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

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

материалы
IV Школы молодых ученых им. Э.Э.Шпильрайна

Махачкала 2011

ББК 31.4 + 31.6
УДК 620.91 + 620.92

Печатается по решению Ученого совета Учреждения Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН при поддержке Президиума РАН в рамках программы целевых расходов «Поддержка молодых ученых в 2011 году», раздел 2. «Поддержка проведения научных школ молодых ученых»

Редакционно-издательский совет:
дтн Алхасов А.Б., дтн Баранов Д.А., кхн Каймаразов А.Г., ктн Кобзаренко Д.Н., дтн Ильин А.К., дфмн Мейланов Р.П., дфмн Рамазанов М.М.

Рецензенты:
Беренгартен М.Г. - проректор Московского государственного университета инженерной экологии, профессор.
Ашурбеков Н.А. - проректор Дагестанского государственного университета, профессор

Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов // Материалы IV Школы молодых ученых имени Э.Э.Шпильрайна. 19-22 сентября 2011 г. / Под ред. д.т.н. А.Б.Алхасова - Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2011. – 358 с.

В материалах IV Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» опубликованы обзорные доклады и лекции ведущих специалистов, а также доклады и выступления молодых ученых, аспирантов, по различным проблемам освоения возобновляемых источников энергии.

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

ISBN 978-5-904017-60-6

© Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 2011
© Коллектив авторов

от редактора

ПРЕДИСЛОВИЕ

Стало доброй традицией организация и проведение крупных научных академических форумов, посвященных фундаментальным задачам возобновляемой энергетики, на земле Дагестана, на базе Института проблем геотермии – недавно отметившего свое 30-тилетие – единственного научного учреждения в структуре Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, непосредственно занимающегося теоретическими и экспериментальными исследованиями в области геотермальной энергетики.

За прошедшие годы Институт сформировался в научную организацию, в которой трудится около 100 работников. Наличие высококвалифицированного научного (21 доктор наук и 26 кандидатов наук из 50 научных сотрудников) и инженерно-технического персонала позволяет Институту успешно решать на современном уровне фундаментальные и практические задачи геотермальной энергетики, механики, теплофизики, прикладной математики, геофизики, химической технологии минерализованных и пресных подземных вод.

Год назад Институт гостеприимно принимал II Международную конференцию «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и III Школу «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», (г. Махачкала, сентябрь 2010 г.), которой решением бюро Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН в 2009г. присвоено имя члена-корреспондента РАН Э.Э.Шпильрайна.

19 – 22 сентября 2011 г. состоялась IV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов», в организации и подготовке которой приняли участие Отделение ЭММПУ РАН, Научный совет ОЭММПУ РАН по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, Объединенный институт высоких температур РАН и др.

В составе Оргкомитета школы видные ученые, руководители академических и отраслевых научно-производственных организаций страны, региона и ведущих вузов республики. Приглашение об участии в работе школы приняли свыше 60 ученых и специалистов различных научных, научно-производственных организаций и вузов страны, в том числе из Москвы, Петропавловска-Камчатского, Астрахани.

Основные направления работы научного молодежного форума посвящены анализу современного состояния возобновляемой энергетики и перспективам создания новых высокоэффективных технологий освоения ВИЭ в нашей стране и за рубежом.

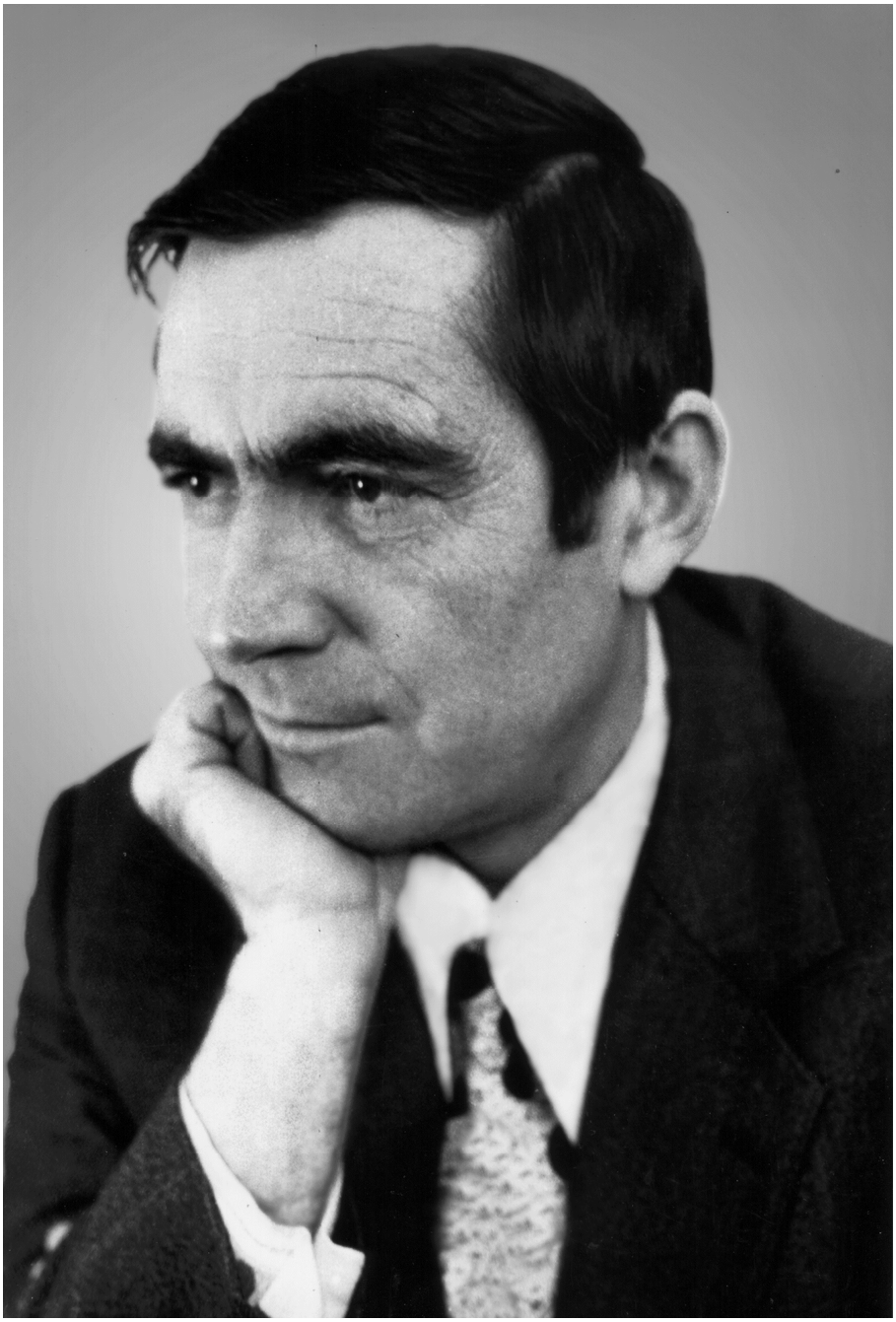
Организация 4-ой научной школы связана с именем Магомедова Камиля Магомедовича (1936-2002гг.) – первого ректора Дагестанского политехнического института (1972-1985гг.), председателя Президиума Дагестанского филиала АН СССР (1985-1990гг.), директора Института проблем геотермии ДНЦ РАН (1987-2002гг.), доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки ДАССР, заслуженного деятеля науки Российской Федерации.

Символично, что Школа открыла работу – 19 сентября 2011 г., – в день 75-летия со дня рождения профессора К.М. Магомедова – крупного ученого, большого энтузиаста нетрадиционной энергетики, научным наследием которого стал огромный вклад в развитие теоретических основ равновесной и неравновесной термодинамики Земли, что позволяет рассматривать Геотермию в широком понимании – от фундаментальной проблемы образования, эволюции и нагрева планеты до практического использования тепла земных недр.

Сборник материалов включает около 70 обзорных лекций и докладов ведущих ученых и специалистов, доклады и выступления молодых ученых, аспирантов, студентов по актуальным проблемам теории и прикладным аспектам, прежде всего геотермальной энергии в сочетании с солнечной энергией, энергией ветра, роли и месту ВИЭ в топливно-энергетическом балансе страны и ее регионов.

Убеждены, что организация научного форума в Дагестане послужит новым импульсом для развития теоретических и экспериментальных исследований в области освоения ВИЭ, будет содействовать продвижению инвестиционных проектов в регионе, способном стать экспериментальным полигоном для апробации энергетических технологий на основе использования практически всего комплекса ВИЭ. Позволит новому поколению молодых специалистов сделать осознанный выбор, посвятив себя наукам в энергетической области знаний, станет весомым вкладом в дело подготовки научных и инженерных кадров энергетического профиля.

Мы выражаем искреннюю признательность организаторам и всем участникам научной школы, проведение которой – дань памяти замечательному ученому, организатору науки и образования, видному общественному деятелю, прекрасному человеку.



МАГОМЕДОВ КАМИЛЬ МАГОМЕДОВИЧ (1936-2002гг.),

первый ректор Дагестанского политехнического института (1972-1985гг.),
председатель Президиума Дагестанского филиала АН СССР (1985-1990гг.),
директор Института проблем геотермии ДНЦ РАН (1987-2002гг.),
доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки ДАССР,
заслуженный деятель науки РФ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ ПРОФЕССОРА К.М.МАГОМЕДОВА

Мейланов Р.П.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: lanten50@mail.ru

К.М. Магомедов родился 19 сентября 1936 г. в селе Мусульта, Левашинского района Дагестана. В 1961 г. окончил Московский физико-технический институт, позже – аспирантуру при этом же институте и работал в нем до 1972 г. В 1965 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а уже в 1972 г. - диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. В 1974г. он получает звание профессора.

Магомедов К.М. – первый ректор Дагестанского политехнического института (1972-1985 гг.). В период с 1985 г. по 1990 г. он возглавляет Дагестанский филиал АН СССР, работая председателем Президиума Даг.ФАН СССР. В 1987 году он возглавляет Институт проблем геотермии, в котором ему суждено было проработать директором до последних дней жизни.

Широк и разнообразен круг научных интересов ученого. Он – автор 150 научных трудов, включая 7 монографий, по квазиклассической теории атома, теплофизике, математическому моделированию тепломассопереноса в различных физических системах, геотермомеханике, геотермальной энергетике и по другим областям знаний.

В период с 1961 г. по 1975 г. исследования Магомедова К.М. посвящены развитию нового направления – численному решению многомерных уравнений гиперболического типа сеточно-характеристическим методом. Решались уравнения механики сплошной среды для нестационарных и установившихся процессов, в том числе с учетом химических реакций, излучения, магнитогидродинамических и других эффектов.

В 1967 г. за цикл работ по исследованию пространственных сверхзвуковых течений газа методом характеристик ему присвоена премия им. Н. Е. Жуковского первой степени.

С 1975 г. по 1882 г. ученый занимался исследованием процессов роста кристаллов на основе методов статистической механики и неравновесной термодинамики.

Придя на работу в Дагестанский филиал АН СССР, Камиль Магомедович имел желание возглавить Институт физики, строил планы развития этого института. Однако планам этим по разным причинам не было суждено реализоваться.

Начиная с 1981 г. Магомедов К.М. посвящает себя созданию научно-технических основ геотермальной энергии. Как мы теперь хорошо понимаем, сложность этой задачи заключалась в ее междисциплинарном характере. Причем

глубина междисциплинарности невероятна: от астрофизических проблем (цикл работ ученого, посвященных эволюции планет) – до проблем квантовой физики атома, от задач подземной гидродинамики – до проблем теплофизики экстремальных состояний.

Будучи директором Института проблем геотермии, Магомедов К.М. уже по-новому перестраивает его работу и фактически создает основы уникального и единственного в системе РАН института энергетического профиля, в котором с единых позиций решаются сложнейшие задачи геотермии как междисциплинарной науки под научно-методическим руководством Отделения Физико-технических проблем энергетики.

Позволю отметить некоторые работы, которые подтверждают сказанное:

1. *Магомедов К.М. К теории квазиклассического самосогласованного поля атома// ДАН СССР,1985.Т.285. №5.*
2. *Магомедов К.М.Термомеханическая модель эволюции Земли// ЖФЗ. 1987. №6.*
3. *Магомедов К.М.О расчете геотермальных циркуляционных систем // ДАН СССР, 1990. т.311. №6.*
4. *Магомедов К.М. К теории неравновесной термодинамики фильтрации// Докл. РАН, 1998. т.361, №6, с.768-772*
5. *Магомедов К.М. Уравнения состояния на основе метода дифференциальных вириальных соотношений // ДАН, 1999, т.368. №2. с. 189-193.*
6. *Магомедов К.М. Об изобарически-изотермическом ансамбле в статистической механике // ДАН. 2000. Т.373. №5.*

В качестве яркого примера новаторских исследований Магомедова К.М. можно привести результаты исследований по развитию квазиклассического приближения квантовой теории атомов и молекул - модели Томаса-Ферми.

Полученное Магомедовым К.М. уравнение для обобщенного потенциала атома (в переменных Томаса-Ферми) имеет вид:

$$\varphi''(x) = \frac{\varphi^{3/2}(x)}{x^{1/2}}[1-(1-\gamma x)^{3/2}].$$

Здесь $\gamma = 2b/\varepsilon^2$, $\varepsilon = z^{-1/3}$

В модели Томаса-Ферми выражение в квадратных скобках равно единице. Полученное Магомедовым обобщение модели Томаса–Ферми – модель Томаса-Ферми-Магомедова, содержит более важную поправку, чем поправка Дирака. В результате погрешность расчетов атомных характеристик снизилась на несколько процентов.

Аналогичный характер носят работы ученого, посвященные применению редко используемого в статистической физике изобарически-изотермического потенциала. Сегодня эти исследования, как и многие другие, продолжают ученики и коллеги Камиля Магомедовича.

Как отмечали, освоение геотермальной энергии требует проведение исследований междисциплинарного характера, причем с охватом начиная от атомного уровня до астрофизических масштабов. Работы Камиля Магомедовича ценны тем, что несмотря на глубокий междисциплинарный характер геотермии создана единая систему представлений о геотермии. Причем последние работы Камиля Магомедовича посвящены исследования влияния гравитационного поля на формирование температурного поля Земли. Эти исследования, изложенные в последней, восьмой главе монографии Камиля Магомедовича «Теоретические основы геотермии» расширяет границы геотермии, чем обычно принято.

Впервые предложено уравнение баланса энтропии с учетом гравитационного потенциала имеющий вид

$$\rho\frac{ds}{dt}+div\frac{\vec{q}+2\rho\varphi\vec{v}}{T}=(\vec{q}+2\rho\varphi\vec{v})\nabla T^{-1}+\frac{1}{T}\tau_{ij}v_{ij}$$

Здесь $\rho-$ плотность вещества, s - энтропия, $\vec{q}$ - тепловой поток, φ - потенциал гравитационного поля, τ_{ij}, v_{ij} - компоненты тензора напряжений и вязкости. Это уравнение устанавливает связь теплового потока и потока гравитационной энергии и приводит к ряду принципиально новых результатов. В частности показано, что новый гравитационный механизм уменьшает температуру в центре, перенося ее к поверхности и излучая в пространство. Таким образом, не приходится прибегать к предположению о накоплении радиоактивных элементов в коре Земли. Эти исследовании, по существу открыли новую страницу в теории образования планет и представляют исключительный интерес по определению современного температурного режима Земли.

Результаты своих многолетних научных трудов этого периода Магомедов К.М. подытожил в монографии «Теоретические основы геотермии», вышедшей в свет в издательстве «Наука» в 2001 г., не задолго до смерти ученого.

На сегодня это единственная монография, где суть междисциплинарного характера геотермии действительно очевидна. Академик В.П. Мясников в своем предисловии к монографии Магомедова К.М. «Теоретические основы геотермии» отметил: «Монография охватывает широкий круг проблем, но не в ущерб глубине их исследования. Автор как бы говорит читателю–геотермисту: смотри повнимательнее на простейшие популярные модели, на пределы их справедливости. С другой стороны, он зовет механиков, теплофизиков, энергетиков, специалистов по моделированию к изучению проблематики геотермии в ее самом широком понимании. Именно в этом смысле автор имел право назвать свою книгу теоретическими основами геотермии и правильно указал два индекса УДК, относящихся к физике Земли и к теплофизике».

В лице Магомедова К.М. мы потеряли очень многое. Истинная ценность научного наследия Магомедова К.М. будет осознана со временем.

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ВИЭ

Алхасов А.Б.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ran_ipg@mail.ru

Приведен ресурсный потенциал возобновляемых источников энергии, указаны пути их освоения, предложены перспективные технологии.

Для бесперебойного энергоснабжения потребителей наиболее перспективными являются технологические системы, использующие два и более вида ВИЭ. Практически во всех регионах России имеется один или два вида ВИЭ, коммерческая эксплуатация которых может быть оправдана, при этом некоторые регионы богаты всеми видами возобновляемых источников.

Дагестан располагает значительными ресурсами практических всех видов ВИЭ, экономический потенциал которых оценивается около 2,3 млн ту.т./год [1,2]. В настоящее время ВИЭ используются на довольно низком уровне, доля их в топливно-энергетическом балансе республики составляет менее 2 %. Экономический потенциал геотермальных месторождений освоен всего на 10 %, а электроэнергия, вырабатываемая малыми ГЭС, составляет 17 % от экономического потенциала. Низкопотенциальные артезианские воды эксплуатируются крайне неудовлетворительно, около 10% от их выведенных ресурсов используется на нужды водоснабжения без использования теплового потенциала. Остальные виды ВИЭ в республике пока не востребованы, хотя имеются значительные ресурсы. При этом более половины энергопотребления республики обеспечивается за счет завозимых из дальних регионов традиционных энергоносителей.

За счет солнечной тепловой энергии можно полностью обеспечить потребности в горячей воде в доме в летнее время. В осенне-весенний период от солнца можно получить до 30% требуемой энергии на отопление и до 60% от потребностей на горячее водоснабжение.

В последние годы активно развиваются геотермальные системы теплоснабжения на основе тепловых насосов. В таких системах в качестве первичного источника тепла используется низкопотенциальная (20 – 40 ^{0}C) термальная вода или петротермальная энергия верхних слоев земной коры. При использовании тепла грунта применяются грунтовые теплообменники, размещаемые либо в вертикальных скважинах глубиной до 300 м, либо на некоторой глубине горизонтально.

Для эффективного обеспечения теплом и горячей водой децентрализованных потребителей небольшой мощности в ИПГ ДНЦ РАН разработана комбинированная солнечно-геотермальная система (рис. 1) [2]. Такая система состоит из солнечного коллектора 1, теплообменника 2, бака-аккумулятора 3, теплового насоса 7 и скважины-теплообменника 8. Через солнечный коллектор циркулирует теплоноситель (антифриз). Теплоноситель нагревается в солнечном коллекторе энергией солнца и отдает затем тепловую энергию воде через теплообменник 2, вмонтированный в бак-аккумулятор 3. В баке-аккумуляторе хранится горячая вода до момента ее использования, поэтому он должен иметь хорошую теплоизоляцию. В первом контуре, где расположен солнечный коллектор, 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.

Блок солнечного коллектора эксплуатируется круглогодично и обеспечивает потребителя горячей водой, а блок низкотемпературного напольного отопления с тепловым насосом (ТН) и скважиной-теплообменником глубиной 100 – 200 м включается в эксплуатацию только в отопительный период.

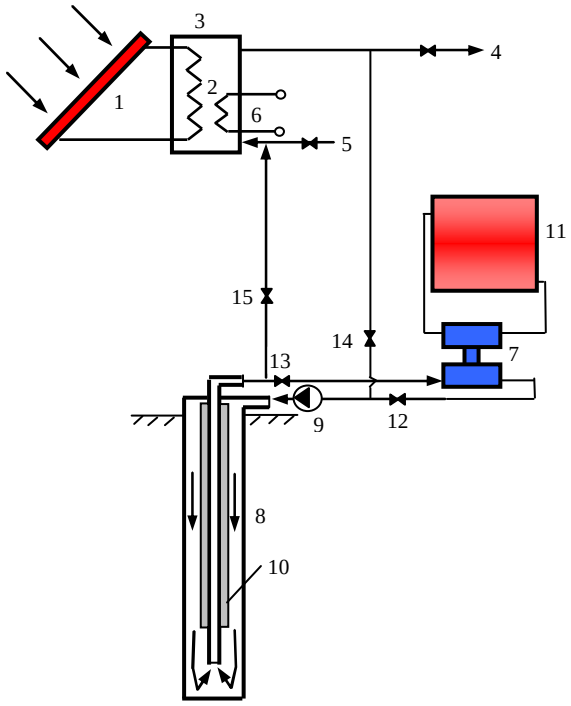


Рис.1. Принципиальная схема гелио-геотермальной системы отопления и горячего водоснабжения жилого дома (1 – солнечный коллектор; 2 – теплообменник; 3 – теплоизолированный бак-аккумулятор горячего водоснабжения; 4 – на горячее водоснабжение; 5 – подвод холодной воды; 6 – электронагреватель; 7 – тепловой насос; 8 – скважина-теплообменник; 9 – циркуляционный насос; 10 – теплоизоляция; 11 – система напольного отопления; 12, 13, 14, 15 – вентили).

В цикле ТН холодная вода с температурой 5 0С 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 0С, вода поднимается по центральной колонне труб на поверхность. Для предотвращения обратного оттока тепла центральная колонна снаружи теплоизолирована. На поверхности вода из скважины поступает в испаритель ТН, 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 межотопительный период, когда система отопления отключается, происходит частичное (до 90 %) восстановление температурного поля вокруг скважины за счет притока тепла от пород вне зоны охлаждения; достичь полного восстановления температурного поля вокруг скважины за время ее простоя не удается [3].

Солнечные коллектора 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 12 и 13 закрыты, и при открытых вентилях 14 и 15 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 12 и 13 открыты, а вентили 14 и 15 закрыты.

В предложенной технологической системе потенциал солнечной энергии используется максимальным образом, так как солнечные коллектора 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 ТН за отопительный период и эксплуатировать систему теплоснабжения в экономически оптимальном режиме.

При этом возникает задача по оптимизации конструктивно-технологических и режимно-эксплуатационных параметров системы. Увеличение площади солнечных коллекторов приводит к дополнительным капитальным затратам, а регенерация тепла в горной породе приводит к высокому значению коэффициента преобразования ТН и снижению эксплуатационных затрат. С учетом этих соображений необходимо оптимизировать параметры всей системы.

Комбинированная гелио-геотермальная система тепловой мощностью 15 кВт, с отбором тепла из горной породы в скважинном теплообменнике глубиной 100 м и солнечными коллекторами (20 шт.), для отопления коттеджного дома построена на полигоне Объединенного института высоких температур РАН в пригороде г. Махачкалы (рис. 2 – 5) .

Финансирование работ по строительству системы осуществлено за счет средств федерального бюджета, выделенных в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», по государственному контракту № 02.740.11.0059 на выполнение научно-исследовательских работ по проекту «Разработка эффективных технологий комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья».

Рис.2. Тепловой насос J 036 WLC (R22 – R407C).

Рис.3. Солнечные коллектора (20м^2) с теплоизолированным баком-аккумуляторм для горячей воды.

