипотез / Теория и практика аргументации. М.: ИФ РАН.2001. с.44.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

ДОКЛАДЫ ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ 4
Попель О.С., Тарасенко А.Б.
ГИБРИДНЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
И ОСОБЕННОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ....4
Томаров Г.В., Шипков А.А., Борзенко В.И., Счастливцев А.И.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СХЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПАРОВОДЯНЫМ
И ОРГАНИЧЕСКИМ ЦИКЛАМИ 25
Гасанов В.Г., Шахвердиев А.Н., Наджафов Г.Н., Муслимов А.Г., Гулузаде А.Н.
КОМПЛЕКСНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ,
КАЛОРИЧЕСКИХ И АККУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НОВЫМ СПОСОБОМ....29
Григорьев Б.А., Александров И.С.
МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ 37
Елистратов В.В.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ
ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ВИЭ ДЛЯ СЛОЖНЫХ
ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ....42
Гаджиев Г.А., Мухидинов М.С., Ниналалов С.А.
О ПРОЕКТЕ ЗАКОНА РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН
"О ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКЕ В СФЕРЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НЕТРАДИЦИОННЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ"....47
Алишаев М.Г.
О ДОСТИЖЕНИЯХ И НЕУДАЧАХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ 55
Рамазанов А.Ш., Алхасов А.Б., Атаев Д.Р., Каспарова М.А.
ИСПЫТАНИЕ УКРУПНЕННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ
ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД...63
Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А., Магомедов М.-Р.Д.
ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ ДАГЕСТАНА: БИОРАЗНООБРАЗИЕ МИКРОБНЫХ
СООБЩЕСТВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БИОТЕХНОЛОГИИ....69
Алхасов А.Б., Зайченко В.М.
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ....76
Алхасов А.Б.
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ 82

СЕКЦИЯ 1. РОЛЬ ВИЭ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ 87
Алхасов А.Б., Зайченко В.М., Чернявский А.А.
О СОЗДАНИИ ПОЛИГОНА НОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ....87
Бушуев В.В., Зайченко В.М., Моргунова М.О., Соловьев Д.А., Чернявский А.А.
ПОТЕНЦИАЛ ВИЭ В АРКТИКЕ: НОВЫЕ ЗАДАЧИ 94
Алхасов А.Б., Чернявский А.А., Бадавов Г.Б., Алиев Р.М., Ниналалов С.А.
О СОЗДАНИИ ЦЕНТРА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН....99

Керимов И.А., Дебиев М.В., Гацаева Л.С.
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ
ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ 107
Габдерахманова Т.С., Шакун В.П.
КРИТЕРИИ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РФ
ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ.....114
Рамазанов О.М., Абдулмуталимова Т.О., Рабаданов Г.А.
СТАНДАРТИЗАЦИЯ В РАЗВИТИИ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....118
Алиев Р.М., Белан С.И., Бадавов Г.Б., Ниналалов С. А.
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД
ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ГАЗОДЕФИЦИТА НА ЮГЕ РОССИИ.....122
Свалова В.Б.
ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В РОССИИ И МИРЕ.
НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ.....129
Рамадан Амер, Елистратов В.В.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИРИИ....135
Алишаев М. Г., Ниналалов С. А.
РАЗРАБОТКА ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ В РОССИИ 141
Амадзиева Н.А., Хизриев А.Ш.
МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕГИОНЕ.....147

СЕКЦИЯ 2. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....152
Григорьев Б.А., Герасимов А.А., Александров И.С.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ
НИЗКОКИПЯЩИХ РАБОЧИХ АГЕНТОВ ПРИРОДНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....152
Бабаева С.Ш., Гусейнов А.Г.
О ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
И КАЛОРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ
ПЛАСТОВЫХ ВОД НА ОСНОВЕ *P,V,T* – ДАННЫХ.....156
Гаркушин И.К., Губанова Т.В., Буланова А.В., Кравец Н.С.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОСТАВОВ
ТРОЙНЫХ СИСТЕМ $NaCl\text{-}NaVO_3\text{-}Na_2ЭO_4$ (где Э – Mo, W).....159
Бородулин В.Ю., Низовцев М.И.
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
РАБОТЫ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ПЕРИОДИЧЕСКИМ
ИЗМЕНЕНИЕМ НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....163
Рагимов Ф.А.
ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ПРИ ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ
ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ 172
Алишаев М.Г.
ПРОФИЛИ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К ИНТЕРВАЛУ ПЕРФОРАЦИИ СКВАЖИНЫ ...177
Мисирхан Талыбов
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ
«ИСТИ ИБАДИ» ЛЕНКЕРАНСКОГО РАЙОНА АЗЕРБАЙДЖАНА 182
Магомедов М.Н.
О ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ ЖЕЛЕЗА
ПРИ *P-T*-УСЛОВИЯХ ЯДРА ЗЕМЛИ.....194