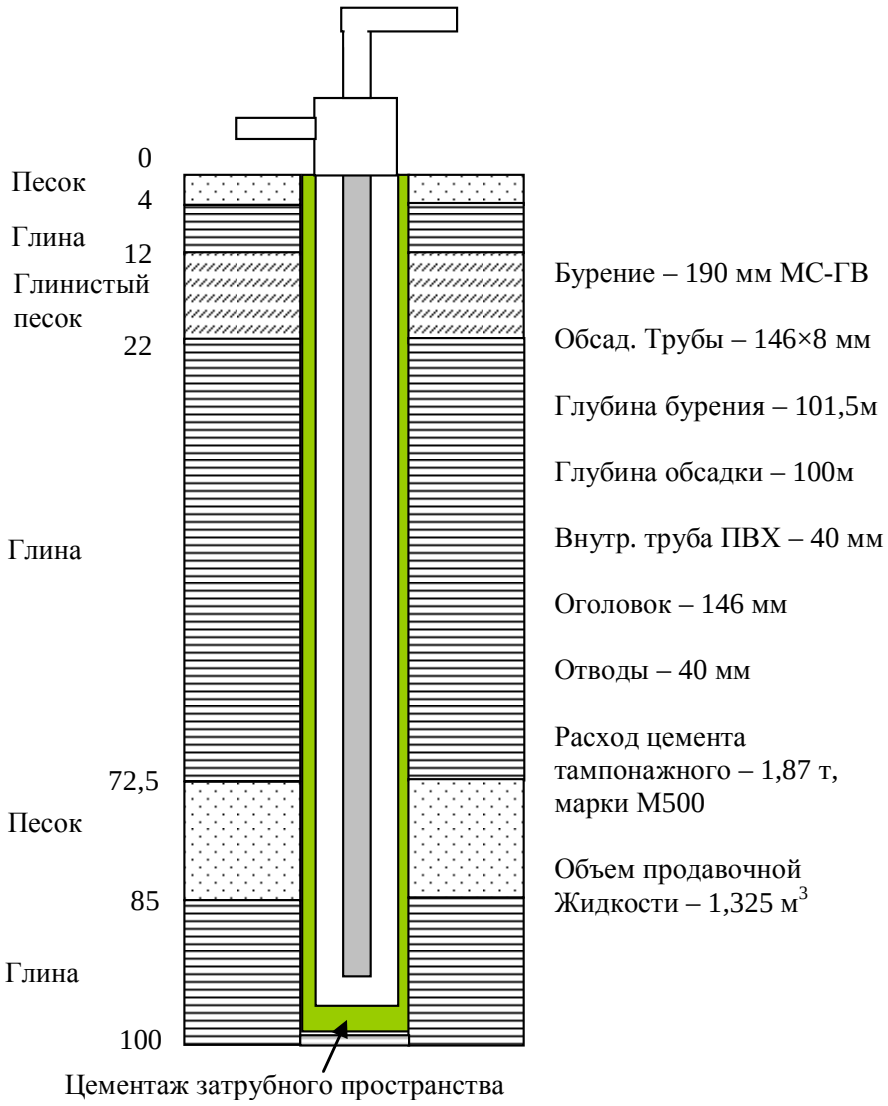


Рис.4. Конструкция скважины-теплообменника.

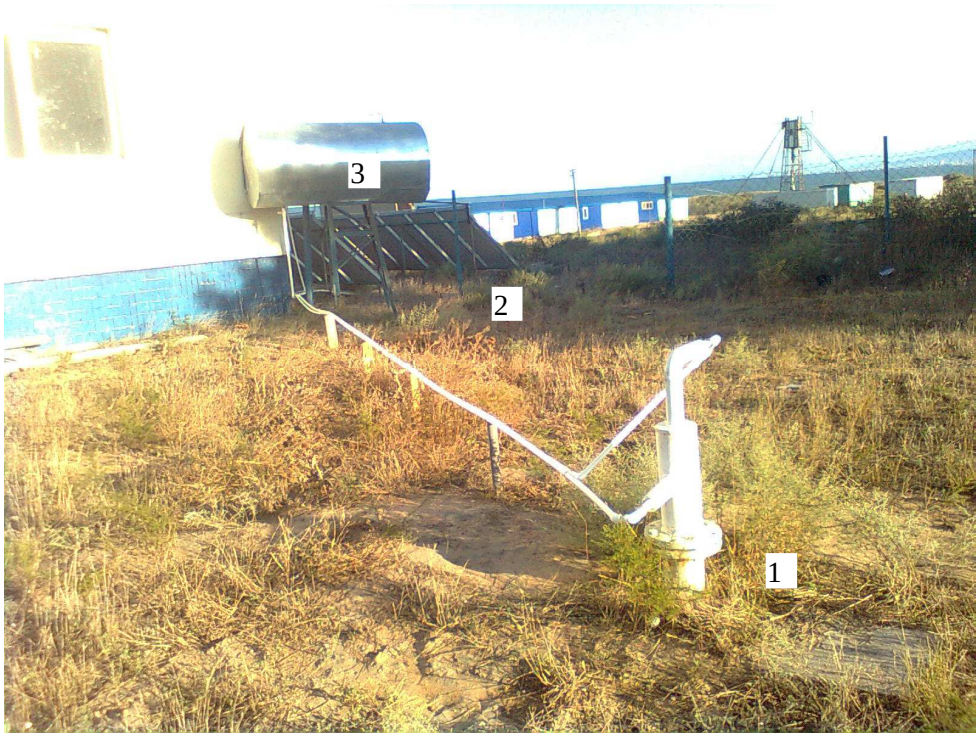


Рис.5. Обвязка гелио-геотермальной системы тепло- и горячего водоснабжения коттеджного дома на территории филиала ОИВТ РАН в Махачкале (1 – оголовок скважины-теплообменника; 2 – солнечные коллектора (20 шт.); 3 – теплоизолированный бак-аккумулятор горячей воды).

Биомасса является одним из значительных и перспективных видов ВИЭ, из общего экономического потенциала биомассы в 558,8 тыс. ту.т./год на долю отходов животноводства приходится 335,5 тыс. ту.т./год [4]. 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 технология переработки органических отходов с использованием геотермальной энергии (рис. 6). Термальная вода из добычных скважин поступает в геотермальный центральный тепловой пункт (ГЦТП), из которого часть воды подводится в биореакторы (метантенки) для поддержания в них 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 в цикле Брайтона.

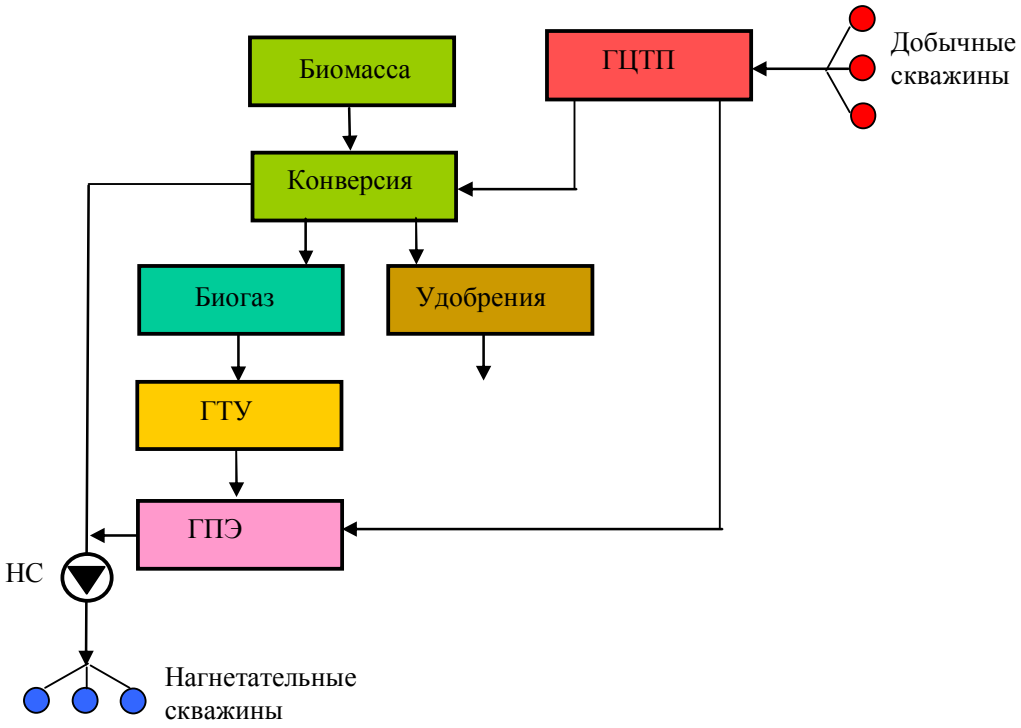


Рис.6. Комбинированная схема утилизации биомассы и геотермальной энергии.

Пределом, ниже которого нецелесообразно создавать бинарную ГеоЭС, является температура геотермального теплоносителя близкая к 100 ^{0}C. В ГПЭ эффективно можно использовать среднепотенциальные воды (80 – 100 ^{0}C), с последующим снижением температуры отработанной воды до 20 – 45 ^{0}C.

Строительство ГПЭ позволит использовать среднепотенциальные термальные воды для выработки электроэнергии, добиться более глубокого срабатывания температуры термальной воды, что важно для улучшения экономических показателей геотермального производства и наиболее эффективно утилизировать тепло выхлопных газов ГТУ.

На рис.7 представлена комбинированная схема с комплексным использованием термальных вод. Часть термальной воды из скважины направляется в теплообменник для подогрева сырья в метантенке, а другая часть воды поступает в тепличный комбинат 10 [5].

Необходимый температурный режим в метантенке поддерживается нагретой водой, циркулирующей с помощью насоса в трубчатых змеевиках, уложенных на дно метантенка. Из теплообменника термальная вода направляется в систему подпочвенного обогрева грунта и далее с более низкой температурой (25 – 28 ^{0}C) поступает в рыборазводный бассейн 12, куда также поступает другая часть воды из тепличного комбината. Такое комплексное использование термальной воды на различные нужды позволяет максимально эффективно использовать тепловой потенциал, со снижением конечной температуры до значения близкого к температуре окружающей среды.

Одна из схем комплексного и эффективного использования геотермальных энергетических ресурсов приведена на рис. 8. В предложенной схеме электроэнергия бинарной ГеоЭС в ночное время, когда спрос на электроэнергию резко снижается, используется в электролизной установке для

получения водорода.

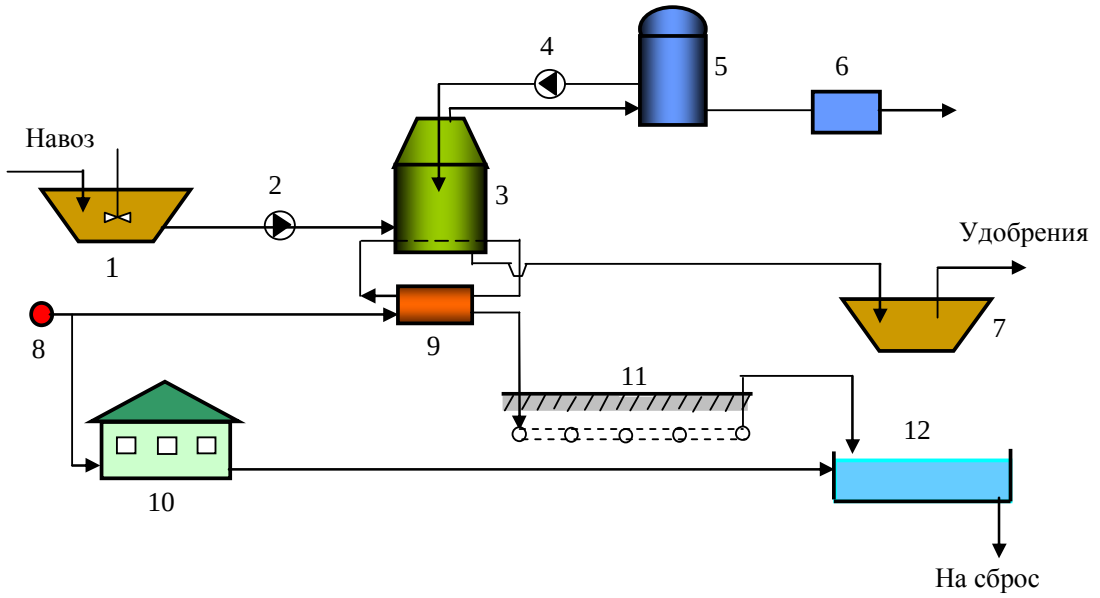


Рис.7. Комбинированная схема с комплексным использованием термальных вод (1 – резервуар для подготовки сырья; 2 – дозировочный насос; 3 – метантенк; 4 – компрессор; 5 – газгольдер; 6 – аппараты очистки биогаза; 7 – сборник удобрения; 8 – геотермальная скважина; 9 – теплообменник; 10 – тепличный комбинат; 11 – система подпочвенного обогрева грунта с трубами, уложенными на некоторой глубине; 12 – рыборазводный бассейн).

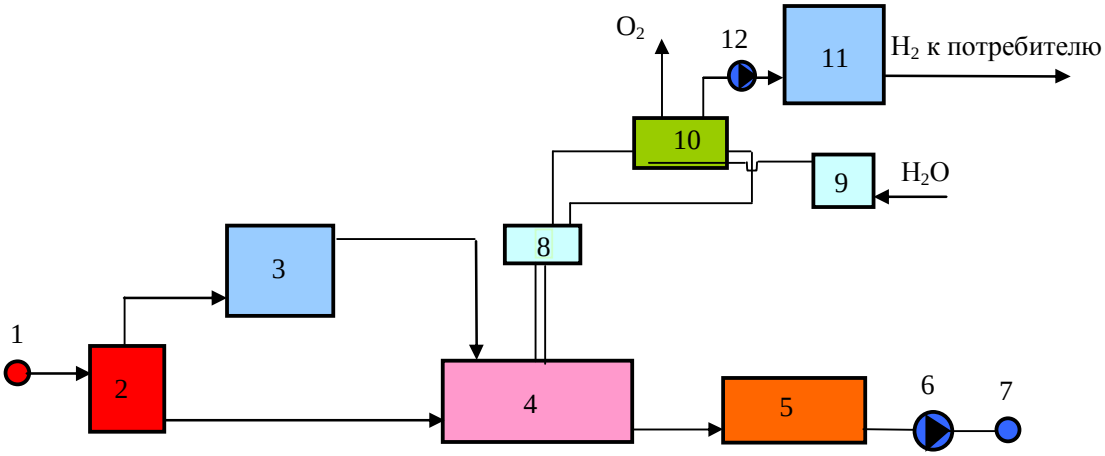


Рис.8. Схема комплексного использования геотермальных ресурсов (1 – добычная скважина; 2 – блок подготовки термальной воды; 3 – блок осушки и хранения газа; 4 – ГеоЭС; 5 – потребитель низкопотенциального тепла; 6 – насосная станция закачки; 7 – нагнетательная скважина; 8 – преобразовательное устройство; 9 – приготовление раствора; 10 – электролизер; 11 – хранилище водорода; 12 – насос).

Тенденцией энергетики на современном этапе является ее глобализация с одной стороны и индивидуализация с другой. Происходит возрождение на новой технологической основе индивидуального энергоснабжения человека (семьи) в быту и малом бизнесе. Вытесняются архаичные индивидуальные энергоустановки, на смену им приходят новые, обладающие все большей независимостью от систем централизованного энергоснабжения. Российская энергетика должна сочетать совершенствование своих уникальных энергосистем с опережающим развитием индивидуальной энергетики. Для страны с самой большой в мире и крайне неравномерно заселенной территорией переход от отопительных печей и простейших дизель-генераторов к передовым

индивидуальным энергоприборам и установкам позволит выровнять условия энергообеспечения людей, стирая пресловутую "разницу между городом и деревней". Это задача большого социального и экологического значения [6].

ВИЭ и установки на их основе (солнечные коллектора, фотоэлектрические преобразователи, тепловые насосы, ветроагрегаты малой мощности, индивидуальные биогазовые установки, микро-ГЭС и др.) наиболее адаптированы к индивидуальной энергетике и будут играть существенную роль в ее дальнейшем опережающем развитии.

В заключение отметим, что Дагестан является одним из перспективных регионов, где сосредоточены значительные ресурсы практически всех видов ВИЭ, и, которые используются на довольно низком уровне. Значительное увеличение доли ВИЭ в энергетическом балансе республики на основе комбинированных, энергоэффективных систем позволит существенно улучшить эколого-экономическую ситуацию в республике и социальные условия жизни значительной части населения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 10-08-00371-а и № 09-08-96514-р_юг_а).

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008. 376с.
2. *Алхасов А.Б.* Энергоэффективные технологии освоения ВИЭ/ 2 Межд. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы м перспективы», Махачкала, 2010. С.52-65.
3. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г.* Извлечение тепла грунта скважинным теплообменником в сезонном режиме работы// Известия РАН. Энергетика, №2, 2007. С.129-136.
4. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям) / Под ред. П.П. Безруких – М., ИАЦ Энергия, 2007. 272с.
5. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2010. 256 с.
6. *Макаров А.А., Фортов В.Е.* Тенденции развития мировой энергетики и энергетическая стратегия России //Вестник РАН, 2004, т. 74, №3. С.195-208.

ОБ ЭКСЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Ильин А.К.

Лаборатория нетрадиционной энергетики СНЦ РАН
(при Астраханском государственном техническом университете);
Астрахань, Россия; 414025, ул. Татищева, 16, АГТУ; e-mail: akilyin@newmail.ru

«Я думаю, что одна из важнейших задач физических наук в настоящее время – ведение приходно-расходной книги солнечного тепла, полученного земным шаром с его воздушной и водной оболочкой» (Воейков А.И., 1884).

При использовании солнечной энергии в энергетике рассматриваются различные аспекты проблемы как на основе энергетического, так и эксергетического анализа [1-17 и др.]. Однако вопросам эксергетического анализа уделяется значительно меньше внимания [1, 9, 12, 15, 16].

Исходные положения

Основными исходными данными для эксергетического анализа [7, 16] являются сведения о потоках тепловой энергии и температурах в характерных точках схем, процессов и т.п.

Для солнечной радиации такими данными являются:

- температура на поверхности Солнца до 6000 ^{0}C;
- при оценке потока солнечной радиации принимается степень черноты поверхности Солнца $\varepsilon \approx 1$;
- температура в космосе = -50 ^{0}C (223 К);
- средняя температура в приповерхностном слое атмосферы = 15 ^{0}C (288 К), на поверхности слоя атмосферы = -50 ^{0}C (223 К);
- средняя плотность потока солнечной радиации на поверхности атмосферы (солнечная постоянная) составляет 1370 Вт/м^2 [4, 5, 10 и др.];
- средняя плотность потока солнечной радиации после прохождения атмосферы (на поверхности Земли) составляет 1000 Вт/м^2 [4, 5, 13];
- средняя условная температура, соответствующая потоку радиации 1000 Вт/м^2 на поверхность Земли – $T_{a.усл}$, т.е. – «температура излучения».

Некоторые эксергетические характеристики

В литературе имеется несколько работ, посвященных определению непосредственно эксергии солнечной радиации. В [1] предлагается эмпирическая зависимость для определения плотности потока эксергии суммарной солнечной радиации на поверхность солнечных тепловых коллекторов перпендикулярную солнечным лучам:

$$ex_s = \psi \cdot q_{пад}\,, \qquad (1)$$

где $q_{пад}$ – плотность суммарной солнечной радиации, Вт/м^2;

коэффициент

$$\psi = 1 - 0{,}0002314 \cdot T_o\,, \qquad (2)$$

T_o – абсолютная температура окружающей среды, К.

Таким образом, при $q_{пад}$ = 1000 Вт/м^2 (см. выше) и при Т = 288 К (по средней температуре приповерхностного слоя атмосферы) и 263 К (вариант) ex_s составит по (1), соответственно, 933 Вт/м^2 и 939 Вт/м^2.

По поводу (1) необходимо отметить, слабую зависимость эксергии от T_o , а также большую величину ex_s при существующей умеренной разности температур $T_{a.усл}$ и T_o в сомножителе $(1 - T_o/T_{a.усл})$, применяющемся при определении эксергии теплового потока, т.е. $(1 - T_o/T_{a.усл}) < \psi$ [6, 12, 15, 16].

В работе [15, с.242] вычислена в первом приближении величина плотности потока эксергии солнечной радиации на перпендикулярную потоку поверхность атмосферы с учетом собственного излучения поверхности Солнца при температуре его поверхности и степени черноты ε = 1, геометрии и принятых размеров системы Солнце – Земля, температуры окружающей среды T_o = 300 К:

ex_s = 1480 Вт/м^2. (3)

Очевидно, что пока можно считать полученную в [12, 15] величину ex_s по (3) завышенной, т.к. при параметрах излучения при $T_{излуч} > T_o$ отношение плотности потока эксергии излучения к плотности теплового потока должно быть меньше единицы [13, 15 и др.], т.е. соответствует обычному условию при оценке эксергии теплового потока: $ex_q < q$. Необходимо также отметить, что величина температуры окружающей среды T_o = 300 К в данном случае принята неточно, т.к. температура на поверхности атмосферы близка к минус 50 ^{0}С (223 К). Однако ее влияние на ex_s в методике и в расчетах авторов невелико.

Можно использовать также для оценок соотношение

$ex_s' = \psi \cdot q_{пад}$ (4)

при вычислении удельной эксергии солнечной радиации, падающей на поверхность Земли после прохождения через атмосферу, используя общепринятую (см. выше) величину $q_{пад}$ = 1000 Вт/см^2 и используя приведенную в [13, 15] графическую зависимость $\psi = f(T)$ – см. рис.1. Но для этого нужно знать, кроме известной величины $q_{пад}$, температуру, которая является аргументом на рис.1.

Оценка температуры $T_{а.усл}$

Т.е. оценка температуры излучения, соответствующей потоку энергии $q_{пад}$ = 1000 Вт/м^2 после прохождения излучения через атмосферу («температура излучения» - термин по Д. Эвинсу, 1985). Обозначим эту температуру через $T_{a.усл}$. Тогда из зависимости для энергии собственного излучения слоя атмосферы при $T_{a.усл}$:

$q_{a.собств} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot T_{a.усл}^4$. (5)

при ε_c = 0,56; $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$К^4) – постоянная Стефана-Больцмана и $q_{a.собств} = q_{пад}$ = 1000 Вт/м^2 получим $T_{a.усл}$ = 421 К (148 ^{0}С). Здесь использована степень черноты излучающего слоя атмосферы, содержащей основные компоненты, ослабляющие солнечную радиацию, которую определяем с учетом содержания в атмосфере только паров воды и углекислого газа.

В соответствии с литературными данными по свойствам поглощающих газовых сред [4, 10, 11, 14, 15 и др.] можно принять степень черноты, обусловленную наличием паров воды, $\varepsilon_{H2O} \approx 0{,}4$, и то же – для углекислого газа, $\varepsilon_{CO2} \approx 0{,}2$ (ε_{H2O} и ε_{CO2} зависят от концентрации веществ и других параметров). Тогда, используя соотношение [10, 11, 14]

$\varepsilon_c = 1 / [(1/\varepsilon_г) + (1/\varepsilon_{зм}) - 1]$, (6)

где $\varepsilon_г = \varepsilon_{H2O} + \varepsilon_{CO2}$, а $\varepsilon_{зм}$ = 0,9 принято по рекомендуемой степени черноты поверхности Земли (0,9-1,0) [4], получим ε_c = 0,56 для подстановки в формулу (5). При этом в дальнейшем необходимо более подробно обосновать принятые величины ε_{H2O} и ε_{CO2} .

Там же [15, с.243] вычислена эксергия солнечной радиации, падающей на поверхности Земли перпендикулярно к поверхности приемника, при T_o = 300 К – $ex_{пов}$ = 1274 Вт/м^2, т.е. авторами получено отношение $ex_{пов} / q_{пад}$ = (1274/1000) > 1, что противоречит общепринятому [16]: $ex = q \cdot (1 - T_o/T_{изл})$, т.е. $ex < q$.

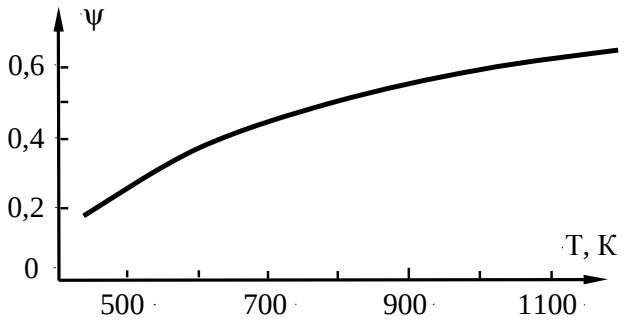


Рис.1. Зависимость отношения плотности потока эксергии излучения к плотности потока излучения при T_o = 300 К (фрагмент рис. по [15, с.237]).

Об эксергии солнечной радиации

Кроме [1] и [12, 15], есть возможность вычислить поток эксергии на поверхность Земли, принимая, как отмечено выше, температуру окружающей среды равной средней температуре приповерхностного слоя атмосферы $T_{пов}$ = 288 К и температуру излучения на поверхность Земли $T_{a.усл}$ = 421 К:

- По обычной для эксергетического анализа формуле [16]

$$ex_{пов} = q_{пад} \cdot (1 - T_{пов}/T_{a.усл}) = 316 \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

т.е. получаем $ex_{пов}/q_{пад} = 0{,}684$.

- По соотношению

$$ex_{пов} = \psi \cdot q_{пад} = 130 \text{ Вт/м}^2, \quad (8)$$

где ψ = 0,13 по рис.1 [15, с.237] при температуре излучения 421 К. Требует пояснения, почему по данным [15] ψ (= 0,13) в (8) значительно меньше $(1 - T_{пов}/T_{a.усл}) = 0{,}684$.

В качестве сравнения можно привести эксергию потока излучения слоя водяного пара при температуре 473 К и T_o = 300 К: ex_{H2O} = 0,281 Вт/м^2 [15]. При наличии в слое водяного пара дополнительно и углекислого газа величина эксергии $ex_{пов}$ увеличится.

Выводы

Таким образом, можно обсуждать следующие величины эксергии солнечной радиации, падающей на поверхность Земли:

по (1) $ex_{пов}$ = 933 Вт/м^2, ψ = 0,93;
по (7) $ex_{пов}$ = 316 Вт/м^2, ψ = 0,684;
по [15] $ex_{пов}$ = 1274 Вт/м^2, ψ = 1,274;
по [15] $ex_{пов}$ = 1304 Вт/м^2 при ψ = 0,13 по рис.1.

С учетом замечаний в тексте статьи можно считать величину 933 Вт/м^2 завышенной, а величину 130 Вт/м^2 – заниженной.

В целом приведенные данные по потоку эксергии солнечного излучения падающему на Землю недостаточно определенными и требующими внимания разработчиков данной проблемы.

Некоторым критерием оценки приведенных данных может быть величина полезной эксергии солнечного водонагревателя при реальных условиях (лето): полезный тепловой поток $q_{полезн}$ = 700 Вт/м^2 [8 и др.], T_o = 293 К. Тогда

$$ex_{полезн} = q_{полезн} \cdot (1 - T_o/T_{a.усл}) = 205 \text{ Вт/м}^2.$$

Литература:

1. *Авезов Р.Р.* Эксергетическая эффективность плоских солнечных тепловых коллекторов // Гелиотехника. 1999. № 5. С. 66-72.
2. *Алферов Ж.И.* Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. Чтения памяти А.Ф. Иоффе. Л.: Наука, 1983. С. 4-21.

3. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2010. 256 с.
4. *Бутыко М.И.* Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 328 с. (Раздел – Преобразования солнечной радиации)
5. *Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.* Солнечная энергетика. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с. (Раздел – Солнечное излучение на земле и в космосе)
6. *Ильин А.К.* Максимальная работа в процессах преобразования энергии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. 35 с.
7. *Ильин А.К.* Формулы для эксергии / Материалы докладов Росс. нац. симпозиума по энергетике. Т.1. Казань: КГЭУ, 2001. С. 193-196.
8. *Ильин А.К.* Коэффициент использования эксергии солнечных водонагревателей / 5–Минский международн. форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. С. 294-295.
9. *Ильин Р.А.* Сравнительная термодинамическая эффективность использования возобновляемых источников энергии / Технические проблемы Мирового океана. Материалы международн. научно-техн. конф. Владивосток: ДВО РАН, Институт проблем морских технологий, 2005. С. 317-318.
10. *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи. Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с. (Раздел – Солнечное излучение)
11. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. 4-е изд. Новосибирск: Наука (СО), 1970. 660 с. (Раздел – Теплообмен излучением в прозрачных и поглощающих средах)
12. *Петела Р.* Эксергия тепловой радиации / Вопросы термодинамического анализа (эксергетический метод). Сб. статей. М.: Мир, 1965. С. 222-237.
13. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов и др. Под ред. П.П. Безруких. СПб: Наука, 2002. 314 с. (Раздел – Солнечная энергия)
14. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. Пер. с англ. Л.: Энергия – Л.О., 1971. 294 с.
15. *Шаргут Я., Петела Р. Эксергия*. Пер. с польск. М.: Энергия, 1968. 280 с. (Раздел – Эксергия солнечной радиации при допущении, что поверхность солнца абсолютно черная)
16. Эксергетические расчеты технических систем / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, С.В. Дубовский и др. Справочное пособие. Под ред. В.М. Бродянского. ИТТФ Украины. Киев: Наукова думка, 1991. 360 с. (Раздел – Оценка энергетических и неэнергетических природных ресурсов)

МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, ОПИСЫВАЕМОЙ С ПОЗИЦИЙ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Джаватов Д.К.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: djavatdk@mail.ru

Рассматриваются принципы моделирования сложных систем в условиях неопределенности на основе теории нечетких множеств

Нет ничего более противного разуму и природе, чем случайность.
Цицерон

При моделировании сложных систем возникает необходимость учета максимально возможного количества информации об исследуемом объекте. При этом, как правило, используется профессиональный язык (искусственный или подмножество естественного), отражающий специфику области исследования. Следствием этого является использование в процессе моделирования качественных элементов: описании, понятий и отношений с неопределенными или нечеткими границами, высказываний с многозначной шкалой истинности и т.д.

В тех случаях, когда информация существенно - неопределенная, задание строгих границ «волевым» порядком или искусственное введение однозначности означает не что иное, как огрубление исходных данных, и может приводить к получению пусть четкого, но неверного результата. Исследование и учет однозначности (определенности) или неоднозначности (неопределенности) всех параметров и отношений, описывающих исследуемое явление, представляет собой необходимый и важнейший элемент математического моделирования.

Многие процессы и явления объективного мира, описываются известными закономерностями, которые можно условно разделить на две группы: *однозначно определенные (детерминированные)* и *находящиеся в условиях неопределенности.*

К первой группе относятся закономерности, которые по заданным с определенной точностью характеристикам воздействий позволяют установить вполне определенный (детерминированный) отклик (реакцию) исследуемого объекта.

Вторая группа закономерностей описывает случайные события (такие, которые при заданном комплексе условий могут протекать по-разному при одних и тех же условиях). Например, при бросании игрального кубика нельзя заранее однозначно сказать, какая цифра выпадает.

Часто граница, отделяющая случайное событие от неслучайного, очень размытая. Одна из концепций случайности (которая преобладала до начала XX столетия) состояла в том, что если при описании исследуемого объекта предусмотреть все связанные с ним «детали», то никакой случайности не будет. Однако в настоящее время принято придерживаться другой концепции, согласно которой в «чистом виде» однозначно определенных процессов (явлений), наверное, нет, т.е. при описании достаточно сложных процессов закономерности всегда носят стохастический характер.

1. Причины появления неопределенностей и их виды

При разработке математических моделей необходимо задуматься над

тем, насколько однозначно определены параметры. На этом этапе необходимо определить для каждого параметра, можно ли считать его однозначно определенным или ему присуща некоторая неопределенность. Причем неопределенными могут быть не только параметры, но и связи между ними. Неопределенность понимается в том смысле, что соответствующие характеристики рассматриваемой системы находятся в условиях приближения и неполноты информации.

К наиболее значимым причинам появления неопределенности можно отнести следующие:

показатели системы практически всегда зависят от большого количества различных факторов, причем часть из них может быть даже неизвестна исследователю;

при построении модели обычно ограничиваются отбором наиболее существенных (по мнению субъекта или в силу объективных обстоятельств) переменных, что, конечно, приводит к огрублению модели;

математические погрешности, возникающие при упрощении модели;

ошибки измерений и погрешности при проведении эксперимента и т.п.

В общем случае все причины возникновения неопределенности можно разбить на две основные группы: *субъективные* и *объективные*. Субъективные причины обусловлены некоторыми частными, нерегулярно повторяющимися явлениями, поэтому их достаточно сложно учесть при решении прикладных задач. Объективные причины чаще всего связаны с физическими особенностями исследуемого явления.

В зависимости от полноты описания неопределенность можно разбить на три основные группы: неизвестность, недостоверность и неоднозначность. Рассмотрим группы описания неопределенности более подробно (рис.1).

Неизвестность — это начальная стадия описания неопределенности, при которой информация полностью отсутствует.

Недостоверность – это вторая стадия описания неопределенности, которая для различных стадий сбора информации может классифицироваться как неполнота, недостаточность, недоопределенность и неадекватность. *Неполнота* характеризуется тем, что собрана не вся возможная информация; *Недостаточность* – собрана не вся необходимая информация. *Недоопределенность – для* некоторых элементов определены не их точные описания, а лишь множества, которым эти описания принадлежат; *Неадекватность* — ряд элементов исследуемого объекта описан по аналогии с уже имеющимися описаниями подобных элементов, т.е. имеет место так называемое «замещающее» описание, которое не всегда удовлетворяет целям исследования.

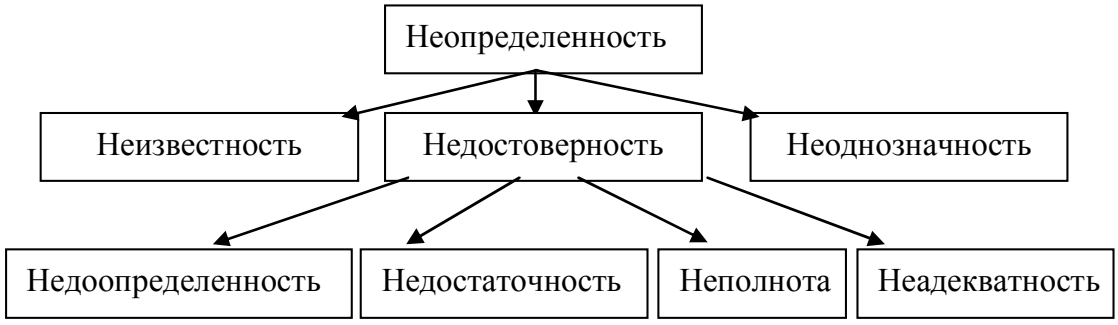


Рис.1. Виды описания неопределенности.

Дальнейший анализ неопределенности, учет новых факторов, определяющих исследуемое явление, может привести либо к устранению неопределенности (все элементы описаны однозначно), либо к неоднозначности.

Неоднозначность – это конечная (по полноте возможного описания) степень неопределенности, когда вся возможная информация собрана, но полностью необходимое описание не получилось. Причины возникновения неоднозначности могут быть лингвистические и физические.

Физическая неопределенность связана либо с наличием нескольких возможностей, каждая из которых *случайным* образом может стать реальностью, либо с *неточностью* вычислений или измерений. Таким образом, физическая неопределенность связана или с *физической сущностью* исследуемого явления, или с его *измеряемыми* проявлениями.

Лингвистическая неопределенность связана с использованием некоторого естественного языка. Она порождается, с одной стороны, множественностью значений слов (понятий и отношений) — *полисемией* (греч. *polyseta* – многозначность), с другой – *неоднозначностью смысла фраз.*

Математически неопределенность может быть описана стохастически, статистически, с позиций теории нечетких множеств, а также интервально (рис. 2). Отмеченные формы описания перечислены по возрастанию степени неопределенности. Рассмотрим физический смысл этих неопределенностей.

Стохастическое описание используется тогда, когда неопределенные параметры имеют вероятностный (случайный) характер.

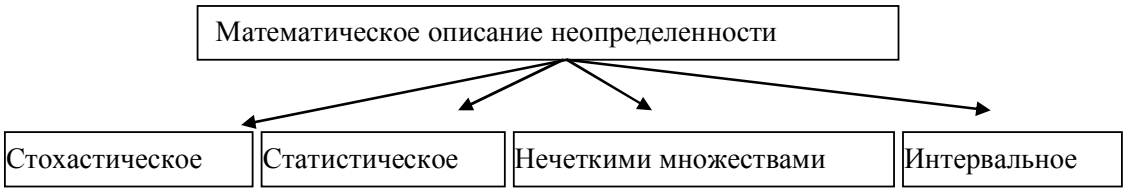


Рис.2. Формы описания неопределенности.

При этом необходимо, чтобы был определен закон распределения таких случайных параметров. Стохастическим описанием занимается теория вероятностей и теория случайных процессов.

Статистическое описание является, по существу, частным случаем стохастического описания. Эту форму описания применяют, когда заданы только выборочные оценки каких-либо характеристик случайной величины или наборы значений некоторых случайных параметров. Статистическим описанием занимается математическая статистика.

При описании с позиций *нечетких множеств* неопределенный параметр задается некоторым множеством возможных его значений, характеризующихся той или иной степенью принадлежности (с помощью, так называемой *функции принадлежности)* объекту, описываемому этим нечетким множеством. Функция принадлежности может принимать любые значения от 1 (полная принадлежность) до 0 (полная непринадлежность). Интерпретацией функции принадлежности является *субъективная мера* того, насколько полно элемент (параметр) соответствует понятию, смысл которого описывается нечетким множеством. Этим описанием занимается теория нечетких множеств.

Интервальное описание можно использовать, когда неопределенные параметры заданы только диапазонами возможных значений (верхней и нижней границами), причем параметр может принимать любое значение внутри интервала и ему нельзя приписать никакой вероятностной меры. Интервальное описание

является предметом исследования интервальной математики.

Многообразие форм описания неопределенностей приводит к различным особенностям постановки и решения соответствующих задач.

2. Моделирование в условиях неопределенности на основе нечетких множеств

...Вряд ли можно считать, что мозг в сравнении с современными вычислительными машинами не имеет определенных преимуществ...Главное из этих преимуществ, — по-видимому, способность мозга оперировать с нечетко очерченными понятиями.

Н.Винер

При решении сложных технических, экономических, технологических, социальных и других задач мы сталкиваемся с тем, что чем сложнее система, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Такая ситуация в литературе определяется термином «*принцип несовместимости*». Следствие из этого принципа кратко можно выразить так: «*Чем глубже мы анализируем реальную задачу, тем неопределеннее становится ее решение*». Именно в этом смысле точный количественный анализ поведения сложных систем для практического исследования реальных задач, по-видимому, недостаточен. В [1,2] предлагается подход, который опирается на предпосылку о том, что элементами исследования являются не числа, а некоторые нечеткие множества, для которых переход от *«принадлежности к классу»* к *«непринадлежности»* не скачкообразен, а непрерывен. В основе такого подхода лежит не традиционная двузначная или даже многозначная логика, а логика с нечеткой истинностью, нечеткими связями и нечеткими правилами вывода, которая имеет три отличительные черты:

1) в нем используются так называемые «лингвистические» переменные вместо числовых переменных или в дополнение к ним;
2) простые отношения между переменными описываются с помощью нечетких высказываний;
3) сложные отношения описываются нечеткими алгоритмами.

Отметим, что с математической точки зрения предложенный подход как метод описания неопределенности лежит между описаниями с позиций теории вероятностей и математической статистики и с позиций *интервальной математики*, при которой, характеристики задаются диапазонами возможных значений (верхними и нижними границами).

Подобный тип задач чаще всего имеет место в том случае, когда концептуальная постановка задачи сформулирована в виде некоторого неопределенного высказывания типа *«Если **A**, то **B**» ($\hat{A} \Rightarrow \hat{A}$)*, в котором ***A*** и ***B*** можно описать нечеткими множествами.

Приведем некоторые основные положения.

Нечеткое множество — это математическая модель класса с нечеткими или, иначе говоря, размытыми границами.

В этом понятии учитывается возможность постепенного перехода от принадлежности к непринадлежности элемента множеству. Иными словами, элемент может иметь степень принадлежности множеству между полной принадлежностью (1) и полной непринадлежностью (0). Если степень принадлежности обозначить μ, то $\mu \in [0,1]$.

Введем некоторые основные понятия и определения [1,2]. С математической точки зрения нечеткое множество A можно определить следующим образом: *нечетким множеством* A в U называется совокупность пар вида $(u, \mu_A(u))$ где

$u \in U$, а $\mu_A(u)$ – функция принадлежности элементов нечеткого множества *A*, $\mu_A : U \to [0,1]$; *U*— некоторое множество (в обычном смысле) элементов, которое называется универсальным множеством. Для каждого элемента $u \in U$ функция принадлежности определяет степень его принадлежности той совокупности элементов, которая формализуется данным нечетким множеством. Математически нечеткое множество определяется следующим образом:

$$A = \bigcup_{u \in U} \mu_A(u)/u$$

Например, пусть универсальное множество и совокупность функций принадлежности описываются выражениями: *U= (a, b, c, d, e, f)* и *M=* (0; 0,5; 1). В этом случае *M* — совокупность возможных значений функции принадлежности. При этом одна из возможных форм записи нечеткого множества *A* может быть представлена в следующем виде: *A = (0,0/a;* 1,0/*b*; 0,5/c; *0,0/d;* 0,5/e; 0,0/*f*).

Остановимся на понятии функции принадлежности более подробно. Спектр мнений по этому вопросу чрезвычайно широк. Если под функцией принадлежности понимать «меру благоприятствия» соответствующих элементов тому понятию, которое формализуется данным нечетким множеством, то в этом случае функция принадлежности отождествляется с понятием вероятности.

Иногда под функцией принадлежности понимают возможность или полезность того или иного события.

Мы же под значением функции принадлежности $\mu_A(x)$ нечеткого множества *A* для любого $x \in X$ будем понимать вероятность того, что *лицо, принимающее решение (ЛПР),* отнесет элемент *x* к множеству *A*. В случае, когда *A* — некоторое понятие естественного языка, а *x* — элемент множества объектов, обозначаемых понятием *A*, $\mu_A(x)$ есть вероятность того, что ЛПР использует *A* в качестве имени объекта *x*.

Введем ряд определений и некоторые простейшие операции с нечеткими множествами.

Носителем нечеткого множества A (Supp A или *S(A))* называется множество (в обычном смысле), определяемое как

$Supp A = \{u/u \in U, \mu_A(u) > 0\}$.

Нечеткое отношение R: X→Y представляет бинарное отношение нечетких множеств *X* и *Y*; *R* следующим образом описывается с помощью функции принадлежности двух переменных:

$$R = \bigcup_{(x,y) \in X \times Y} \mu_R(x,y)/(x,y),$$

где функция принадлежности двух переменных в зависимости от постановки задачи показывает предпочтение или сходство элементов первого и второго нечетких множеств.

Для примера рассмотрим бинарное отношение сходства. Предположим, что *X*— *{яблоко, груша}, Y= {айва, апельсин}.* Сходство будем оценивать по степени сладости зрелых фруктов (функция принадлежности в этом примере выбирается субъективно; в данном случае полагают, что по степени сладости груша и апельсин наиболее близки, а груша и айва - наименее близки друг другу). Бинарное нечеткое отношение сходства между элементами множеств X и У можно записать в виде:

сходство ={0,8/(яблоко, айва); 0,6/(яблоко, апельсин);
0,2/(груша, айва); 0,9/(груша, апельсин)}.

Для удобства записи в теории нечетких множеств нечеткие отношения обычно представляются в виде так называемой *матрицы отношений.* В данном

случае имеем:

$$R = \begin{bmatrix} 0{,}8 & 0{,}6 \\ 0{,}2 & 0{,}9 \end{bmatrix},$$

где элемент R_{ij} равен значению функции $\mu_R(x,y)$ для i-го элемента X и j-го элемента Y.

В реальных задачах часто возникает такая ситуация. Между множествами $X \to Y$ и $Y \to Z$ имеются бинарные нечеткие отношения. Необходимо установить бинарное нечеткое отношение между множествами $X \to Z$. Эта ситуация требует введения операции произведения отношений. Пусть R— отношение $X \to Y$, а S— отношение $Y \to Z$, тогда отношение $X \to Z$ определит произведение $R \circ S$, которое в теории нечетких множеств определяется как *максиминное произведение* следующего вида:

$$R \circ S = \bigcup_{x,z \in (X,Z)} \max(\min(\mu_R(x,y), \mu_S(y,z)))/(x,z).$$

При выполнении обычного произведения матриц элемент матрицы-произведения, стоящий в *i-й* строке и *k-м* столбце, равен сумме произведений соответственных элементов *i*-й строки первой матрицы и k-го столбца второй матрицы. По существу, максиминное произведение определяется как обычное произведение матриц, где вместо операции умножения вводится min, а вместо операции сложения — max.

Пусть, например,

$$R = \begin{bmatrix} 0{,}3 & 0{,}8 \\ 0{,}6 & 0{,}9 \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0{,}5 & 0{,}9 \\ 0{,}4 & 1{,}0 \end{bmatrix}$$

тогда

$$R \circ S = \begin{bmatrix} 0{,}3 & 0{,}8 \\ 0{,}6 & 0{,}9 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0{,}5 & 0{,}9 \\ 0{,}4 & 1{,}0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \max(\min(0{,}3;\ 0{,}5);\ \min(0{,}8;\ 0{,}4)) & \max(\min(0{,}3;\ 0{,}9);\ \min(0{,}8;\ 1{,}0)) \\ \max(\min(0{,}6;\ 0{,}5);\ \min(0{,}9;\ 0{,}4)) & \max(\min(0{,}6;\ 0{,}9);\ \min(0{,}9;\ 1{,}0)) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0{,}4 & 0{,}8 \\ 0{,}5 & 0{,}9 \end{bmatrix}$$

Нечеткой (лингвистической) переменной называется совокупность (кортеж) вида $(X, U, \tilde{X})$ где X— наименование нечеткой переменной; U= $\{u\}$ — область ее определения (обычное множество); $\tilde{\tilde{O}} = \bigcup_{u \in U} \mu_X(u)/u$ — нечеткое множество на U, описывающее числовые значения нечеткой переменной X.

Если обратить внимание на структуру наименования лингвистической переменной, то можно отметить, что в общем случае это составной термин, представляющий сочетание некоторых элементарных терминов. Эти элементарные термины можно разбить на четыре основных категории:

первичные — символы специальных нечетких подмножеств, например молодой, старый и т.д.;

отрицание НЕ и *союзы* И, ИЛИ;

неопределенности типа: очень, слабо, более или менее и т.д.;

маркеры чаще всего это вводные слова.

Пример 1. Пусть нечеткое множество описывается составным термином: *«по мнению окружающих, это был не очень сильный и совсем не высокий*

человек». Выделим основные категории:
первичные термины - сильный, высокий (человек);
отрицание НЕ и союзы И;
неопределенности — очень, совсем;
маркеры — по мнению окружающих.

Отрицание НЕ, союзы И, ИЛИ, неопределенности типа *очень, весьма, больше, меньше* и др., которые входят в определение значений лингвистических переменных, могут рассматриваться как символы различных операций, определенных на нечетких подмножествах *U*. Рассмотрим наиболее существенные из них.

Пусть *A* и *B* — нечеткие множества; *S(A), S(B)* - их носители. Обычно вводятся два набора определений основных операций над нечеткими множествами: *максиминный (mm)* и *вероятностный (p)* [1,2]. Объединением нечетких множеств *A* и *B* в *U* называется нечеткое множество $\grave{A} \cup \hat{A}$ с функцией принадлежности вида:

$$\mu_{\grave{A}\cup\hat{A}}(u) = \begin{cases} \max(\mu_A(u), \mu_B(u)), u \in U, & -(mm) \\ \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u), u \in U, & -(p) \end{cases}$$

Объединение соответствует союзу ИЛИ. Таким образом, если X и Y – символы нечетких множеств, то $X \cup Y$ = (X или Y).

Пример. Пусть A = (0,2/1;0,5/2;1,0/3), *B*= (0,8/1; 0,4/2; 0,5/3; 0,8/4). Тогда:
$A \cup B$ =(0,8/1; 0,5/2; 1,0/3; 0,8/4) - *(mm);*
$A \cup B$ =(0,84/1; 0,7/2; 1,0/3; 0,8/4) - *(p).*

Пересечением нечетких множеств *A и B* в U называется нечеткое множество $A \cap B$ с функцией принадлежности вида:

$$\mu_{\grave{A}\cap\hat{A}}(u) = \begin{cases} \min(\mu_A(u), \mu_B(u)), u \in U, & -(mm) \\ \mu_A(u) \cdot \mu_B(u), u \in U, & -(p) \end{cases}$$

Пересечение соответствует союзу И. Таким образом, $X \cap Y$ = *(X и Y).*

Пример. Пусть A = (0,2/1; 0,5/2; 1,0/3), B = (0,8/1; 0,4/2; 0,5/3; 0,8/4). Тогда:

$A \cap B$ = (0,2/1; 0,4/2; 0,5/3; 0,0/4) - (mm);
$A \cap B$ = (0,16/1; 0,2/2; 0,5/3; 0,0/4) - (p).