Рамазанов М.М., Алхасова Д.А., Абасов Г.М., Булгакова Н.С.
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПАРОВОДЯНОЙ
СМЕСИ В ГЕОТЕРМАЛЬНОМ ПЛАСТЕ 204
Husseinov A.Q.
ANALYSIS OF THE SURFACE TENSION COEFFICIENT OF HIGHLY
MINERALIZED STRATAL WATERS WITH VARIOUS COMPOSITIONS
OBSERVED IN THE OIL WELLS BORED IN THE GUNASHLI OIL FIELD.....210
Алхасова Д.А., Зайченко В.М., Рамазанов М.М., Торчинский В.М.
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ ФИЛЬТРАЦИИ ДВУХФАЗНЫХ ФЛЮИДОВ ...212
Алхасова Д.А., Алхасов Б.А.
ОСВОЕНИЕ ТЕПЛА СУХИХ ГОРНЫХ ПОРОД НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА.....220
Алхасова Д.А.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СКВАЖИННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
ПУТЕМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА 226
Вердиев М.Г., Ниналалов С.А.
ПРОЦЕСС ТЕПЛОПЕРЕНОСА ЧЕРЕЗ ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА
ТВЕРДОЕ ТЕЛО - ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ 231
Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М.
КРИТЕРИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА КОНЦЕ КОНУСА ТЕЙЛОРА 238
Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ЧАСТИЦ
ДИСПЕРСНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ.....249
Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М.
ВОЛЬТ – АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСПЕРСНОГО
ПОТОКА ЖИДКОСТИ 253
Базаев Э.А. Базаев А.Р. Османова Б.К.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ БИНАРНЫХ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ
ИЗ ВОДЫ, СПИРТОВ И УГЛЕВОДОРОДОВ 256
Бейбалаев В.Д., Назаралиев М.А., Аливердиев А.А., Малиева Ф.Ф.
О ЧИСЛЕННОМ ИССЛЕДОВАНИИ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО
УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ С ДРОБНЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ 263
Гусейнов Г.Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА
НА СВОЙСТВА ФЛЮИДА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С НЕЙ 266
Гусейнов Г.Г.
ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТЫХ СТЕКОЛ,
НАСЫЩЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОМ 272
Ахмедов Г.Я., Гаджимурадов Р.А., Камалутдинова И.А., Курбанисмаилова А.С.
ОБ ОТЛОЖЕНИИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ
НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ 277
Османова Б.К., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.
ФАКТОР СЖИМАЕМОСТИ СМЕСЕЙ ВОДА–СПИРТ
ПО ДАННЫМ *p,ρ,T,x*-ИЗМЕРЕНИЙ.....282
Дворянчиков В.И., Джаватов Д.К., Искендеров Э.Г., Рабаданов Г.А.
ИЗОХОРНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА МАГНИЯ 290
Базаев А.Р., Базаев Э.А., Джаппаров Т.А.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
В СИСТЕМЕ ВОДА–н-ГЕКСАН 297

Магомедов Р.А., Мейланов Р.Р., Ахмедов Э. Н., Бейбалаев В.Д., Аливердиев А.А.
ФРАКТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДЫ 305
Азизов Г.А.
РЕЖИМЫ НАГРЕВА ВОДЫ ПО СТВОЛУ НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ 308
Джаватов Д.К., Азизов А.А.
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА ОБРАТНУЮ
ЗАКАЧКУ В ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ
С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ 312
Магомедов Ш.А., Мамаев О.А., Чупалаев Ч.М., Расулов Г.С.
ПОЛУЧЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
О ГЕОТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПО ИЗОТОПНОМУ
СОСТАВУ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА ВОДЫ 319
Маммаев О.А., Маммаев Б.О.
ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ РАДИОТЕПЛОГЕНЕРАЦИИ
В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ ВОСТОЧНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ 322
Османова Б.К., Базаев Э.А., Базаев А.Р.
ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ КПД ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ
НА СМЕСИ ВОДА–Н-ПРОПАНОЛ 326
Петрик Г.Г.
НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ.
I.УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОГО ТИПА 332
Петрик Г.Г.
НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ.
2.УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ТОЧЕЧНЫХ ЦЕНТРОВ.....339
Петрик Г.Г.
НА ПУТИ К ПРОСТОМУ УРАВНЕНИЮ СОСТОЯНИЯ.
3.УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОГО ТИПА
В МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ТОЧЕЧНЫХ ЦЕНТРОВ.....346

Научное издание

Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы
Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов
Материалы V Международной конференции
«Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы»
и X Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения
возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна
23-26 октября 2017 г.

ТОМ 1

Подготовка оригинал-макета *Сулейманов О.А.*
Дизайн обложки *Эскаева Г.А.*

Подписано в печать 18.10.2017 г.
Формат 60x84 1/8. Печать ризографная. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Усл. п. л. 44,25. Тираж 500 экз.

Отпечатано в типографии АЛЕФ, ИП Овчинников М.А.
367002, РД, г. Махачкала, ул. С.Стальского 50, 3 этаж
Тел.: +7 (8722) 935-690, 599-690, +7 (988) 2000-164
www.alefgraf.ru, e-mail: alefgraf@mail.ru

ISSN 2313-5743