Дополнением нечеткого множества *A* называется нечеткое множество $\overline{A}$ с функцией принадлежности: $\mu_{\overline{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$ - *(mm,p).*

Определение дополнения соответствует отрицанию НЕ, т.е.
$\overline{X} = (\text{íå } X) = \bigcup_U (1 - \mu_X(x))/x.$

Пример. Пусть *A* = (0,2/1; 0,5/2; 1,0/3). Тогда $\overline{A}$ = (0,8/1; 0,5/2; 0,0/3).

Декартово произведение $A_1 x A_2 x ... x A_n$ нечетких множеств A_i в U_i i=l,n, определяется как нечеткое множество *A* в декартовом произведении $U = U_1 \times U_2 \times \ldots \times U_n$ с функцией принадлежности вида:

$$\mu_{\grave{A}}(u) = \min\left\{\mu_{A_1}(u_1), ..., \mu_{A_n}(u_n)\right\}, u = (u_1, ..., u_n) \in U$$

Обычным множеством α - уровня нечеткого множества *A* называется
$S_\alpha = \{u : u \in U, \mu_A(u) \geq \alpha\}$, где $\alpha \in [0,1]$.

Для определения арифметических операций $\otimes = \{+, -, \cdot, /\}$ в [24] приведен принцип обобщения Л.А. Заде [2].

Пусть *A* и *B* – два нечетких множества. Тогда нечеткое множество $D = A \otimes B$ определяется функцией принадлежности

$\mu_D(u) = \theta[\mu_A(u), \mu_B(u)]$, где

$$\theta[\mu_A(u), \mu_B(u)] = \begin{cases} \sup \quad \min(\mu_A(u), \mu_B(u)), -(mm), \\ a \otimes b = u, a \in S_A, b \in S_B \\ \sup \quad (\mu_A(u) \cdot \mu_B(u)), -(p), \\ a \otimes b = u, a \in S_A, b \in S_B \end{cases}$$

Теперь арифметические операции $\otimes = \{+, -, \cdot, /\}$ можно определить следующим образом: $\grave{A} \otimes \hat{A} = \bigcup_U \mu_D(u)/(a \otimes b)$.

Пример операций над множествами.

Пусть A = (0,2/1; 0,5/2; 1,0/3), B = (0,8/1; 0,4/2; 0,5/3; 0,8/4). Тогда

$A+B = \sup_{a \otimes b, a \in S_A, b \in S_B}$ (0,2/2; 0,2/3; 0,2/4; 0,2/5; 0,5/3; 0,4/4; 0,5/5; 0,5/6; 0,8/4; 0,4/5; 0,5/6; 0,8/7) = (0,2/2; 0,5/3; 0,8/4; 0,5/5; 0,5/6; 0,8/7) - *(mm);*

$A + B = \sup_{a \otimes b, a \in S_A, b \in S_B}$ (0,16/2; 0,08/3; 0,1/4; 0,16/5; 0,4/3; 0,2/4; 0,25/5; 0,4/6; 0,8/4; 0,4/5; 0,5/6; 0,8/7) = (0,16/2; 0,4/3; 0,8/4; 0,4/5; 0,5/6; 0,8/7) - *(p).*

Степенью нечеткого множества A называется нечеткое множество A^α с функцией принадлежности $\mu_{A^\alpha}(u) = (\mu_A(u))^\alpha$, $u \in U$, $\alpha > 0$.

При $\alpha = 2$ получаем операцию *концентрирования* (*CON*): $CON(A) = A^2$,которая снижает степень нечеткости описания, а при $\alpha = 0.5$ получаем операцию *растяжения* (*DIL*): $DIL(A) = A^{0,5}$. Эта операция увеличивает степень нечеткости исходного нечеткого множества.

Неопределенность удобно определить через некоторые основные операции (особенно операции *степень, CON, DIL*). Покажем, как это можно сделать для неопределенности *очень*. Аналогичным образом можно установить неопределенности: *больше, меньше, много, слабо, вроде, вполне* и др.

В обычном использовании неопределенность *очень* не имеет четко определенного значения и действует как усилитель, генерируя подмножества того множества, к которому она применяется. Аналогичным образом действует операция концентрирования, поэтому *очень и*, где *и* — некоторый термин, может быть определено как квадрат *и*, т.е.

$$\hat{i} \div \mathring{a} \acute{i} \ddot{u} \quad u = u^2 = \bigcup_U \mu_U^2(u)/u.$$

Например, если *и = маленький возраст* - (1,0/1; 0,8/2; 0,6/3; 0,4/4; 0,2/5), тогда *очень маленький возраст* = (1,0/1; 0,64/2; 0,36/3; 0,16/4; 0,04/5). Рассматриваемый как оператор, *очень* может действовать сам на себя. Так, например, *очень очень и = (очень и)*^{2} *=и*^{4}**.**

Заметим, что порядок следования элементарных терминов в составном термине существенно влияет на результат. Так, например:

и = очень не точно $= \overline{(\text{точно})^2}$ и *и = не очень точно* $= \overline{\hat{i} \div \mathring{a} \acute{i} \ddot{u} \quad \grave{o} \hat{i} \div \acute{i} \hat{i}} = \overline{(\grave{o} \hat{i} \div \acute{i} \hat{i} \quad)^2}$ -

не одно и то же.

Высказывание *«если А, то В, иначе* С» (где *А, В, С* — нечеткие подмножества, при этом *А* обязательно из *U*, а *В* и С могут быть определены как на *U*, так и на *V* в зависимости от формулировки задачи; напомним, что *U* и *V* — универсальные множества, на которых определены нечеткие множества *А, В, С) в* терминах декартова произведения можно определить следующим образом:

если A, тогда B, иначе C $\overset{def}{=}$ $A \times B \cup \overline{A} \times C$.

По существу, мы получили некоторое неопределенное отношение R $(R: U \Rightarrow V)$. Далее (по условию задачи) мы хотим определить значения некоторых подмножеств из V, которые определяются заданными подмножествами из U. Для решения этой и подобного типа задач сформулировано *составное правило вывода*, которое имеет следующий вид.

Если R — неопределенное отношение $U \Rightarrow V$ и x — неопределенное подмножество U, тогда неопределенное подмножество $y \in V$, которое индуцируется подмножеством x, дается композицией x и R, т.е. $y = x \circ R$, где «$\circ$» — максиминное произведение.

Для сравнения полученных нечетких множеств строится некоторая четкая функция $H(y_1,y_2)$ от нечетких аргументов, которая называется *индексом ранжирования*. Значения индекса для конкретной пары нечетких чисел (являющихся, по существу, нечеткими множествами) дает основание решить вопрос о том, какое из двух нечетких чисел больше (или - с какой степенью больше).

Пример 2. Пусть справедливым считается следующее высказывание: *«Если дорога скользкая — езда опасная, в противном случае — не опасная»*. Необходимо определить, в каком случае езда будет более опасной: если дорога *не очень скользкая* или дорога *очень не скользкая!*

Отметим, что в качестве примера выбрано простейшее утверждение, которое легко формализуется, ответ на него почти очевиден. В реальных задачах операций может быть десятки и сотни и ответы на поставленные вопросы не так тривиальны.

Введем нечеткие множества скользкая дорога и опасная езда. Первое нечеткое множество можно определить через коэффициент трения скольжения. Если использовать коэффициенты 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06, то можно записать:

A = скользкая дорога =

= (0,8/0,01; 1,0/0,02; 0,6/0,03; 0,4/0,04; 0,2/0,05; 0,1/0,06).

Для определения степени опасности можно ввести коэффициенты опасности I—V. Например, I — это легкие ушибы, ссадины; II — переломы конечностей и т.д. При этом

B = опасная езда = (0,1/I; 0,3/II; 0,5;III 0,7/IV; 0,9/V).

Теперь можно определить все необходимые для решения задачи нечеткие множества:

Не скользкая дорога = $\overline{\mathbf{A}}$ = (0,2/0,01; 0,0/0,02; 0,4/0,03; 0,6/0,04; 0,8/0,05; 0,9/0,06);

Не опасная езда = $\overline{\mathbf{B}}$ = (0,9/I; 0,7/II; 0,5/III; 0,3/IV; 0,1/V);

X_1 = *не очень скользкая дорога =*

= $\overline{A^2}$ = (0,36/0,01; 0,0/0,02; 0,64/0,03; 0,84/0,04; 0,96/0,05; 0,99/0,06);

X_2= *очень не скользкая дорога =*

= $\left(\overline{A}\right)^2$ = (0,04/0,01; 0,0/0,02; 0,16/0,03; 0,36/0,04; 0,64/0,05; 0,81/0,06);

На основе правила вывода окончательно получим Y_1= (0,9/I; 0,7/II; 0,5/III; 0,6/IV;0,6/V); Y_2= (0,81/I; 0,7/II; 0,5/III; 0,36/IV;0,36/V);

Сравним полученные результаты для Y_1 и Y_2 между собой, для чего воспользуемся индексом ранжирования $H\frac{1}{5}(Y_1,Y_2)$ [1]:

$H\frac{1}{5}(Y_1,Y_2)$ = sup(min(0,9$_I$; 0,81$_I$), min(0,7$_{II}$; 0,81$_I$,; 0,7$_{II}$), min(0,5$_{III}$; 0,81$_{III}$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$), min(0,6$_{IV}$; 0,81$_I$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$; 0,36$_{IV}$), min (0,6$_V$; 0,81$_I$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$; 0,36$_{IV}$; 0,36$_V$) =sup (0,81; 0,7; 0,5; 0,36; 0,36) = 0,81;

$H\frac{1}{5}(Y_2,Y_1)$ = sup (min(0,81$_I$; 0,9I), min(0,7$_{II}$; 0,9$_I$; 0,7$_{II}$), min(0,5$_{III}$; 0,9$_I$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$), min(0,36$_{IV}$; 0,9$_I$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$; 0,6$_{IV}$), min (0,36$_V$; 0,9$_I$; 0,7$_{II}$; 0,5$_{III}$; 0,6$_{IV}$; 0,6$_V$) = sup (0,81; 0,7; 0,5; 0,36; 0,36) = 0,81.

Использование детерминированного индекса ранжирования не позволило сделать вывод о том, какая дорога более опасная. Уточним решения, используя для сравнения интегральный индекс ранжирования [1]. Использование интегрального индекса ранжирования дает, что, *не очень скользкая дорога* более опасна, чем *очень не скользкая дорога.*

Как уже отмечалось, подход с позиций теории нечетких множеств к математическому моделированию явлений или процессов наиболее предпочтителен в тех областях знаний, в которых трудно или даже невозможно получить точные количественные оценки. К таким разделам можно отнести экологию, метеорологию, педагогику, психологию, социологию и т.п.

Рассмотрим еще один пример решения задачи с позиций теории нечетких множеств в метеорологии.

Пример 3. Многолетние погодные наблюдения показали, что если атмосферное давление высокое, то на следующий день погода будет солнечной, в противном случае — пасмурной. Необходимо определить какая будет погода, если:
атмосферное давление не очень высокое;
атмосферное давление очень не высокое.
Оценить, в каком случае будет «более солнечно».

Введем нечеткие множества «высокое давление», «солнечная погода» и «пасмурная погода».

Пусть *A= высокое давление* = (0,2/740; 0,4/750; 0,6/760; 0,8/770; 1/780) (элементы носителя числового нечеткого множества *A* измеряются в миллиметрах ртутного столба).

Для определения погоды введем нечисловые нечеткие множества с элементами носителя: «пасмурно», «пасмурно с прояснением», «переменная облачность», «ясно» и «солнечно». Для сокращения записей соответствующие элементы носителя обозначим: I—V. Например I — *пасмурно*, II — *пасмурно с прояснением* и т.д. При этом:

B = солнечная погода = (0,2/I; 0,3/II; 0,5/III; 0,7/IV; 1/V),

C= пасмурная погода = (1/I; 0,8/II; 0,4/III; 0,2/IV; 0,1/V).

Теперь можно определить все необходимые для решения задачи нечеткие множества:

не высокое давление = $\overline{A}$ = (0,8/740; 0,6/750; 0,4/760; 0,2/770; 0/780);

X_1 = *не очень высокое давление* =

= $\left(\overline{A^2}\right)$ = (0,96/740; 0,84/750; 0,64/760; 0,36/770; 0/780);

X_2 = *очень не высокое давление —*

= $\left(\overline{A}\right)^2$ =(0,64/740; 0,36/750; 0,16/760; 0,04/770; 0/780).

Окончательно получаем:

Y_1=(0,8/I; 0,8/II; 0,5/III; 0,6/IV;0,6/V);

Y_2=(0,64/I; 0,64/II; 0,4/III; 0,36/IV;0,36/V);

$H\frac{1}{5}(Y_1, Y_2)$ =0,64; $H\frac{1}{5}(Y_2, Y_1)$ = 0,64.

Применение детерминированного индекса ранжирования не позволило сделать вывод о том, в каком случае будет «более солнечно». Уточним решение, используя для сравнения интегральный индекс ранжирования. В результате получаем, что $H_+(Y_1)$=33,3; $H_+(Y_2)$ = 24,6.

Таким образом, если давление не очень высокое, то на следующий день будет «более солнечно», чем в том случае, когда давление - очень не высокое.

Итак, нечеткая логика, на которой основано нечеткое управление, ближе по духу к человеческому мышлению и естественным языкам, чем традиционные логические системы. Нечеткая логика, в основном, обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реального мира. Наличие математических средств отражения нечеткой исходной информации позволяетпостроить модель, адекватную реальности.

Литература:

1. *Гитман М.Б.* Введение в теорию нечетких множеств и интегральную математику: Ч. 1: Применение лингвистической переменной в системах принятия решений.- Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 1998. 45 с.
2. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. 168 с.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССООБМЕНА НА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОПОДВОДА

Вердиев М.Г.

Дагестанский Государственный Технический Университет;
Махачкала, Россия; 367015, пр-т И.Шамиля, 70.

Экспериментальным и теоретическим исследованиям температурных полей и локальных значений коэффициентов теплоотдачи на неизотермической поверхности (ребре) посвящены работы Российских; Петухова В.Б., Тиктина С.А., Дулькина И.Н., Ройзена Л.И., Фастовского В.Г. и др.[1] и зарубежных; Бертере Ш.А., Керна Д.К., Крауса А.Д., Уилкинса Ж.Е., Вествоутера Ж.Е., Хэли К.В., Кэйса А.М., Лондона А.Л. и др. исследователей [2, 3]. Однако известные методы расчета теплопереноса через границу раздела: неизотермическая поверхность твердого тела (неизотермического ребра) - теплоноситель, по сути, являются полуэмпирическими с ограниченными областями применения, в связи со следующими обстоятельствами.

Известные способы расчета неизотермической поверхности (неизотермического ребра) основаны на методе ее разбиения, на области в соответствии с действующими на них механизмами теплопереноса, описывающими аппроксимационными соотношениями с постоянными коэффициентами [1, - 8]. Исходя из этого, записываются дифференциальные уравнения для каждой области, с соответствующими начальными и граничными условиями и дополнительно на границах областей искусственно задаются так называемые «условия сопряжения» - условия равенства температур и тепловых потоков.

Проблема заключается в том, что аппроксимация экспериментальных зависимостей коэффициента теплоотдачи от температурного напора не могут быть записаны универсальными параметрическими соотношениями для всех теплоносителей с учётом режимных параметров протекания процессов для различных случаев геометрии поверхности ребра. Это требует проведения для каждого теплоносителя соответствующих экспериментальных исследований для определения постоянных входящих в расчетные соотношения, и затем интегрирования полученных дифференциальных уравнений. Таким образом, для каждого теплоносителя приходится проводить экспериментальные исследования при соответствующих режимных параметрах и рассчитать индивидуальную задачу с использованием полученных данных.

Как известно, «коэффициент» теплопередачи через границу твердое тело - жидкость является неоднозначной функцией: температурного напора, режимных параметров процесса теплопереноса, теплофизических свойств теплоносителя, материала поверхности теплоподвода и ее структуры. Но, до сих пор, для «коэффициента» теплопередачи от поверхности теплоподвода к контактирующему теплоносителю не получено аналитическое выражение, для апроксимации известных экспериментальных данных в широком интервале температурных напоров и давлений.

Естественно, что получить единое аналитическое соотношение для интегрального процесса, содержащего несколько (девять) механизмов теплопереноса на основе системы из четырех - пяти дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями невозможно, так как эта задача является не замкнутой. Причем в этом процессе

одни механизмы теплопереноса со своими дифференциальными уравнениями и соответствующими им начальными и граничными условиями вытесняются с поверхности теплоотдачи другими - при изменении режимных параметров. Поэтому все известные соотношения для «коэффициента» теплопередачи имеют ограниченные области применения и являются полуэмпирическими [5, -9].

И, наконец, само понятие «коэффициента» взято в кавычки, так как все величины, выступающие в роли коэффициентов во всех законах природы, если не постоянные, то должны изменяться в узком интервале значений при любых вариациях других параметров, входящих в аналитические выражения этих законов. В большом объеме «коэффициент» теплопередачи α от поверхности теплоподвода к теплоносителю в интервале температурных напоров $\Delta\vartheta$ 10-1 ÷ 103 изменяется в промежутке от 102 до 106 Вт / м2 К, поэтому известные аналитические выражения для описания этого процесса являются справедливыми в узких интервалах изменения режимных параметров (давления, температуры, значений $\Delta\vartheta$ или тепловых потоков).

Это обусловлено тем, что явление кипения жидкости представляет собой сложный процесс, в котором одновременно действуют несколько механизмов теплопереноса и для его аналитического описания необходимо рассматривать динамику всех процессов, с учетом факторов их взаимного влияния. Такие попытки били, предприняты многими исследователями при разработке теории теплопереноса путем учета двух или трех механизмов, которым присваивались вклады остальных, без учета фактора их взаимного влияния [5,-12]. В частности, Д.А. Лабунцовым предложена модель для описания процесса теплопереноса при кипении жидкости, путем сведения вкладов всех механизмов к сумме двух тепловых потоков: потока, обусловленного кондуктивной передачей теплоты основной массе, через микрослой, и потока, вызванного испарением теплоносителя в паровой пузырь[13]:

$$q = 10^{-3}\,\lambda^2\,\Delta T^3 / \sigma\, T_{\text{н}}\,\nu + 5\lambda\, r\rho_{\text{п}}\Delta T^2 / \sigma T_{\text{н}}\ .$$

Влияние числа действующих центров парообразования на интенсивность процесса теплопереноса учитывается и в модели Г.Н. Кружилина, описываемой критериальным уравнением [14]:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}082\,\mathrm{Pr}^{-0{,}45}\,\mathrm{Kq}^{0{,}7}\,\mathrm{Ku}^{1/3},$$

где Kq критерий, определяемый числом действующих центров парообразования, а Ku критерий, определяемый частотой отрыва пузырей.

В.И. Толубинский, также, предложил модель, для описания процессов теплопереноса при кипении теплоносителя, учитывающая число действующих центров парообразования, в виде критериального уравнения [9]:

$$\mathrm{Nu} = 54\,\mathrm{Pr}^{-0{,}3}\,\mathrm{K}^{0{,}6},$$

здесь K - критерий кипения. Известны и другие соотношения для описания этого процесса теплопереноса предложенные как российскими, так и зарубежными исследователями [12]. Однако, все известные критериальные уравнения имеют ограниченные области применения, из–за исключения: других составляющих механизмов теплопереноса, и факторов их взаимовлияния в сложном процессе кипения теплоносителя. Эти и множество других, известных, уравнений, мало пригодны для надежного прогнозирования режимов работы теплообменной аппаратуры в нештатных режимах, которые возникают при непредвиденных обстоятельствах.

В [16] предложена модель для описания процесса теплопереноса во всем интервале тепловых нагрузок (для кривой кипения – кривой Нукиями) включающая практически все составляющие механизмы, участвующие в теплопереносе при кипении теплоносителя. Эта модель основана на следующей теории роста пузыря, на поверхности теплоподвода [17].

Несмотря на многочисленные исследования модели роста парового пузыря при кипении жидкости в гетерогенной системе, до настоящего времени нет единого подхода к механизму его энергопитания. Некоторые исследователи исходят из предположения, что энергоподвод в пузырь, растущий на поверхности теплоподвода осуществляется через его купол кондуктивным путем [18, 19] , другие предполагают, что тепло подводится преимущественно через межфазную поверхность у периферии основания пузыря [20], третьи учитывают оба механизма [21, 22], причем уравнения роста пузыря содержат неопределенные константы, значения которых уточняются эмпирически.

Модели, описанные в работах [18, 19], получены исходя из рассмотрения картины роста пузыря в гомогенной системе, а попытки некоторых исследователей применить их для описания процесса роста пузыря на поверхности теплоподвода не дают обнадеживающих результатов и приводят к искажению кинетики явления.

Многочисленные данные, приведенные в работах [18-30], свидетельствуют о том, что при росте пузыря на поверхности теплоподвода под ним образуются микропленка жидкости и сухое пятно. В связи с этим, механизм энергопитания пузыря, изложенный в работе [20], следует считать наиболее близким к реальной картине явления. Однако в отмеченной модели предполагается, что пленка, через которую происходит энергопитание, образуется только у периферии основания пузыря, причем средняя толщина ее (~10-4 м) гораздо больше толщины реальной микропленки. Внутренний радиус микрослоя в [20] соответствует внешнему радиусу микропленки.

Кроме того, большинство уравнений роста парового пузыря получены путем учета или только механических сил, или только тепловых процессов либо основаны на гипотетических механизмах теплоподвода без соответствующего обоснования. Вследствие этого все имеющиеся на сегодня уравнения описывают поведение пузыря только в ограниченных интервалах изменения термодинамических параметров системы.

В предлагаемой работе рассматривается механизм энергопитания пузыря, растущего на поверхности теплоподвода. наиболее адекватно соответствующий действительной картине явлений.

Тепломассообмен при кипении жидкости на поверхности нагрева определяется механизмами теплоподвода к единичному пузырю .Как известно [23], процесс кипения в гетерогенной системе начинается после формирования пристенного перегретого слоя жидкости достаточной толщины d. За счет энергии перегретого слоя на поверхности теплоподвода возникают зародыши критического размера, в основании которых образуется микропленка жидкости. С ростом радиуса пузыря межфазная поверхность его купола вытесняет верхнюю прослойку пристенного перегретого слоя жидкости (рис. 1). Это приводит к «оголению» перегретой микропленки остающейся на поверхности теплоподвода и она оказывается в глубоком метастабильном состоянии из-за контакта с паром в пузыре и интенсивно испаряется. Поскольку энтальпия микропленки недостаточна для восстановления термодинамического равновесия, под пузырем

образуется сухое пятно. Кроме того, слой жидкости толщиной δ', примыкающий к куполу пузырька, охлаждается до температуры пара за счет испарения в течение времени возникновения критического зародыша, причем 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 пузыря, меньше, чем на микропленки.

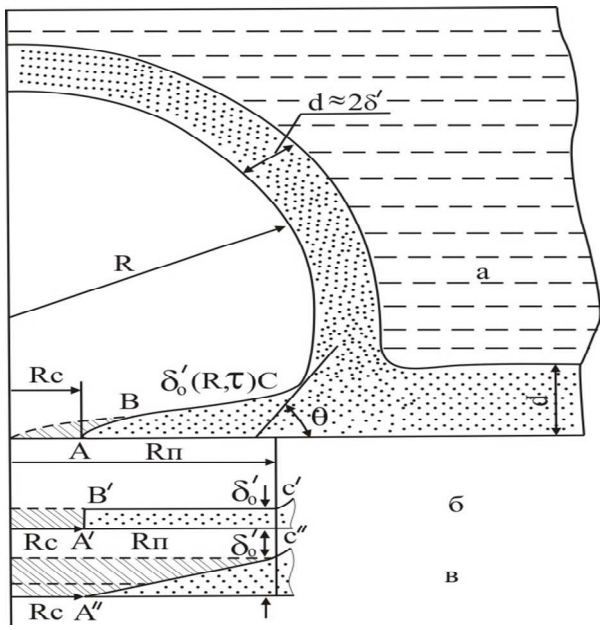


Рис.1. Схематический разрез пузыря. Большая концентрация точек соответствует большей температуре: а - действительная форма микропленки; б, упрощенная модель.

Как показано на рис.1, а ,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, постепенно выпаривающаяся от центра основания пузырька; $A''C''$ (рис 1, в) - толщина оставшейся части микропленки линейно растет к периферии основания пузырька. Выпаривающаяся часть микропленки заштрихована.

Учитывая изложенное, уравнения баланса массы и энергии пара в пузыре и микропленке запишем в виде:

$$\rho' dV = \rho[2\pi R_c \delta dR_c + \pi(R_n^2 - R_c^2)d\delta], \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \delta} S_n = \rho' r' \frac{dV}{d\tau}. \quad (2)$$

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:

$$S_n = \pi(R_n^2 - R_c^2) \quad (3)$$

является мгновенной площадью микропленки .

В уравнениях (1) и (2) объем пузыря определяется формулой:

$$V = \frac{1}{4}\pi R^3 \psi(\theta), \quad (4)$$

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:

$R = r_0$, $\delta = \delta_0'$, $T = T_{н,}$ $R_c = 0$ при $\tau = 0$,

$R = R_0$, $\delta = 0$, $T = T_c$, $R_c = R_n$ при $\tau = \tau_0$.

В первой модели толщина микропленки постоянна. Тогда в уравнении (1) отбрасываем второй член справа. При решении уравнений (1) и (2) мгновенную площадь микропленки и радиуса сухого пятна получим выражения:

$$\delta_0' = (Ja\rho'/2\rho)^{1/2}\sqrt{a\tau}, \quad (5)$$

$$R_c = \left(\frac{2\rho'}{8Ja\rho}\right)^{1/4}\sqrt{\psi(\theta)}\left[\varphi^3(Ja)\alpha\tau - r_0^3 \ \Big/\sqrt{\alpha\tau}\right]^{1/2} \quad (6)$$

Здесь δ_0' и R_c выражены в функции времени. Их зависимость от радиуса пузыря можно записать в виде:

$$\delta_0' = (Ja\rho'/2\rho)^{1/2}\sqrt{a\tau}, \quad (5а)$$

$$R_c = \left(\frac{2\rho'}{8Ja\rho}\right)^{1/4}\sqrt{\psi(\theta)}\left[\varphi^3(Ja)\alpha\tau - r_0^3 \ \Big/\sqrt{\alpha\tau}\right]^{1/2} \quad (6а)$$

В формуле (6а) отброшена малая поправка $r_0^3 \ \Big/\sqrt{a\tau}$, здесь радиус пузыря принят равным: [24]

$$R = \varphi(Ja)\sqrt{a\tau}, \quad (7)$$

где $\varphi(Ja) = 0.3Ja + \sqrt{0.09Ja^2 + 12Ja}$.

Во втором случае имеем:

$$R_c = \left[\frac{\psi(\theta)\rho'}{\delta_0'\rho}\left(R^3 - r_0^3\right) - 3R_n^2 \ \Big/4\right]^{1/2} - \frac{R_n}{2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) получено исходя из предположения, что за время τ_0 происходит выпаривание микропленки в виде усеченного конуса жидкости (рис. 1, в) с радиусом большого основания, равным R_n, и меньшего - R_c. Толщина микропленки в точке r:

$\delta_0(r) = \delta_0'(R_n - r)/(R_n - R_c)$.

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 (5а), и ,наконец ,штрихпунктирная линия описывает усредненные по площади экспериментальные значения [26]. Сплошными линиями показаны мгновенные профили микропленки в определенные моменты времени τ. Как видно из рисунка, формула (5а) удовлетворительно описывает экспериментальные данные для средней толщины микропленки. Проверка соответствия формулы (5а) 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'. При точных расчетах величин R_c и δ_0' в интервале плотностей тепловых потоков близких к критическим, необходимо учесть и часть тепла, 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].

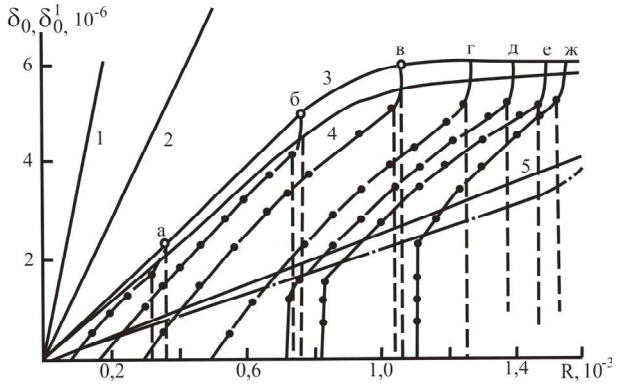


Рис.2. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений толщины микропленки под растущим пузырем - 1 :расчет по формуле [25], 2 – [27], 3-[26], 4 – эксперимент [26], 5 – формула (5а). Экспериментальные значения мгновенных профилей микропленки жидкости при различных значениях времени роста пузыря 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.

Доводом в пользу описанного механизма теплоподвода в растущий пузырь является тот факт, что толщина δ' охлажденного слоя жидкости, примыкающего к куполу пузыря, гораздо больше толщины микропленки δ_0'. Для проверки этого утверждения 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 еще большие значения d. Величину δ' принимаем приближенно равной половине толщины пристенного теплового слоя, примыкающего к куполу пузырька.

В таблице приведены значения толщины микропленки и охлажденного слоя, примыкающего к межфазной поверхности купола пузырька при кипении воды, толуола и метилового спирта, в нормальных условиях. Отрывной радиус пузыря определяется по формуле: [36]

$$R_0 = k\left[\sigma\left(C_\rho T_H/\rho' r'\right)^{5/2} \ /g\left(\rho-\rho'\right)\right]^{1/2}$$

Расчетные параметры парового пузыря, 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.

Параметры	Вода		Толуол		Метиловый спирт	
$\Delta T, K$	1	5	1	5	1	5
Ja	3,10	15,00	1,35	6,74	1,59	7,97
$\varphi(Ja)$	6,96	18,65	4,45	11,24	4,88	12,46
$l_0, мм$	1,21		0,883		0,963	
$\delta_0', мкм$	5,31	4,43	9,95	8,82	7,13	6,25
$\delta', мкм$	81	53	20	12	98	57

На рис. 3. приведены результаты расчета радиуса сухого пятна при кипении дихлорметана по формулам (6а), (8) и по соотношению Двайера [12]:

$$R_c = R \Big/ \sqrt{1 + \left(\delta_0' / RS_{1/2}\right)^2},$$

где

$$S_{1/2} = \rho' / \rho \left[1 + \left(3\lambda C_\rho / \lambda_\omega C_\omega \rho_\omega\right)^{1/2}\right].$$

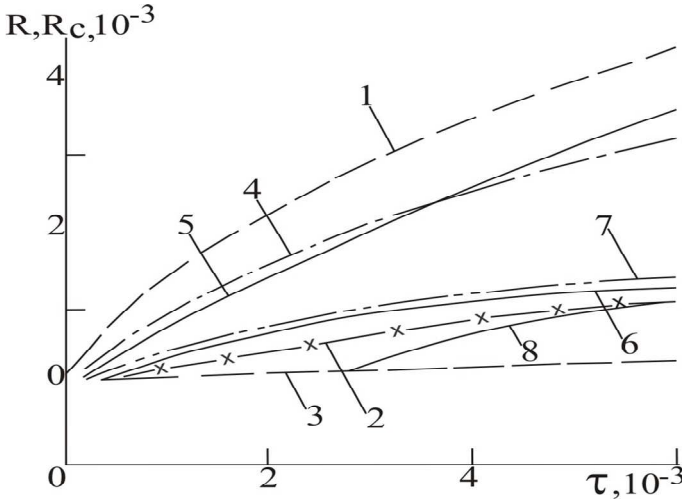


Рис.3. Расчетные зависимости радиуса пузыря и сухого пятна от времени для дихлорметана: 1- радиус пузыря; 2- экспериментальные значения радиуса сухого пятна [9]; 3-соотношение Двайера с толщиной микропленки по [8]; 4 – формула (6а); 5 – формула (6а) с $\tau_0 = 6$ мс; 6-соотношение Двайера с δ_0' по (5а); 7 – формула (8); 8 - формула (8) с δ_0' мс τ, c; R, R_c, $м$.

Для радиуса пузыря (кривая 1) использована формула из работы [9]. Кривая 2 соответствует экспериментальному профилю сухого пятна. Подстановка в формулу Двайера [20] значения толщины микрослоя по формуле Купера - Ллойда [8] .дает заниженные значения радиуса сухого пятна (кривая 3). Формула (6а) 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 (5а) (кривая 6) дает результаты, очень близкие к (8) (кривая 7).

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. Этим же объясняются и результаты исследований Шарпа [12], который утверждал, что сухое пятно появляется через некоторое время после зарождения пузыря - после выпаривания части микропленки у центра парообразования .Для уточнения модели в этой области

необходимо точное знание формы $\delta_0(\tau, r)$.

Таким образом, можно утверждать, что механизмом теплоподвода к пузырю через межфазную поверхность его купола в гетерогенной системе можно пренебречь. Это позволяет получить более корректное выражение и для радиуса пузыря при совместном решении соответствующей системы дифференциальных уравнений.

Как видно из сопоставительного анализа полученных расчетных формул (6), (8) с известными экспериментальными данными и формулами других авторов , получено хорошее соответствие описанного механизма энергопитания пузыря в гетерогенной системе реальной картины явления. Расчетные соотношения для толщины микропленки и радиуса сухого пятна не содержат дополнительных полуэмпирических констант и удовлетворительно описывают экспериментальные данные [26]. Следовательно, описанная модель роста пузыря является наиболее близкой к реальной картине процесса.

Эта модель роста пузыря была заложена в основу при разработке теории процесса теплопереноса при кипении жидкостей [16].

В исходном состоянии при температуре теплоносителя ниже температуры кипения на всей поверхности действует механизм однофазной свободной конвекции и для описания процесса теплопереноса используется известная система уравнений [7]. При температуре поверхности

Критериальное уравнение, полученное исходя из этой модели подобно уравнению математической теории разбиения единицы [9 теория разбиения единицы], которое в формализованном виде 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:

$$Fo_1 = \lambda'\tau\, r_c / c'\rho' R^2 R_b \psi(\theta), \; Fo_2 = \lambda\tau r_c / c\rho R^2 R_b \psi(\theta) , \; Fo_3 = \lambda\tau / c\rho\overline{\delta'} R_b ,$$

$$Fo_5 = \lambda\tau_0 / c\rho\bar{\delta}' R_b . \qquad (12)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что процессы тепломассообмена при пузырьковом кипении жидкости определяются критериями *Gr Pr* и *Ja* и критериями Фурье Fo_i. Критерии Fo_i – соответственно безразмерное время; перегрева пара в пузыре, роста пузыря, перегрева жидкости у периферии его основания и формирования пристенного перегретого слоя на безразмерном участке отрыва пузыря. Уравнение (10) также может быть представлено в виде функции, $\alpha = f(p, \vartheta, T_ж, b, c, c', \lambda, \lambda', \rho, \rho', ...)$. В этой функции параметры без штрихов и со штрихами относятся, соответственно, к жидкой и паровой фазе теплоносителя.

Таким образом, безразмерные уравнения (9 и 10) получены на основе разработанной физической модели учитывающей все реальные механизмы теплопереноса, подтвержденные экспериментальными данными, и одновременно действующими на поверхности при кипении теплоносителя, которые содержат все параметры, определяющие интенсивность процесса теплопереноса во всем интервале тепловых нагрузок или температурных напоров. Кроме того, в (9 и 10) также учитывается взаимное влияние механизмов теплопереноса друг на друга, путем введения, так называемого, параметра влияния пузыря b – масштаба гидродинамического влияния пузыря b. Из (9 и 10) вытекают известные критериальные уравнения как частные случаи при наложении соответствующих ограничений. К большому сожалению, применение этого аналитического уравнения для практических расчетов ограничивается теплоносителями, для которых известны зависимости их теплофизических параметров от температуры T и давления p в широком интервале значений, как для жидкой, так и для паровой фазы.

Как известно, процесс кипения теплоносителя начинает переходить в режим кризиса, когда частота отрыва пузырей возрастает, и в пределе на центрах парообразования возникают непрерывные грибки пара, т. е. время ожидания пузырей стремиться нулю $\tau_0 \to 0$. Из этого условия получаем первый критерий кризиса кипения. Одновременно с этим расстояние между центрами парообразования уменьшается с ростом плотности теплового потока за счет увеличения их числа на единице поверхности, следовательно, часть суммарной безразмерной поверхности ξ_8, свободная от пузырей и занятая конвективным механизмом теплопереноса тоже обращается нулю при наступлении режима кризиса кипения. Этому условию соответствует второй и основной критерий кризиса кипения, вытекающий из уравнения (10):

$$\xi_8 = 1 - \pi(R + \bar{\delta}')^2 b^2 N = 0 . \qquad (13)$$

При этом параметр влияния пузыря b стремиться к единице, что свидетельствует о полном заселении поверхности теплоподвода пузырьками отрывных размеров. Вместе с этим, следует отметить, что с ростом плотности теплового потока отрывной диаметр пузырьков пара и площадь их влияния уменьшается и при кризисе кипения параметр влияния стремиться к единице. Из соотношения (13) в качестве критерия кризиса кипения получаем значение плотности потока пузырьков $N_{кр}$ соответствующее этому режиму

$$N_{кр} = 1/\pi b^2 (R + \bar{\delta}')^2 \qquad (14)$$

Таким образом, из теории изложенной в [2], кризис кипения наступает при выполнении следующих условий;

$$\tau_0 \to 0,\ \xi_8 = 1 - \pi(R+\bar{\delta}')^2 b^2 N = 0,\ b = 1,\ N_{\text{кр}} = 1/\pi b^2 (R+\bar{\delta}')^2. \qquad (15)$$

Некоторые из этих критериев в отдельности с соответствующими эмпирическими коэффициентами были гипотетически предложены различными исследователями. Авторы отдельно взятых критериев кризиса кипения склонны считать, что их критерий является наиболее удачным и соответствующим реальной картине процесса. Однако 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 [37]. 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 $1 \le \mathrm{b}$.

Соотношение С.С. Кутателадзе является более корректным, чем - Розенау и Гриффитса, так как оно более достоверно описывает все известные экспериментальные данные. 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 $1 \le \mathrm{b}_0$:

$$\xi_4 = \pi(R+\bar{\delta})^2 (b^2 - 1) N = b_0^2. \qquad (18)$$

Тогда для масштаба гидродинамического влияния пузыря получим соотношение:

$$b = \sqrt{\frac{b_0^2}{\pi(R+\bar{\delta}')^2 N} + 1}. \qquad (19)$$

Из формулы (19) следует, что масштаб гидродинамического влияния пузыря является функцией зависящей от плотности потока пузырей и, следовательно, от плотности теплового потока, давления и температуры насыщения. С ростом плотности теплового потока параметр влияния стремиться к единице, т.о. при кризисе кипения плотность потока пузырьков становиться настолько большой, что пузырьки плотно упаковывают всю поверхность теплоподвода, а отрывной их диаметр при этом достигает минимальной величины. Как следует из результатов экспериментальных исследований [12, 21, 38, 39] масштаб гидродинамического влияния пузыря является переменной величиной зависящей от технологических режимов протекания процесса.

При выполнении условий кризиса кипения (18) для соответствующих параметров в уравнении (2) получим следующее критериальное уравнение

$$K_{\text{кр}} = Sr_1' \xi_1' + \xi_2' + Sr_3\ \xi_3' \rho/\rho'. \qquad (20)$$

Здесь $K_{кр} = q_{кр} / \rho' r\ f\ R, \quad Sr_1' = c'\Delta T_1' / r$,

$Sr_3 = C\Delta T_3 / r, \quad \xi_1' = \xi_2' = \pi R^2 \psi^2(\theta) N / 3, \ \xi_3' = \pi\delta[(R+\bar{\delta})^2 - r_c^2]N / R$

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]:

$$K_{кр} = 7\sqrt{Fo\,\rho/\rho'} \text{ или } \quad q_{кр} = 7\sqrt{af\rho\rho'} \qquad (21)$$

Расчетные значения $K_{кр}$, полученные по уравнению (21) качественно совпадают с данными уравнения (21) в широком интервале значений давления и чисел Фурье, а количественно экспериментальные данные работы [9] с меньшей погрешностью описываются уравнением (20).

Таким образом, уравнение (10), полученное на основе описанной модели роста пузыря, качественно и количественно наилучшим образом описывает известные экспериментальные данные в широком интервале изменения: тепловых потоков или температурных напоров и давления. В частности расчеты по уравнению (9) сравнивались с экспериментальными данными по зависимости коэффициента теплопереноса при кипении воды на горизонтальной поверхности теплоподвода в широком интервале изменения температурного напора при атмосферном давлении и температуре насыщения (смотри рис. 4). Для этого уравнение (10) было преобразовано в следующий вид: $\alpha = f(\Delta T)$.

Функция $\alpha = f(\Delta T)$, состоит из девяти слагаемых, в которые входят все зависимости теплофизических параметров теплоносителя в жидком и паровом фазах, параметры поверхности теплоподвода, ее краевой угол смачиваемости и т. д. от температуры Она получена на основе физической модели роста единичного пузыря изложенной выше с учетом. Как следует из рисунка 4, величина коэффициента теплоотдачи, в широком интервале значений температурных напоров, изменяется от 130 до 8 10^5 $Вт/м^2К$.

В работе приведены два способа расчета температурного напора вдоль неизотермического ребра постоянного поперечного сечения и численный анализ задачи оптимизации продольного сечения круглого ребра, приведен сопоставительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в [1].

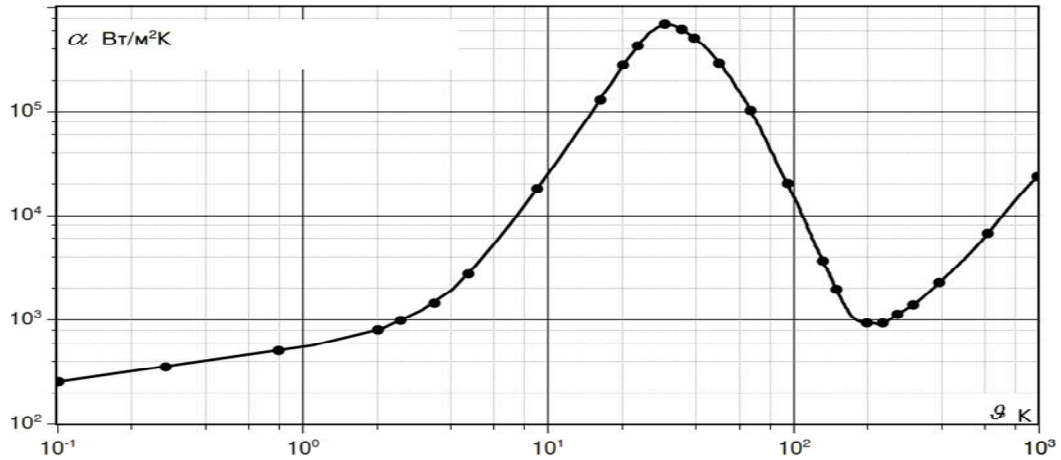


Рис.4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора для воды (расчет по (10)).

Литература:

1. *Ройзен Л.И., Дулькин И.Н.* Тепловой расчет оребренных поверхностей. Под ред. В. Г. Фастовского. М.:, Энергия, 1977, 256 с.
2. *Керн Д.И, Краус А.Р.* Развитые поверхности теплообмена. Пер. с англ. М.:, Энергия. 1977., 464 с.
3. *Haley K.W., Westwater J.W.* Proc. Third Intern. Heat Transfer Conf., Chicago, 1966. 3. p.245.
4. *Дулькин И.Н., Ракушина Н.И., Ройзен Л.И., Фастовский. В.Г.* Теплообмен при кипении воды и фреона-113 на неизотермической поверхности // ИФЖ.1978. Т19, № 4. С. 637 –645.
5. Теория теплопереноса. Под ред. Леонтьева А.И. М.: Высшая школа, 1979. 495с.
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, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. – М.: Издательство 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.: Издательство «МИР», 1969. – 344 с.
11. Теплопередача при низких температурах. Под ред. Фроста У., Анфимова Н.А. М.: Издательство «МИР», 1977. –392 с.
12. *Двайер О.* Теплообмен при кипении жидких металлов. Под ред. Субботина В.И. М.: Издательство «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. Пер. с англ. Под ред. Лыкова А.В. 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. *Плезет 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., Хесин М.И.* Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. Материалы Всесоюз. 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. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979.
38. *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.
39. *Чеканов В.В.* Взаимодействие центров при пузырьковом кипении // Теплофизика высоких температур. 1977. Т. 15, № 1, С 121-128.

ЛАЗУРНОМУ БЕРЕГУ – ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛО!

Алишаев М.Г.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: alishaev@rambler.ru

Перспективные планы развития г. Махачкалы предусматривают строительство города-спутника «Лазурный берег» в южной части, от Редукторного посёлка и далее вдоль дороги на г. Каспийск. В этом районе на глубине 2000-2500 метров залегают песчаные пачки с глинистыми перемычками общей толщиной более 200 м. Толщины песчаных слоёв порядка 30 м, пористость около 20%. Пласты насыщены почти пресной термальной водой. Замеренные устьевые температуры составили 88°С с глубин 2000-2050 м и 92°С с глубины 2400 м. Геотермальный градиент в среднем 0,032°С/м. Запасы термальной воды и тепловой энергии песчаных пачек вполне достаточны для теплоснабжения и горячего водоснабжения района на 100 лет и более. В этой связи автором совместно с НПЦ «Недра» (г. Ярославль) были проведены некоторые расчеты, касающиеся возможного извлечения тепловой мощности двух нижних песчаных слоев созданием геоциркуляционной системы из двух нагнетательных и одной добывающей скважины (система "2+1").

Тепловая мощность ГЦС. Исходные теплофизические параметры были приняты следующие: пластовая температура 80°С; температура нагнетаемой воды 15°С; температура нейтрального слоя 15°С; проницаемость песчаного пласта 10^{-12} м^2; теплопроводность пласта 2,5 Вт/(м·°С); температуропроводность песчаника 25 м^2/год.

Для ГЦС основные её характеристики были предложены НПЦ «Недра» по соображениям экономии строительства: глубина бурения скважин до 2200 м; добывающая скважина вертикальная и длина ствола 2200 м; внутренний диаметр добывающей скважины 220 мм; длина ствола нагнетательной скважины 2300 м и её профиль частично наклонный; внутренний диаметр нагнетательной скважины 150 мм; расстояние между забоями скважин 600 м.

Вариант расчёта выбирался с закачкой $Q_н$ = 50 л/с = 0,05 м^3/с. Тогда добыча в системе "2+1" составит $Q_0 = 2Q_н$ = 0,1 м^3/с. Извлекаемая **тепловая мощность** составит на начало эксплуатации

$$W = c_в Q_0 \cdot (T_{пл} - T_в) = 4{,}2 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 \cdot (80 - 15) = 27{,}3\ МВт$$

Часть тепловой энергетической мощности будет неизбежно потеряна на обеспечение циркуляции по нагнетательным скважинам и фильтрации по пласту. Подсчитаем теряемые мощности по нагнетательным скважинам, добывающей скважине и фильтрацию, в отдельности.

Потери мощности по нагнетательной скважине находятся по формуле Дарси-Вейсбаха.

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ принимался равным 0,03. Согласно формулам

$$\Delta W_н = \Delta p_н \cdot Q_н, \quad \Delta p_н = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho_н \left(\frac{Q_н}{\pi R_н^2} \right)^2 \frac{L_н}{2 R_н}$$

производились расчеты для значений

$$R_н = 0{,}075\ м; \quad L_н = 2300\ м; \quad Q_н = 0{,}05\ м^3/с, \quad \rho_н = 1000 \quad кг/м^3.$$

Получаем $\Delta p_н$=1,84 МПа; $\Delta W_н$=0,092 МВт.

Потери мощности по добывающей скважине находим также согласно формулам Дарси-Вейсбаха с тем же коэффициентом гидравлического сопротивления

$$\Delta W_0 = \Delta p_0 \cdot Q_0, \quad \Delta p_0 = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho_0 \left(\frac{Q_0}{\pi R_0^2} \right)^2 \frac{L_0}{2R_0}$$

Вычисления производим для значений

$R_0 = 0{,}11\ м; \quad L_0 = 2200\ м; \quad Q_0 = 0{,}1\ м^3/с, \quad \rho_0 = 972 \quad кг/м^3.$ Получаем Δp_0= 1,01 МПа; ΔW_0=0,101 МВт.

Потери давления на фильтрацию по пласту от забоя нагнетательной до забоя добывающей скважины находим согласно формуле автора

$$\Delta p = p_н - p_0 = \frac{3\mu Q_н}{2\pi k h} \ln \frac{l}{\sqrt[3]{2R_н R_0^2}}$$

Вычисления производим для значений параметров

$R_í = 0{,}075\ ì; \quad R_0 = 0{,}11\ ì; \ l = 600\ ì;$

$\mu = 0{,}355 \cdot 10^{-3}\ Ïà \cdot ñ; \quad Q_í = 0{,}05\ ì^3/ñ, \quad k = 10^{-12}\ ì^2.$

при мощности пласта h=30 м. Получаем Δp= 2,4 МПа; $\Delta W_ф = \Delta p \cdot Q_0$= 0,24 МВт.

Суммарные потери мощности на циркуляцию воды по системе "2+1" составят

$$\Delta W_\Sigma = 2\Delta W_н + \Delta W_0 + \Delta W_ф = 0{,}525\ МВт$$

Потери мощности связаны с использованием электрической энергии. В существующих технологиях (органический цикл Ренкина) получения электрической энергии из тепловой энергии коэффициент полезного действия достаточно мал и составляет около 0,1. Это значит, что в тепловом эквиваленте потери составят около 5,25 МВт. За полезную тепловую мощность можно принять 27,3-5,25= 22 МВт при использовании одного песчаного пласта толщиной 30 м. Если подключить два слоя и удвоить циркуляцию воды, тепловая мощность системы станет почти в 2 раза больше. Удвоится добываемая тепловая мощность, но потери по стволу скважин станут в 4 раза больше. Потери давлений по пласту сохранятся, и потери мощности по пласту удвоятся.

Расчётная схема долговечности работы ГЦС. Долговечность работы определяется тем, насколько быстро прорвется закачиваемая вода в добычную скважину и потянет за собой фронт охлаждения в добывающую скважину, после которого начнется охлаждение добываемой жидкости и снижение тепловой мощности. Руководствуясь общепринятыми в теории фильтрации методами, можно найти время прихода закачиваемой воды в добычную скважину

$$t_{пр} = \frac{\pi m l^2 h}{4 Q_н}$$

Для принятых выше значений параметров (m=0,20; l=600 м; h=30 м; $Q_н$=0,05 м^3/с) получим по этой формуле $t_{пр}$=393 сутки. Более одного года добывающая скважина будет поднимать пластовую воду, без примеси закачиваемой воды. Только после этого доля закачиваемой воды очень медленно будет расти в добываемой жидкости.

Однако не следует думать, что с прорывом закачиваемых вод температура добываемой смеси пластовой и закачанной воды начнет снижаться. Дело в том, что закачанная в горячий пласт вода почти мгновенно принимает пластовую температуру, из-за чего фронт температур значительно отстает от фронта вытеснения пластовой воды. Отставание температурного фронта

определяется пористостью и объёмными теплоёмкостями воды и породы. Время прорыва температурного фронта в добычную скважину будет в $c_в/(m \cdot c_п)$ раз больше. Его можно считать по формуле

$$t_{тем} = \frac{c_{пл}}{m c_в} \cdot t_{пр}$$

Принимаем значения параметров m=0,20; $c_в$=4,2 МДж/(м^3·°С); $c_{пл}$=2,5 МДж/(м^3·°С). Тогда получим время начала снижения температуры добываемой продукции $t_{тем}$=3 лет.

И по истечению 3-х лет снижение температуры добываемой воды будет малозаметным. Более детальный расчёт показывает, что столько же времени снижение температур будет оставаться в пределах погрешности измерений. А за десяток лет закачиваемая вода уже будет прогреваться от притока тепла с кровли и подошвы, так что температурный фронт будет иметь не температуру воды на забое нагнетательной скважины, а гораздо выше. Распространение температурных фронтов от кровли и подошвы определяется расстоянием $\Delta Z_{тем} = 2\sqrt{\chi t}$. При температуропроводности χ=25м^2/год и за время 4 года температурный фронт от кровли и подошвы пройдут расстояние 20 м. То есть вся толщина пласта окажется охваченной влиянием тепла кровли и подошвы. Таким образом, для более точного решения температурной задачи необходимо учитывать ещё влияние кровли и подошвы, которыми выше мы пренебрегли. Очень даже может быть, что и через десяток лет снижение температуры будет малозаметным из-за притока тепла от кровли и подошвы. Приведённый расчет показывает, что стабильная работа ГЦС будет обеспечена на 30 лет и более. И это при включении лишь одного песчаного слоя в 30 м. Можно обеспечить работу и на следующие 30 лет подключением нового песчаного слоя толщиной 30 м. Даже тот же песчаный слой может дать примерно еще такое же количество тепловой энергии, если пробурить новые нагнетательные скважины, образующие крест с существующими. Конечно, перестрелять верхний слой и изолировать отработанный пласт цементными мостами будет проще.

Профиль температуры по стволу вертикальной добывающей скважины. Приведём формулу для температурного профиля воды в добывающей скважине. Пусть ось Oz направлена вертикально вверх от забоя вдоль оси добывающей скважины. Температуру горной породы $T_г$ (z) можно выразить в виде разности

$$T_г(z) = T_{пл} - \Gamma z .$$

Здесь $T_{пл}$ - пластовая температура, Г – геотермический градиент. Для температуры жидкости в добывающей скважине можно получить

$$T_ж = T_{пл} - \Gamma z + \frac{\Gamma}{\alpha_0}\left(1 - e^{-\alpha_0 z}\right), \quad \alpha_0 = \frac{2\pi\lambda}{2c_в Q_0 \ln\dfrac{1{,}56\sqrt{\chi t}}{R_0}}$$

Оценим параметр α_0 для разных времен в годах: месяц, полгода, год, 2, 5, 10 и 20 лет. Получились значения 1,24; 0,955; 0,878; 0,812; 0,738; 0,691 и 0,649 с множителем 10^{-5}. Эти числа малые. Малы и значения $\alpha_0 z$ для всех z<2000 м. Аргумент экспоненты $\alpha_0 z$ имеет значения порядка сотых долей. Преобразуем формулу для температуры жидкости с учетом малости аргумента экспоненты и пренебрегая малыми членами высших порядков. Тогда будем иметь

$$T_ж = T_{пл} - \frac{\Gamma}{2}\alpha_0 z^2$$

Температурные потери от забоя до устья составляют

$$T_{пл} - T_y = \frac{\Gamma}{2}\alpha_0 L_0^{\,2} = 60000\alpha_0$$

Используя вычисленные значения параметра α_0, получаем ориентировочные потери температуры от забоя до устья: через месяц 0,74°С; через полгода – 0,57°С; через год – 0,53°С, и т.д., через 20 лет – 0,39°С. Как видно из этих расчетов, потери составляют менее 1°С, что объясняется высокими значениями дебита. При высоких дебитах потерями температуры по стволу добычной термальной скважины можно пренебрегать.

Профиль температуры по стволу наклонной нагнетательной скважины. Ось *Oz* направляем вертикально вниз. Справедлива формула

$$T_{ж}(z) = \left(T_{в} - T_0 + \frac{\Gamma\cos\theta}{\alpha_{н}}\right)e^{-\frac{\alpha_{н}z}{\cos\theta}} + \left(T_0 + \Gamma z\right) - \frac{\Gamma\cos\theta}{\alpha_{н}}$$

С учётом малости $\alpha_н$ и, разлагая экспоненциальную функцию в ряд и пренебрегая малыми высших порядков, получаем

$$T_{ж}(z) = T_{в} + \frac{\Gamma}{2\cos\theta}\alpha_{н}z^2 \qquad \alpha_{н} = \frac{2\pi\lambda}{c_{в}Q_{н}\ln\dfrac{1{,}56\sqrt{\chi t}}{R_{н}}}$$

Нагрев вдоль ствола нагнетательной скважины до забоя найдётся как разность

$$T_{заб} - T_{в} = \frac{\Gamma}{2\cos\theta}\alpha_{н}L_0^{\,2}$$

При значениях параметров θ=30°; Г=0,03; L_0=2200 м; $\alpha_н$= $2\cdot10^{-5}$(по истечению полугода), получаем, что приращение температуры составит около 1,68°С. Оно мало, и малость приращения температуры объясняется почти вертикальным расположением ствола и относительно большим дебитом.

Профиль температуры по горизонтальному участку нагнетательной скважины. Ось *Ox* направляем горизонтально. Обозначим h_0 глубину горизонтального участка, T_1 – температуру на входе в горизонтальный участок. Для температуры воды по стволу справедлива формула

$$T_{ж}(x) = (T_0 + \Gamma h_0) - \left(T_0 + \Gamma h_0 - T_1\right)e^{-\alpha x}$$

Прогревание температуры жидкости почти до уровня температуры горной породы на данной глубине произойдет, если длина горизонтального участка l_0 такова, что αl_0 >2. Для обеспечения прогрева коды до температуры пород длину горизонтального участка надо брать более l_0=2/α. При больших темпах закачек, порядка 0,05 $м^3$/с, значения α имеет порядок 10^{-5}, следовательно для выравнивания температуры жидкости с горной породой требуются значительные горизонтальные участки, до сотни км. При приемистости нагнетательных скважин порядка литры в секунду (0,001 $м^3$/с) можно ограничиться горизонтальным участком в несколько км.

Расчет фильтрационного и теплового поля в системе "2+1". Пусть фильтрационное поле в пласте мощности *h* образовано двумя нагнетательными скважинами, расположенными в точках с координатами (-*l*,0) и (*l*,0), а так же одной добывающей скважиной в начале координат (0,0). Для скоростей

фильтрации имеют место формулы, полученные наложением полей точечных источников-стоков.

$$u(x,y)=\frac{Q_н}{2\pi h}\left[\frac{x-l}{(x-l)^2+y^2}+\frac{x+l}{(x+l)^2+y^2}-\frac{2x}{x^2+y^2}\right]$$

$$v(x,y)=\frac{Q_н}{2\pi h}\left[\frac{y}{(x-l)^2+y^2}+\frac{y}{(x+l)^2+y^2}-\frac{2y}{x^2+y^2}\right]$$

Уравнение движения жидкой частицы вдоль линии тока

$$\frac{dx}{dt}=\frac{u(x,y)}{m},\quad \frac{dy}{dt}=\frac{v(x,y)}{m},\quad x(0)=l+R_н\cos\vartheta,\quad y(0)=R_н\cos\vartheta$$

Радиус скважины мал по сравнению с расстоянием между скважинами, их отношением можно пренебречь. Углы наклона линий тока условимся брать от 0 до π с интервалом между значениями π/4. Уравнения линий тока достаточно просто пишутся в полярных координатах

$$r=l\sqrt{\cos(2\theta)+ctg\Psi\cdot\sin(2\theta)},\quad \Psi=\frac{2\pi h}{Q_н}\psi$$

Здесь Ψ есть безразмерное значение функции тока, в положительной четверти плоскости *Oxy* оно меняется от нуля до π. Ниже на рис. 1 даны три линии тока. Видно, что охват площади течением не достигает в поперечном направлении размера *l*.

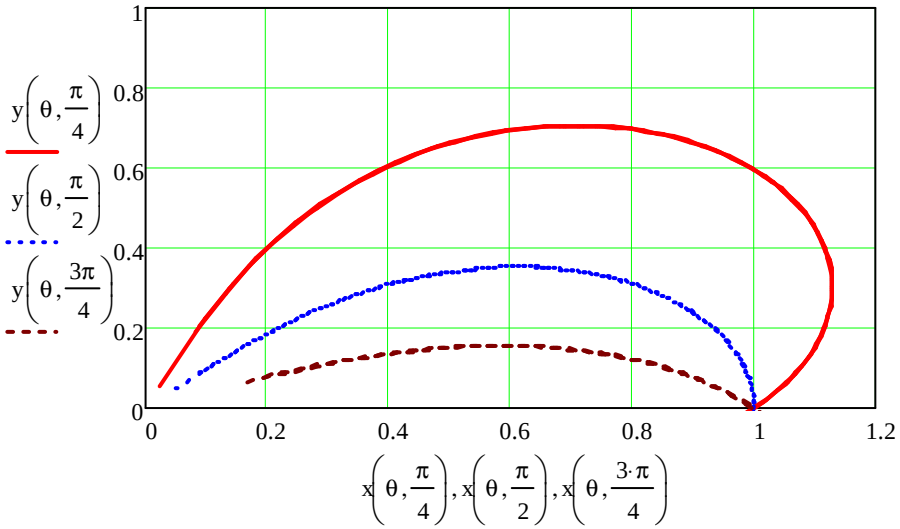


Рис.1. Линии тока от нагнетательной скважины к добывающей скважине.

Относительное запаздывание по изображенным трем линиям тока по сравнению с главной линией составляют: 1,17; 2 и 4. Эти результаты получены точно, аналитическим интегрированием. Если по главной линии тока температурные возмущения доходят через 9 лет, то по нижней линии они дойдут через 11 лет, по средней – через 18 лет, а по крайней линии тока только через 36 лет. А за 9 лет температурные возмущения распространяются на расстояние 30 м, за 36 лет – почти на 60 м. Это означает, что по истечению таких времён надо еще учитывать приток тепла с кровли и подошвы, что значительно ослабит влияние холодной закачиваемой воды и на многие годы продлит работу теплоэнергетических установок.

Напрашивается очевидный теперь вывод: предлагаемая теплоэнергетическая установка «2+1» будет работать надежно 50 лет с полезной

тепловой мощностью 22 МВт и постепенным её снижением мощности, спустя десятилетия.

ГЦС для глубоких высокотемпературных скальных горных пород. Известен опыт извлечения тепловой энергии горячих горных пород путем создания трещин в горной породе и подогрева нагнетаемой воды при движении по искусственно созданной трещине раскрытости от 0,2 до 1 мм. Добывающая скважина давала фонтан пара. В режиме самоциркуляции расход воды составил 9,5 л/с или 820 $м^3$/сут. Тепловая мощность пары скважин (наклонная нагнетательная до 2758 м и вертикальная добывающая от глубины 2670 м) составила 5 МВт. Температура горных пород была порядка 190ºС, через 75 дней после запуска температура на устье поднялась до 160ºС. Более подробно с характеристиками станции можно ознакомиться по статье Ю.Д. Дядькина в книге [1].

Проблема создания экономически выгодной системы ГЦС с нагнетанием воды и добычей пара с больших глубин издавна привлекает инженеров. Благодаря парообразованию потери тепла при добыче минимальны, а образование пузырьков пара на горячей поверхности пород и их унос интенсифицирует теплообмен, по данным разных авторов многократно. Ниже приведён рис. 2, по которому можно судить о росте коэффициента теплообмена между жидкостью и твердой породой.

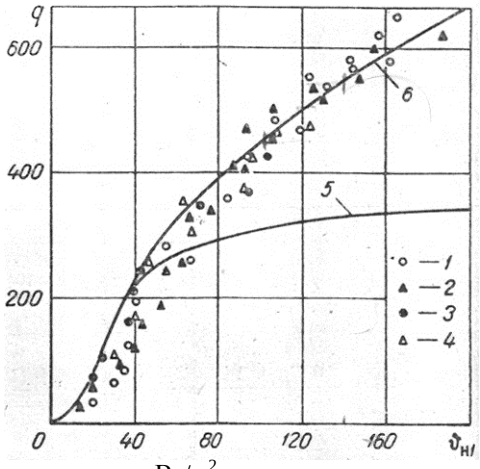


Рис.2. Зависимость теплового потока Вт/$м^2$ от температурного напора. Начальный участок соответствует малому температурному напору (классическому случаю).

Из графика следует, что в случае парообразования в трещинной породе теряет силу линейная зависимость между температурным напором и тепловым потоком. Видно, что обмен теплом ускоряется.

Литература:

1. Геотермальная энергия, М., Мир, 1975. 354 с.
2. Проблемы геотермальной энергетики Дагестана. Авт.: *А.Г. Гаджиев, М.К. Курбанов, В.В. Суетнов и др.* – М., Недра, 1982. 208 с.
3. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
4. *Алишаев М.Г.* Уточнение потерь тепла для геотермальной скважины// Известия РАН. Энергетика. 2010, №1. С. 36-47.

ДОКЛАДЫ ВЕДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

НЕЛОКАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЯ К ЗАДАЧАМ ГЕОТЕРМИИ

Мейланов Р.П.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: lanten50@mail.ru

Дается анализ современного состояния математической теории теплопроводности. Рассматриваются основы новой теории нелокальной теплопроводности на базе дробного исчисления. Анализируются особенности решений уравнений теплопроводности в производных дробного порядка по времени и координате. На основе нового подхода к анализу данных нестационарных методов измерения распределения температуры вычислены температуропроводности верхних слоев земли. Обсуждаются перспективы развития нелокальной теории теплопроводности применительно к задачам геотермии.

В неравновесной термодинамике вывод уравнения теплопроводности осуществляется на основе закона сохранения энергии и закона Фурье. В случае справедливости принципа локального равновесия мы имеем традиционный подход [1-3] , когда исходят из закона сохранения энергии

$$\frac{\partial T(\xi,\tau)}{\partial \tau}+\frac{1}{c_p \rho}\frac{\partial}{\partial \xi}q(\xi,\tau)=0 \quad , \qquad (1)$$

и закона Фурье

$$q(\xi,\tau)=-\lambda\frac{\partial}{\partial \xi}T(\xi,\tau) \quad . \qquad (2)$$

Здесь $T(\xi,\tau)$ - температура, $\xi = x/x_0, \tau = t/t_0$ – безразмерные координата и время, x_0, t_0 – характерные координата и время, c_p – удельная изобарная теплоемкость, ρ – плотность вещества, $q(\xi,\tau)$ – тепловой поток, λ – коэффициент теплопроводности. Как следует из (1, 2) уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\frac{\partial T(\xi,\tau)}{\partial \tau}-a^2\frac{\partial^2}{\partial \xi^2}T(\xi,\tau)=0 \quad , \qquad (3)$$

где $a^2=\lambda/c_p\rho$ – коэффициент температуропроводность среды. При учете конвективного переноса тепла теплопроводности принимает вид [3]:

$$\frac{\partial T(\xi,\tau)}{\partial \tau}-a^2\frac{\partial^2}{\partial \xi^2}T(\xi,\tau)+V\frac{\partial}{\partial \xi}T(\xi,\tau)=0 \quad , \qquad (4)$$

где V – скорость конвективного потока. В зависимости от конкретной задачи уравнения (2, 3) дополняются различными краевыми условиями.

В случае, когда теплопроводность и источники тепла сами зависят от температуры: $\lambda = \lambda(T(\xi,\tau))$ $W = W(T(\xi,\tau))$ уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\frac{\partial T(\xi,\tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{c_p \rho}\frac{\partial}{\partial \xi}(\lambda(T(\xi,\tau)\frac{\partial}{\partial \xi}T(\xi,\tau)) = W(T(\xi,\tau)) \quad . \qquad (5)$$

Уравнение (5) описывает нелинейные процессы переноса тепла.

При справедливости принципа локального неравновесия важным становится учет нелокальных эффектов по времени и координате. Учет нелокальности по времени и по координате осуществляется обобщением закона Фурье. Например, в работе [4] предлагается следующая связь между тепловым потоком q и градиентом температуры ∇T

$$q = -\tau_T \frac{\partial q}{\partial t} - \lambda \nabla T - l^2 \nabla^2 q \quad , \qquad (6)$$

где τ_T – время релаксации теплового фонона, l – характерный масштаб нелокальности, λ – коэффициент теплопроводности. Первое слагаемое в (6) описывает эффект памяти («инерционный» член), последнее слагаемое учитывает пространственную нелокальность. Из соотношения (6) и закона сохранения энергии получается следующее уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} + \tau_T \frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial t^2} = a\nabla^2 T(r,t) - l^2 \frac{\partial \nabla^2 T(r,t)}{\partial t} \quad .$$

Традиционный способ учета нелокальности с помощью интегрального оператора встречается с непреодолимыми принципиальными трудностями.

Новый этап развития нелокальной теории теплопроводности связан с развитием математического аппарата интегродифференцирования дробного порядка – дробного исчисления [5,6]. Математический аппарат интегродифференцирования дробного порядка позволяет в зависимости от решаемой задачи применить соответствующую производную дробного порядка. В случае задачи без начальных условий, когда начальные условия не влияют на распределение температуры в момент наблюдения, ставится задача нахождения решения уравнения теплопроводности, удовлетворяющего граничному условию одного из трех типов, заданных для всех $\tau > -\infty$. Уравнение теплопроводности для задачи без начальных условий принимает вид [7}

$$\frac{\partial^\alpha \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \tau^\alpha} - D\frac{\partial^2 \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \xi^2} = 0 \quad , \qquad (7)$$

Где нелокальная производная по времени дается определением

$$\frac{\partial^\alpha \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \tau^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{\partial}{\partial \tau}\int_{-\infty}^{\tau}\frac{\mathrm{T}(\xi,z)}{(\tau - z)^\alpha}dz \quad .$$

Рассмотрим случай граничного условия первого типа $T(0,\tau) = \varphi(\tau)$ получим следующее решение уравнения (7).

$$T(\xi,\tau)=\tilde{T}_0\exp\left(-\xi\sqrt{\Omega^{\alpha}/D}\cdot\cos(\pi\alpha/4)\right)\cdot\cos\left(\Omega\tau-\xi\sqrt{\Omega^{\alpha}/D}\cdot\sin(\pi\alpha/4)\right). \quad (8)$$

При $\alpha=1$ решение (3.13) переходит в известное решение [76]:

$$T(\xi,\tau)=\tilde{T}_0\exp\left(-\xi\sqrt{\Omega/2D}\right)\cdot\cos\left(\Omega\tau-\xi\sqrt{\Omega/2D}\right). \quad (9)$$

Как видно из (8) и (9), учет эффектов памяти приводит к перенормировке характерного масштаба затухания и времени запаздывания температурных волн. Для характерного масштаба затухания температурных волн имеем $l=\tilde{x}_0/\sqrt{2}\cdot\cos(\pi\alpha/4)$, где $\tilde{x}_0=\sqrt{2a^2/\omega}$ - характерный масштаб затухания при отсутствии учета эффектов памяти (α=1). Для характерного времени запаздывания температурных волн имеем: $t_з=\tilde{t}_0\cdot\sqrt{2}\sin(\pi\alpha/4)$, где $\tilde{t}_0=\sqrt{1/(\omega\cdot a^2)}$ - характерное время запаздывания температурных волн без учета эффектов памяти. Глубина проникновения тепла в почву зависит от периода колебаний температуры на поверхности и параметра нелокальности $T(\xi,\tau)=\tilde{T}_0\exp(-\xi\sqrt{\Omega/2D})\cdot\cos(\pi\alpha/4)$. Так, отношение глубины проникновения тепла ξ_1 и ξ_2 для колебаний с частотами Ω_1 и Ω_2 при учете нелокальности оказывается равным $\xi_2/\xi_1=(\Omega_2/\Omega_1)^{\frac{\alpha}{2}}$. Для суточных и годичных колебаний имеем $\xi_2/\xi_1=(365)^{\frac{\alpha}{2}}=(19.1)^{\alpha}$. Таким образом глубина проникновения годовых колебаний оказывается зависящей от параметра нелокальности по времени. Пунктирные и точечные кривые на рис.1 соответствуют расчетным кривым по формуле (8).

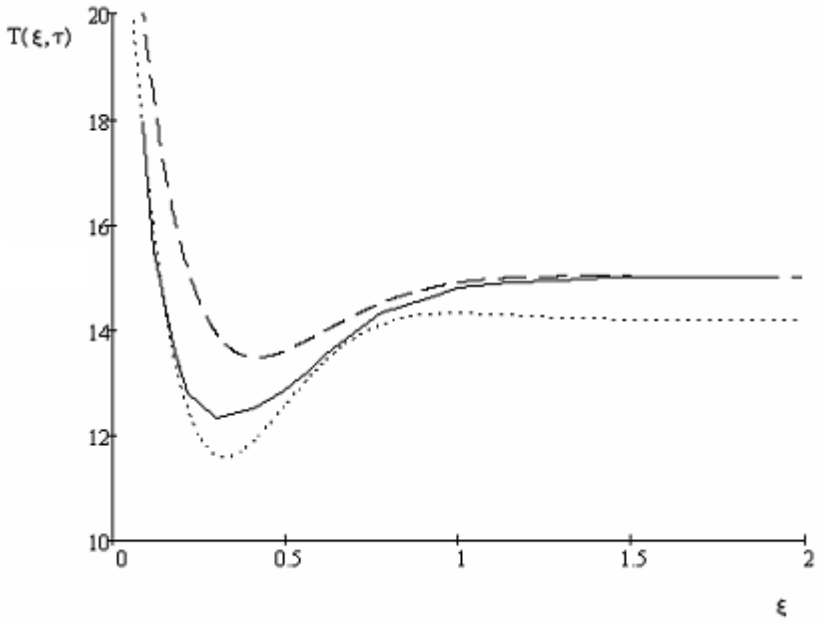


Рис.1. Экспериментальные и расчетные данные распределения температуры. Сплошная – эксперимент (г.Избербаш 10.05.1959 г), пунктирная – $\alpha=0.8$; точечная – $\alpha=1$.

На рис.2 приведены результаты расчета температуропроводности как функции координаты. В отличие от традиционного расчета в данном случае мы рассчитываем зависимость температуропроводности от координаты.

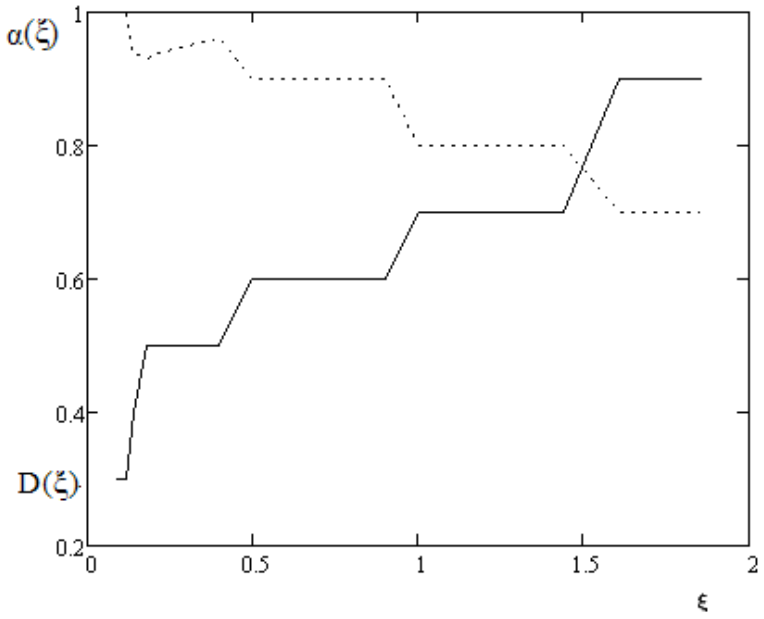


Рис.2. Расчетные значения температуропроводности (D(ξ)- сплошная кривая) и параметра нелокальности по времени (α (ξ) - точечная кривая) по данным режимных наблюдений (Избербаш 10.05.1959).

Таким образом, предлагаемый метод анализа экспериментальных данных на основе однопараметрического семейства решений позволяет по-новому интерпретировать ранее известные экспериментальные данные. Новизна заключается в том, что помимо значений температуропроводности определяется и параметр нелокальности, которые связан со структурными особенностями исследуемого вещества.

Литература:

1. *Карслоу Г.С.* Теория теплопроводности. М. – Л. ОГИЗ, 1947. – 288 с.
2. *Ландау Л.Д, Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. – 796 с.
3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности.– М.: ВШ, 1967. – 600с.
4. *Соболев С.Л.* Локально-неравновесные модели процессов переноса // УФН. – 1997. – Т.167. № 10. – С. 1095– 1106.
5. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск: Наука и Техника, 1987. – 498с.
6. *Нахушев А.М.* Дробное исчисление и его применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 272 с.
7. *Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Особенности решений уравнения теплопереноса в производных дробного порядка // ЖТФ. – 2011.– Т.81. №7. – С.1–6.

ТЕПЛООБМЕН КОНВЕКЦИЕЙ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Рамазанов М.М., Булгакова Н.С.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а

Одним из видов тепломассообмена является процесс переноса тепла, происходящий в движущихся текучих средах (жидкостях либо газах) и обусловленный совместным действием двух механизмов переноса тепла: собственно конвективного переноса и теплопроводности - конвективный теплообмен. Конвекция широко распространена в природе: в нижнем слое земной атмосферы, морях и океанах, в недрах Земли и т.д. Естественная конвекция возникает при неравномерном нагреве (нагреве снизу) текучих веществ, находящихся в поле силы тяжести. Вещество, нагретое сильнее, имеет меньшую плотность и под действием архимедовой силы перемещается относительно менее нагретого вещества. Направление этой силы, а следовательно и конвекции для нагретых объемов вещества противоположно направлению силы тяжести. Наличие неоднородности плотности в поле тяжести при градиенте температуры, направленном по вектору тяжести, может оказаться недостаточным для возникновения конвекции, и жидкость в этих условиях будет находиться в состоянии механического равновесия. Однако дальнейшее увеличение неоднородности плотности приведет к потере механического равновесия. Качественную схему эволюции движения жидкости или газа в подогреваемой снизу полости или в насыщенной пористой среде можно представить следующим образом. С увеличением перепада температуры на границах покоящаяся вначале жидкость теряет устойчивость механического равновесия. Потеря устойчивости механического равновесия связана с кризисом теплопередачи, вследствие чего кондуктивный или молекулярный механизм передачи тепла сменяется более эффективным конвективным механизмом, обусловленным переносом массы жидкости. При потере покоя устанавливается стационарное течение, в результате которого возникают тепловые аномалии (рис.1).

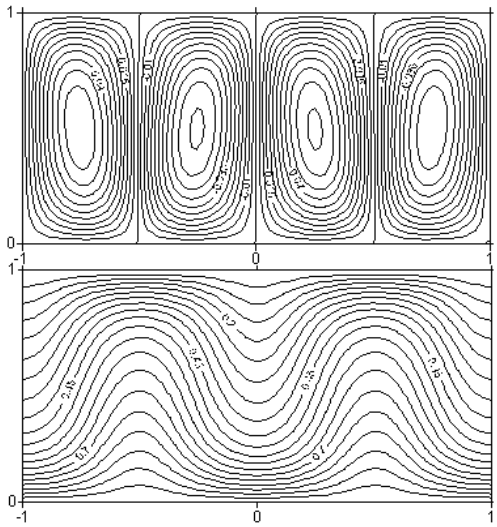


Рис.1. Линии тока стационарного течения и под ними изолинии.

Дальнейшее увеличение разности температур приводит к новому кризису, и устанавливается новая структура течений, которая более эффективно выносит тепло.

После некоторого числа кризисов наступает нерегулярный флуктуационный режим течения. Конвективные течения могут образовывать более или менее упорядоченные пространственные структуры, и их изучение помогает достичь лучшего понимания общих свойств структурообразующих систем.

Наиболее интересным с точки зрения технических приложений случаем конвективного теплообмена является конвективная теплоотдача, то есть процесс двух конвективных теплообменов, протекающий на границе раздела двух фаз (твердой и жидкой, твердой и газообразной, жидкой и газообразной). При этом задача расчета состоит в нахождении плотности теплового потока на границе раздела фаз, то есть величины, показывающей, какое количество тепла получает или отдает единица площади поверхности раздела фаз за единицу времени. Помимо указанных выше факторов, влияющих на процесс конвективных течений, плотность теплового потока зависит также от формы и размеров тела, от степени шероховатости поверхности, а также от температур поверхности и теплоотдающей или тепловоспринимающей среды.

Основная часть тепловой энергии трансформируется в различных теплообменных аппаратах. С ростом энергетических мощностей и объема производства все более увеличиваются габариты применяемых теплообменников. Уменьшение объема, создание более компактных теплообменников могут обеспечить значительную экономию материалов и металлов, понизить затраты труда. Повышение энергетической эффективности и компактности теплообменников тесно связано с интенсификацией процесса теплообмена.

В современных мощных энергетических и технологических установках превалирующую роль играют стационарные процессы конвективного теплопереноса, которые характерны для рекуператоров и теплообменников с внутренними источниками энергии. В рекуперативных аппаратах тепло передается от горячего теплоносителя к холодному через твердую стенку.

Циркуляция теплоносителя в конвективных теплообменниках вынужденная, и интенсивность теплообмена, в значительной степени зависят от рода теплоносителя. Как известно, при взаимодействии твердой непроницаемой теплопередающей поверхности с омывающим ее потоком образуется пограничный слой, оказывающий основное сопротивление теплопередаче. Чем больше толщина теплового пограничного слоя и чем ниже теплопроводность теплоносителя, тем меньше теплоотдача. Увеличить теплосъем можно разными путями, в первую очередь подбором теплоносителя.

Определив теплоноситель с учетом его теплофизических свойств, можно рассматривать вопрос интенсификации теплообмена за счет выбора надлежащего гидродинамического режима. Наиболее выгодным в отношении теплообмена гидродинамическим режимом является турбулентный или переходной режим в пограничном слое, но естественное развитие турбулентности начинается при весьма высокой скорости потока, а, следовательно, и значительном - гидравлическом сопротивлении. Поэтому во многих случаях для интенсификации конвективного теплообмена необходима либо искусственная турбулизация пограничного слоя, позволяющая перенести процесс теплообмена из ламинарной области в турбулентную, либо уменьшение толщины или разрушение пограничного слоя. Дальнейшее развитие современных эффективных энергетических установок и теплообменников базируется на последних достижениях теории теплообмена [1]. В этой связи, можно рассмотреть задачу о смешанной конвекции в теплообменнике.

Вопросы теплообмена конвекцией также связаны с проблемой

теплоизоляции, которая призвана уменьшать тепловой поток через материал. К теплоизоляционным относятся легкие, обычно пористые материалы, имеющие низкий коэффициент теплопроводности. Теплоизоляционные свойства материала зависят от количества и характера пор. Передача теплоты, например, в легком бетоне происходит через каменный остов материала вследствие теплопроводности и через поры, заполненные воздухом, путем конвекции. Чем меньше размер пор, тем меньшей подвижностью будет обладать в них воздух, передавая минимальное количество теплоты, и тем более высокими теплозащитными показателями будет обладать бетон. Но температура окружающей среды периодически меняется в зависимости от скорости ветра, смены дня и ночи, поэтому при расчете коэффициента теплопроводности теплоизолятора желательно учитывать колебания температуры на его границах.

В последние десятилетия стала очень актуальной задача тепломассопереноса в расплаве при выращивании кристаллов в связи с развитием новых технологий, которые были бы невозможны в отсутствие полупроводниковых монокристаллов. Поскольку для нужд новых технологий нужны кристаллы наилучшего качества, то встал вопрос о том, чтобы улучшать структуру кристалла, влияя на процесс кристаллизации. Получение монокристаллов полупроводников и целого ряда других материалов, используемых в электронной технике, осуществляют в основном методами, которые разделяются на три группы: кристаллизация из расплава, из твердой или из газовой фазы. Конфигурация теплового поля и процессы конвективного тепломассопереноса в кристаллизационной среде являются основополагающими факторами при выращивании кристаллов многих материалов. В последнее время наблюдается устойчивая тенденция к поиску оптимальных условий выращивания кристаллов. При выращивании некоторых материалов (например, боратов) из растворов-расплавов, обладающих высокими значениями динамической вязкости, конвективное движение жидкости проявляется в очень малой степени. Вследствие недостаточного перемешивания нарушается однородность раствора-расплава, что может приводить к гравитационной или иной дифференциации, и получение качественного кристалла становится проблематичным или даже невозможным. В стационарных тепловых полях могут возникать естественно-конвективные течения только в радиальном направлении, что, как правило, не обеспечивает достаточное перемешивание в кристаллизационной среде вблизи фронта кристаллизации. В результате в кристаллах проявляется "фундаментальная" слоистость, ухудшающая качество выращиваемых кристаллов [2,3]. Методы принудительного перемешивания раствора-расплава, так или иначе, основаны на активном (контактном) воздействии какого-либо конкретного физического тела на расплав, при этом вносится элемент случайных возмущающих воздействий на процесс роста кристалла и возможны загрязнения [4]. В этой связи, необходимы исследования в области управления конвективным движением расплава бесконтактным способом. Например, путем воздействия на осесимметричное тепловое поле и на процесс вынужденной конвекции в ростовом объеме, основанное на бесконтактном возбуждении азимутальных круговых течений - вынужденной конвекции в ростовом объеме посредством вращения теплового поля [5]. Результаты исследований влияния модулируемых параметров на конвективную устойчивость гидродинамической системы и развитие нелинейных режимов конвекции также могут быть использованы применительно к задачам выращивания кристаллов.

Кроме того, конвективный теплообмен играет важную роль в

формировании месторождений термальных вод конвекционного типа. Под геотермической энергией понимают физическое тепло глубинных слоев Земли, имеющих температуру, превышающую температуру воздуха на поверхности. В качестве носителей этой энергии могут выступать как жидкие флюиды, так и сухие горные породы. Сухие и пористые породы обладают меньшим коэффициентом теплопроводности, чем монолитные и влажные. Наличие в порах пород движущейся жидкости изменяет механизм теплопереноса, добавляя к кондуктивному конвективный теплоперенос. Несмотря на то, что конвективный перенос тепла не является главной причиной теплопереноса, подземные флюиды и, прежде всего, воды занимают особое место в общем переносе тепла Земли благодаря их высокой миграционной способности, значительной теплоемкости и участию в геологических процессах. Подземные воды при движении перераспределяют тепловой поток, вызывая тепловые аномалии [6]. Происхождение термальных вод может быть связано с деятельностью тепловых очагов, но чаще всего вода, тем или иным способом попадая в пласт породы, совершает долгий путь, пока не приходит в контакт с тепловым потоком или постепенно разогревается, отбирая тепло у пород. В зависимости от глубины проникновения инфильтрационных вод они становятся более или менее нагретыми. Инфильтрационные гидротермы способны изливаться на поверхность в виде горячих источников, если существует возможность разгрузки воды на поверхность по разломам, выклиниваниям слоев, что происходит в более низких относительно области питания участках. Причем, чтобы вода оставалась термальной, подъем ее к поверхности должен происходить очень быстро, например, по широким трещинам разломов. При медленном подъеме гидротермы остывают, отдавая аккумулированное тепло вмещающим породам. Однако если пробурить скважину на глубину 3-4 тыс. м и обеспечить быстрый подъем воды, можно получить термальный раствор с температурой до 100 °С. Все это касается областей со средними геотермическими показателями и не относится к вулканическим районам или зонам недавнего горнообразования. В США и странах Евросоюза в качестве низкотемпературных источников тепла для систем отопления и горячего водоснабжения с использованием насосов применяют грунтовые теплообменники. Скважинные теплообменники используются также и в России для теплоснабжения зданий. В работе [7] проведено численное исследование задачи о нестационарном конвективном теплообмене в системе вертикальная скважина – водоносный горизонт. Определены условия, при которых конвекция вносит заметный вклад в теплообмен. Установлены закономерности зависимости теплового потока в скважину от времени при различных числах Рэлея и толщинах проницаемого слоя пород.

К месторождениям конвекционного типа относятся также гидротермальные проявления так называемых рифтовых зон, характеризующихся активным тектоническим режимом и умеренно повышенными геотермическими градиентами – 45-70 °С/км [8]. Жидкая фаза воды и тепло могут происходить из одного источника лишь в том случае, если таковым является остывающий магматический расплав. Перегретая вода в виде паровых струй выделяется из расплава вместе с газами и легколетучими компонентами, устремляясь в верхние, более холодные горизонты. Повышенный тепловой поток в рифтовых зонах связан с многочисленными, неглубоко залегающими магматическими очагами, из которых происходят излияния магмы, наращивающей океаническое дно. Обнаруженные сравнительно недавно (в 70-х годах), магматические образования на дне океана «черные курильщики» позволили определить условия, в которых

формировались медно-колчеданные месторождения геологического прошлого [9]. В этой работе показано, что гидротермальная деятельность в рифтовых зонах океанов протекала неравномерно, а периодически, то, усиливаясь, то, затухая, что связано со скоростью тектонического раскрытия рифтов. В [10] выдвинута гипотеза образования газогидратных залежей на мелководных склонах срединно-океанических хребтов в результате действия двух факторов: тепловой конвекции воды в трещиновато-пористых породах коры и реакции серпентинизации коры. При серпентинизации происходит интенсивное выделение углеводородов, а условия конвекции воды в пористой среде способствуют формированию и аккумуляции газогидратов в приповерхностных слоях океанической коры. (Серпентинизация - процесс изменения (гидратации) силикатных горных пород (дуниты и оливиниты) под воздействием термальных водных растворов, выражающийся в замещении безводных магнезиальных силикатов минералами группы Серпентина; в результате образуются Серпентиниты). Большую роль конвективный тепло- и массоперенос играет также в процессе концентрации рудных и углеводородных компонентов в формировании соответствующих месторождений, при этом большое значение имеет структура и режим конвекции [11]. Гравитационная конвекция является одним из механизмов циркуляции флюидов в земной коре, для которого требуются относительно хорошая проницаемость и большие градиенты температуры. Фильтрация в пористой среде с жестким скелетом изучена довольно подробно. Учет деформаций скелета пористой среды сразу создает множество проблем. Взаимодействие флюида и скелета не сводится к простому суммированию процессов фильтрации в среде с жестким скелетом и деформирования однофазной среды скелета. Поэтому необходимо помнить о границах применимости тех или иных математических моделей пористых сред. Другой подход связан с рассмотрением таких важнейших механизмов флюидодинамических процессов в верхней коре как дилатансия и компакция [12]. Дилатансионный эффект связан со сдвиговым напряжением трещиноватых пороупругих слоев. Он сопровождается резким понижение порового давления. В момент землетрясения в его очаге образуются крупные трещины, и даже полости, в которые засасываются флюиды. После релаксации сдвиговых напряжений имеет место упругая консолидация трещиноватой зоны под действием веса вышележащих пород. Дилатансия и консолидация, действуя совместно, создают направленное движение флюидов в земной коре на большие расстояния. Вязкая консолидация (компакция) связана с динамикой поровязких сред. К поровязким средам относятся частично расплавленные горные породы, зыбучие пески, илы, водонасыщенные глины и т.д. В последние годы появились работы, в которых фигурируют вязкоупругие модули пористых сред. Данное направление еще не вполне сформировалось и сталкивается с определенными трудностями. Одна из этих трудностей связана с оценкой реологических параметров из данных наблюдений. Можно предположить, что механизмы дилатансии и компакции, связанные с тектоническими напряжениями, существенным образом влияют на флюидодинамические процессы в верхней коре и являются причиной образования наблюдаемого распределения рудных месторождений.

В районах расположения современных или недавно потухших вулканов, на поверхность выходят не только горячие воды, но и пароводяная смесь с температурой до 200 °С и более. На сегодняшний день все геотермальные электростанции работают в районах современного вулканизма. Для высокотемпературных гидротермальных систем источником тепла могут быть

только магматические камеры. В работах [13, 14] показана кривая флуктуации мощности вулканизма на Камчатке за последние 850 тыс.лет. Из этой кривой видно, что мощность вулканической деятельности носит колебательный характер, что естественно отражается и на гидротермальной активности. Поэтому наличие конвекции в данный момент может зависеть от градиента температуры, который существовал 100 тыс. лет назад.

Таким образом, процессы свободноконвективного переноса имеют важное значение для таких областей науки как геотермия, теплоэнергетика, океанология, климатология, химическая технология, ракетная техника, холодильная техника, микроэлектроника и другие. Поэтому неудивительно, что свободной конвекции посвящено огромное число публикаций. Тем не менее, многие вопросы в этой области, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения не решены в полной мере. Понимание свойств конвекции и характера влияния различных осложняющих факторов на устойчивость способствует созданию и совершенствованию методов управления устойчивостью течений и равновесия [15].

Литература:

1. *Жукаускас А.А.* Конвективный перенос в теплообменниках. М: Наука. 1982. 472с.
2. *Мильвидский М.Г., Освенский В.Б.* Проблемы современной кристаллографии. М.: Наука, 1975, с. 79-109.
3. *Аполлонов В.Н.* Механизм и условия роста ритмично построенных кристаллов. - ДАН, 1999, т. 364, № 1, С. 94-96.
4. *Кох А.Е., Кононова Н.Г., Кох В.Е.* Способ управления процессом кристаллизации и устройство для его осуществления// Патент Российской Федерации.
5. *Кох А.Е.* Метод управления процессами тепломассопереноса при выращивании кристаллов посредством изменения симметрии и вращения теплового поля// Диссертация на соискание Ученой степени дтн, 2002 , Новосибирск, 271 с.
6. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика. Проблемы, ресурсы, технологии. М: Физматлит. 2008. 375с.
7. *Алхасов А.Б., Рамазанов М.М., Абасов Г.М.* Конвективный теплообмен между вертикальной скважиной и водоносным горизонтом// Изв. АН. Энергетика. 2009.№6. С.144-150.
8. *Дворов И.М.* Геотермальная энергетика. М.: Наука, 1976. 192 с.
9. *Короновский Н.В.* Гидротермальные образования в океанах// Соросовский Образовательный Журнал. 1999. №10. С.55-62.
10. *Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е., Матвеенков В.В.* Гидротермальный механизм образования углеводородов в срединно-океанических хребтах// Геология нефти и газа. 1997. №8. С.4-16.
11. *Лопатников С.Л.* Тепловая конвекция и образование месторождений нефти// Докл. РАН. 1995. Т. 345. № 4. С.541-543.
12. *Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И.* Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: Государственный научный центр Российской Федерации. ВНИИгеосистем, 2003. 230 с.
13. *Поляк Б.Г.* Различия в вулканической активности в современных подвижных поясах// Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. М.: Наука. 1987. С.206-217.

14. *Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В.* К оценке геоэнергетического эффекта новейшего вулканизма островных дуг // Геотектоника. 1979. №1. С.36-48.
15. *Булгакова Н.С., Рамазанов М.М.* Конвективная устойчивость горизонтального слоя бинарной смеси при модуляции градиента температуры // Изв. РАН. МЖГ, №3. 2010. С.22-32.

О ПОВЕДЕНИИ ВЕЩЕСТВА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ, ПРИСУЩИХ ГРАНИЦЕ МАНТИИ И ВНЕШНЕГО ЯДРА ЗЕМЛИ

Магомедов М. Н.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: mahmag4@mail.ru

Разработана методика расчета решеточных свойств одноатомного вещества при произвольных значениях температуры и давления. Исходя из парного потенциала межатомного взаимодействия типа Ми-Леннарда-Джонса, рассчитаны изотермические зависимости температуры Дебая, первого и второго параметров Грюнайзена, вероятности образования вакансии, коэффициента самодиффузии и поверхностной энергии от температуры (T) и относительного объема (V/V0) для ОЦК-железа. Здесь V/V0 – отношение молярных объемов кристалла при давлении P и температуре T, и при P = 0 и T = 0 K. Показано, что в области: 1 > V/V0 > (V/V0)min происходит подавление активационных процессов при изотермическом сжатии, и их усиление при изохорическом нагреве. Но при V/V0 = (V/V0)min = 0.0549 вероятность образования вакансии и коэффициент самодиффузии достигают минимума, а при дальнейшем изотермическом сжатии происходит усиление активационных процессов, причем здесь активационные параметры слабо зависят от температуры. Это обусловлено квантовым эффектом: подбарьерному туннельному переносу атомов по объему кристалла. Показано, что при (V/V0)min < V/V0 < (V/V0)fr поверхностная энергия имеет отрицательное значение, что должно стимулировать процесс фрагментации кристалла. Оценена изотермическая зависимость давления в ОЦК-железе при его сжатии до V/V0 = 0.001, вдоль T = 300 и 3000 K. На основе полученных изотерм оценены давления в характерных точках барических зависимостей активационных параметров и поверхностной энергии.

Введение. Давление (P) на границе мантии и внешнего ядра Земли (на глубине 2900 ÷ 3000 км – это раздел Гутенберга) оцененное по скоростям распространения сейсмических волн составляет (по модели Земли Хаддона-Буллена) 1350 ÷ 1470 кбар, т.е. 1332 ÷ 1451 млн. атм. [1]. Температура (T) на границе мантии и внешнего ядра составляет 4000 ÷ 5000 K [1, стр. 32]. Возникает вопрос: как ведет себя вещество, в частности железо, при таких экстремальных P-T-параметрах?

Метод расчета образования вакансий и самодиффузии атомов [2, гл. 4 и 5]. Представим систему как структуру из N + Nv ячеек одинакового размера, в которой Nv ячеек вакантны. Кроме этого, будем считать, что атомы в системе могут находиться в двух состояниях: в локализованном (Л-), и в делокализованном (Д-). В Л-состоянии атом локализован в ячейке виртуальной решетки и имеет только колебательные степени свободы. В Д-состоянии атому доступен весь объем системы, и он имеет только трансляционные степени свободы. Атом переходит из Л- в Д-состояние (т.е. начинается миграция), когда его скорость позволяет ему за полпериода колебания в Л-состоянии ($\tau/2$) пройти расстояние равное радиусу области доступности для Д-атома в безвакансионной, несрелаксировавшей решеточной структуре: $\lambda/2 = co/(2kp1/3)$, где co – размер ячейки в безвакансионной системе:

$$co = (6\ kp / \pi\ \rho)1/3, \qquad (1)$$

kp – коэффициент упаковки структуры из N + Nv ячеек, $\rho = N/V$ – плотность числа атомов. Релаксация системы в активированное вакансиями состояние

приводит к уменьшению размеров ячейки до величины, определяемой соотношением:

$$c = \left[\frac{6k_p V}{\pi(N+N_v)}\right]^{1/3} = c_o(1-\phi_v)^{1/3}, \quad (2)$$

где ϕv – вероятность обнаружить вакансию в виртуальной структуре из N + Nv ячеек:

$$\phi_v = \frac{N_v}{N+N_v} = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_{(E_v/k_b T)^{1/2}}^{\infty} \exp(-t^2)\,\mathrm{d}t. \quad (3)$$

Энергия создания вакансии в виртуальной решеточной структуре Ev равна:

$$E_v = \frac{E_L}{1+x_d[(C_D E_L/k_b T)-1]}, \quad (4)$$

$$E_L = \left(\frac{m}{k_n^o}\right)\left(\frac{c_o k_b \Theta_{eo}}{2\hbar}\right)^2 f_w(y), \qquad C_D = \frac{4k_n^o}{3k_p{}^{2/3}}, \quad (5)$$

где kno – число всех ячеек (как занятых, так и вакантных) ближайших к данному атому, kb и $\hbar$ – постоянные Больцмана и Планка, m – масса атома, Θeo – температура Эйнштейна при ϕv = 0 (ибо λ определяется для такой системы),

$$f_w(y) = \frac{2[1-\exp(-y)]}{y[1+\exp(-y)]}, \qquad y = \frac{\Theta_{eo}}{T} = \frac{3\Theta_o}{4T}. \quad (6)$$

где Θ – температура Дебая, которая связана с температурой Эйнштейна: Θ = (4/3) Θe .

Доля атомов в Д-состоянии определяется, как доля атомов, имеющих кинетическую энергию выше порогового значения Ed – энергии делокализации, т.е. энергии необходимой для перехода атома из Л- в Д-состояние:

$$x_d = \frac{N_d}{N} = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_{E_d/k_b T}^{\infty} t^{1/2}\exp(-t)\,\mathrm{d}t. \quad (7)$$

Для того чтобы атом перешел из Л- в Д-состояние его скорость должна быть не менее чем: vm = λ/(τ/2). Для эйнштейновской модели кристалла период колебания атома в безвакансионной (ибо λ определяется для такой системы), несрелаксировавшей решеточной структуре равен: τ = 2π$\hbar$ /(kbΘeo). Поэтому функцию Ed определим в виде:

$$E_d = \left(\frac{3}{2}\right) m v_m{}^2 f_w(y) = \left(\frac{3}{2}\right) m\left(\frac{\lambda}{\tau}\right)^2 f_w(y) = \left(\frac{3}{8\pi^2}\right) m\left(\frac{c_o k_b \Theta_{eo}}{\hbar k_p{}^{1/3}}\right)^2 f_w(y) = C_{ld} E_L, \quad (8)$$

где введено обозначение:

$$C_{ld} = \frac{3k_n^o}{2\pi^2 k_p{}^{2/3}} = \left(\frac{9}{8\pi^2}\right) C_D. \quad (9)$$

Выражение для коэффициента самодиффузии в объеме кристалла имеет вид [2]:

$D_f(\rho, T) = D_d(\rho)\, x_d(\rho, T)$, $\quad D_d(\rho) = f_{cor}\,(4/\pi)(c / k_p^{1/3})^2\,(k_b\,\Theta_o / 8\,\pi\,\hbar)$. (10)

Здесь f_{cor} – «фактор корреляции», возникающий из-за того, что ушедший в вакансию атом может сразу же вернуться обратно, не внеся вклада в диффузию. Множитель $D_d(\rho)$ – это такой коэффициент самодиффузии, который теоретически может иметь кристалл при изохорической (ρ = const) делокализации всех его атомов:

$$D_d(\rho) = \lim_{\substack{T\to\infty \\ \rho=const}} D_f(\rho, T) / x_d(\rho, T) = \lim_{\substack{x_d=1 \\ \rho=const}} D_f(\rho, T)\,. \qquad (11)$$

Как показано в [2], данный метод позволяет хорошо описать функции $\phi_v(\rho,T)$ и $D_f(\rho,T)$ как в области плавления, так и при T = 0 K. Но расчеты в [2] были выполнены при низком давлении, где и были получены экспериментальные данные, по которым тестировалась методика. Здесь же расчеты проведены при высоких P-T-параметрах.

Метод расчета температуры Дебая. Представим парное межатомное взаимодействие в виде потенциала Ми–Леннарда–Джонса, имеющего вид [2, гл. 3]:

$$\varphi(r) = \frac{D}{(b-a)}\left[a\left(\frac{r_o}{r}\right)^b - b\left(\frac{r_o}{r}\right)^a\right], \qquad (12)$$

где D и r_o – глубина и координата минимума потенциальной ямы, b и a – параметры.

Тогда температуру Дебая и параметр Грюнайзена при T = 0 K и при произвольной плотности можно определить в виде [2, гл. 2]:

$$\Theta_{T=0K} = A_w\,\xi\left[-1+\left(1+\frac{8D}{k_b A_w\,\xi^2}\right)^{1/2}\right], \qquad (13)$$

$$\gamma_{T=0K} = -\left(\frac{\partial \ln \Theta_{T=0K}}{\partial \ln V}\right)_T = \frac{b+2}{6\,[1+(A_w\xi / \Theta_{T=0K})]}\,. \qquad (14)$$

где функция A_w *возникает из-за учета энергии «нулевых колебаний»:*

$$A_w = K_R\,\frac{5k_n ab(b+1)}{144(b-a)}\left(\frac{r_o}{c}\right)^{b+2},\quad K_R = \frac{\hbar^2}{k_b r_o m},\quad \xi = \frac{9}{k_n^{\,o}},\quad k_n = k_n^{\,o}(1-\phi_v)\,. \qquad (15)$$

Выражения (13) и (14) показали хорошее согласие с экспериментальными оценками для многих элементарных кристаллов с различными структурами, характером химической связи и ролью квантовых эффектов [2]. Поэтому при расчетах активационных параметров мы используем выражения (13) – (15), полагая, что температура Дебая не зависит от температуры: $\Theta_o(\rho, T) = \Theta_o(\rho) = \Theta(k_n^{\,o}, c_o)_{T=0\,K}$.

Из (13) следует, что при сверхсильном сжатии значение Θ не стремится к бесконечности, а достигает при V/V_0 = 0 максимума:

$\Theta(0) = \Theta_{max} = 4\,D / (\xi\ k_b) = 4\,k_n^{\,o}\,D / (9\,k_b)$, при этом $\gamma(0) = \gamma_{min} = 0$. (16)

Поверхностная энергия и барическая фрагментация кристалла. При изучении активационных процессов при высоких давлениях необходимо учесть, что при высоких степенях сжатия может начаться процесс фрагментации кристалла, при котором его поверхностная энергия отрицательна [2]. Например, по оценкам из [3], для ОЦК-Fe при T = 0 K поверхностная энергия становится отрицательной при $V/V_0 < 0.59 – 0.63$. Здесь V/V_0 – отношение молярных объемов

кристалла при P и T, и при P = 0 и T = 0 K: $V_0 = N_A\ (\pi/6\ k_p)\ r_o^3$, где N_A = 6.0221367×10^{23} моль$^{-1}$ – число Авогадро.

Используя для колебательного спектра кристалла модель Эйнштейна, межатомный потенциал (12) и формулы (13) – (15), для удельной (на единицу площади) поверхностной энергии грани (100) кристалла было получено выражение [2, гл. 6]:

$$\sigma(100) = -\frac{k_n D\ R^2 L_e}{12\,\alpha_3^{2/3} r_o^2}\ , \qquad (17)$$

где введены обозначения: $R = r_o / c$, $\alpha_3 = \pi / (6\ k_p)$,

$$L_e = U(R) + \frac{18\,\gamma}{(b+2)}\frac{k_b\Theta_e}{D\ k_n} E_w\left(\frac{\Theta_e}{T}\right),$$

$$E_w(y) = 0.5 + \frac{1}{[\exp(y)-1]},\quad U(R) = \frac{aR^b - bR^a}{b-a}. \qquad (18)$$

Формула (17) была апробирована при P = 0 и температурах от 0 K до плавления, и показала хорошее согласие с экспериментальными оценками для многих элементарных кристаллов [2]. Поэтому мы используем ее для оценки тех пределов сжатия, где σ < 0, и где кристалл должен стремиться любым путем увеличить свою удельную (на атом) площадь поверхности: либо свободной, либо межкристаллитной.

Как было показано в [2, 3], при изотермическом сжатии кристалла при определенном значении $(V/V_0)_{fr}$ функция $\sigma(T,\ V/V_0)$ переходит в область отрицательных значений: $\sigma(T,\ V/V_0)_{fr}$ = 0. Легко понять, что при σ < 0 кристалл стремится распасться на дендритные осколки с максимально возможной удельной площадью поверхности. Т.е. при V/V_0 < $(V/V_0)_{fr}$ возможен процесс экзотермической барической фрагментации кристалла, что необходимо учитывать при изучении вещества при высоких давлениях.

<u>Свободная энергия и термическое уравнение состояния</u>. Удельную (на атом) свободную энергию (или свободную энергию Гельмгольца) определим в виде [2, гл. 1]:

$$f\ =\ f_i\ +\ f_s\ +\ f_w\ +\ f_d\ , \qquad (19)$$

Здесь f_i – это свободная энергия трансляционного движения Д-атомов:

$$f_i\ =\ -x_d\ k_b\ T \ln\left[\left(\frac{T}{A_d}\right)^{3/2}\frac{V}{V_0}\right], \qquad A_d\ =\left(\frac{2\pi\hbar^2}{mk_b}\right)\left(\frac{N}{V_0\ \mathrm{e}}\right)^{2/3}. \qquad (20)$$

Функция f_s – это свободная энергия «статического взаимодействия» всех атомов между собой в приближении «взаимодействия только ближайших соседей»:

$$f_s\ =\ \left(\frac{k_n^o}{2}\right)(1-\phi_v)\ D\ U(R), \qquad R = r_o / c\ . \qquad (21)$$

Третье слагаемое в (19) – это свободная энергия «колебательного движения» Л-атомов, в приближении Эйнштейновского спектра их колебаний:

$$f_w\ =\ 3\,(1-x_d)\ k_b\ T\ \{0.5\ y\ +\ \ln[\,1-\exp(-y)]\}\ ,\quad y = \Theta_e / T\ = 3\,\Theta/(4\ T)\ . \qquad (22)$$

Функция f_d – это удельная свободная энергия «динамического взаимодействия Д-частиц» в приближении «взаимодействия только ближайших соседей»:

$$f_d\ =\ \frac{x_d\ k_n^o\,(1-\phi_v)\,abD}{(b-a)}\left\{R^b\left[\frac{l_3(b,\xi_p)}{b}\right] - R^a\left[\frac{l_3(a,\xi_p)}{a}\right]\right\}\ , \qquad (23)$$

где введены обозначения: $\xi_p = (0.5/3^{1/2})(1/k_p)^{1/3}$,

$$l_3(k,t) = \frac{(1+t)^{k-2} - (1-t)^{k-2}}{2(k-2)t(1-t^2)^{k-2}} - 1 \cdot$$

Расчет термического уравнения состояния: $P = -(\partial f / \partial V)_T$, проводился путем численного дифференцирования результатов расчета изотермической зависимости функции f / D по аргументу V/V_0.

Результаты расчетов для ОЦК-железа. Для проведения конкретных расчетов возьмем кристалл железа (m = 55.847 а.е.м.) с объемно центрированной кубической (ОЦК) структурой: $k_n^{\circ} = 8$, $k_p = 0.6802$. Тогда структурные параметры решеточной модели будут равны: C_D = 13.791 из (5), C_{ld} = 1.572 из (9), ξ = 1.125 из (15), α_3 = 0.7698 из (18). ОЦК структура железа была выбрана потому, что при высоких P-T-условиях железо переходит в β-фазу, структура которой менее плотная, чем гране центрированная кубическая (ГЦК) структура γ-фазы или гексагональная плотно упакованная (ГПУ) структура ε-фазы [4]. Тройная (γ-ε-β) точка имеет параметры: P = 37 ГПа = 370 кбар и T = 1550 K. Отметим, что ядро Земли на 94 % состоит из железа.

Параметры парного межатомного потенциала Ми-Леннарда-Джонса (14) для железа, определенные по методу, описанному в [2], равны:

$r_o = 2.4775 \times 10^{-10}$ м, D / k_b = 12576.7 K, a = 3.58, b = 8.26. (24)

Тогда термодинамические константы модели будут равны:

$V_0 = N_A (\pi / 6k_p) r_o^3$ = 7.0494 см^3/моль из (1), K_R = 0.1415 K и $A_w(1)$ = 2.3 K из (15),

$\Theta_e(1)$ = 358.85 K, $\Theta(1)$ = 478.463 K, $\gamma(1)$ = 1.701 из (13) и (14), Θ_{max} = 44717.16 K из (16).

Значение 1 у A_w , Θ и γ указывает, что они определены из (13) – (15) при V/V_0 = 1.

На **рис. 1** показаны зависимости температуры Дебая (Θ), первого (γ) и второго ($q = [\partial \ln(\gamma)/\partial \ln(V)]_T$) параметров Грюнайзена от V/V_0 для ОЦК-Fe рассчитанные с потенциалом (24) по формулам (13)-(15). Другие линии показывают зависимости из [4]:

$$q = \text{const}, \qquad \gamma = \gamma(1)\left(\frac{V}{V_0}\right)^q ,$$

$$\Theta = \Theta(1)\exp\left\{\frac{\gamma(1)}{q}\left[1-\left(\frac{V}{V_0}\right)^q\right]\right\} , \qquad (25)$$

где Θ(1) = 478.463 K и γ(1) = 1.701 – взяты равными полученным нами при V/V_0 = 1, а второй параметр Грюнайзена брался: q = 0.69 – пунктир, q = 1 – точечная, q = 1.7 – штрих-пунктир, ибо экспериментальная оценка величины q изменяется в этом интервале [4]. Зависимость из (25) имеет максимум при: $\Theta(0) = \Theta(1) \exp[\gamma(1)/q]$, т.е.:

Θ(0) = 5629.5 K для q = 0.69,

Θ(0) = 2621.7 K для q = 1,

Θ(0) = 1301.4 K для q = 1.7.

Экспериментальные Θ и γ при V/V_0 = 1 (т.е. при P = 0) лежат в интервале [2, стр. 52]: Θ = 420 ÷ 478 K, γ = 1.4 ÷ 1.81, что хорошо согласуется с нашими оценками. Наша зависимость q(V/V0) при V/V0 = 0 достигает максимума: 3.42.

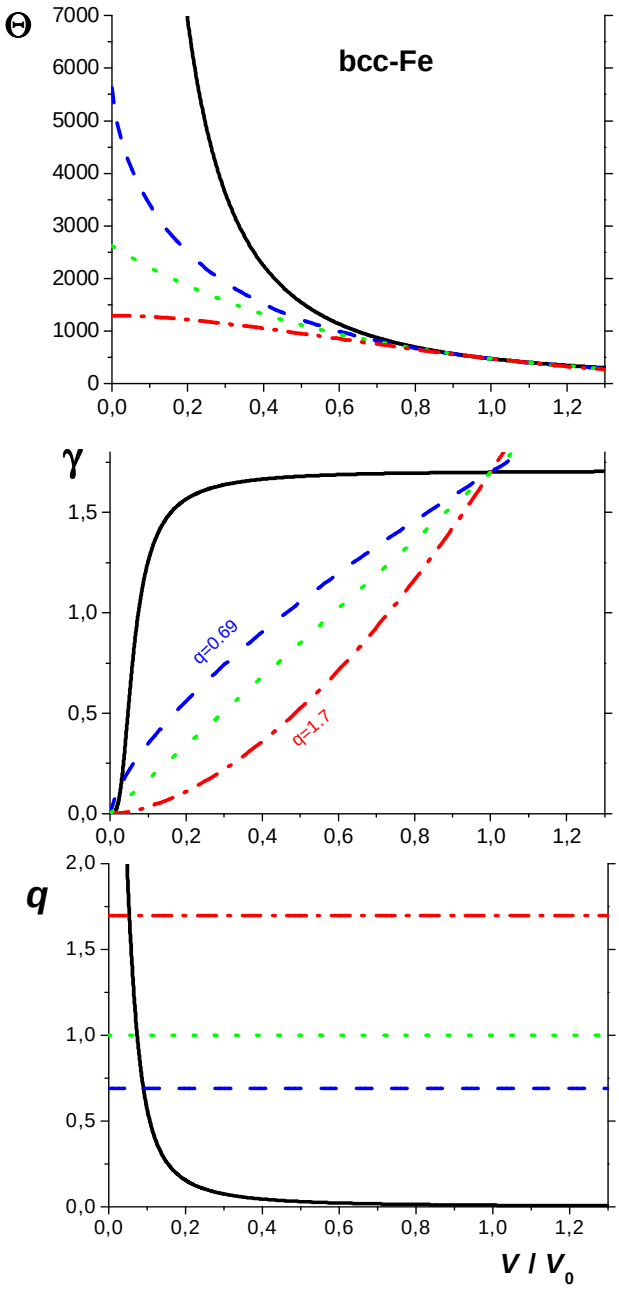


Рис.1.

Отметим, что здесь мы не учитываем электронный вклад в γ, ибо мы рассчитываем температуру Дебая для решетки нейтральных атомов.

Расчет изотермической зависимости функций ϕv , xd , Df и σ от V/V0, был проведен по формулам (3), (7), (10) и (17), соответственно. В таблице 1 представлены результаты расчетов логарифмов активационных параметров и поверхностной энергии при V/V0 = 1 (т.е. при P ≅ 0) полученные для ОЦК-железа с потенциалом (24).

Таблица 1.

T, K	$-\lg(\phi_v)$	$-\lg(x_d)$	$-\lg(D_f/[\text{см}^2/\text{с}])$	σ(100), мДж/м^2
300	38.083	56.842	59.579	2223.16
3000	4.867	5.807	8.545	2045.43

Оценки других авторов для $\lg(\phi_v)$, $\lg(D_f)$ и $\sigma(100)$ при $P = 0$ и температурах близких к плавлению железа (T_m = 1810 K) лежат в интервале [2, стр. 250, 367, 416]:

$-\lg(\phi_v) = 2.43 \div 3$, $\quad -\lg(D_f/[\text{см}^2/\text{с}]) = 7.1 \div 8.7$, $\quad \sigma(100) = 1720 \div 2480$ мДж/м^2.

Легко видеть, что согласие рассчитанных значений с экспериментальными вполне хорошее. При этом необходимо учесть, что при изобарическом (при $P \cong 0$) нагреве железа до предплавительных температур (при которых обычно и определяются в эксперименте активационные параметры) вызовет превышение аргументом V/V_0 единицы.

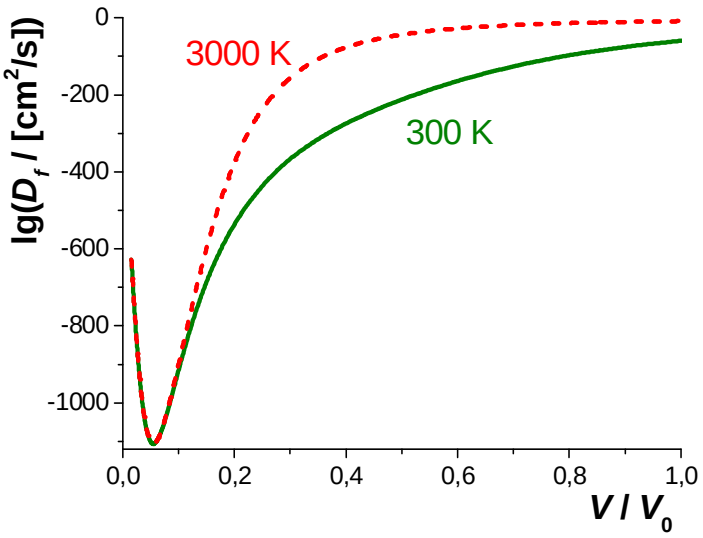


Рис.2.

Расчеты показали, что изотермические зависимости функций ϕ_v , x_d и D_f от V/V_0 , образуют минимумы при $\mathbf{(V/V_0)_{min} = 0.0549}$, после чего они растут при дальнейшем сжатии. При $V/V_0 < 0.1$ данные функции уже не зависят от температуры. На **рис.2** показана зависимость $\lg(D_f)$ от V/V_0, при 300 K (сплошная линия) и 3000 K (пунктирная линия). Параметры минимумов для логарифмов других активационных функций, полученные с потенциалом (24) представлены в **таблице 2**, где указаны также и оценки давления для данных сжатий.

Таблица 1.

T, K	$(V/V_0)_{min}$	$-\lg(\phi_v)_{min}$	$-\lg(x_d)_{min}$	$-\lg(D_f/[\text{см}^2/\text{с}])_{min}$	$P(V/V_0)_{min}$, Мбар
300	0.0549	706.3	1104.0	1106.2	67985.0
3000	0.0549	706.3	1104.0	1106.2	67985.0

На **рис.3** показаны изотермы сжатия удельной (на единицу площади) поверхностной энергии грани (100) ОЦК-железа (с учетом, как образования вакансий, так и делокализации атомов), рассчитанные с потенциалом (24) по формуле (17). Функция $\sigma(V/V_0)$ достигает максимума при небольших сжатиях $(V/V_0)_{max}$, после чего резко уменьшается, переходя при $(V/V_0)_{fr}$ в область отрицательных значений. Именно такое поведение поверхностной энергии и было получено другим методом в работах А.И. Темрокова и др. [5, 6] при 0 K.

В таблице 3 представлены координаты точки максимума (V/V0)max и точки фрагментации (V/V0)fr на изотермах зависимости σ(V/V0). Там же указаны и соответствующие данным точкам давления на изотермах 300 и 3000 K (см. рис. 3), полученные для ОЦК-железа с потенциалом (24) из выражений (19) – (23).

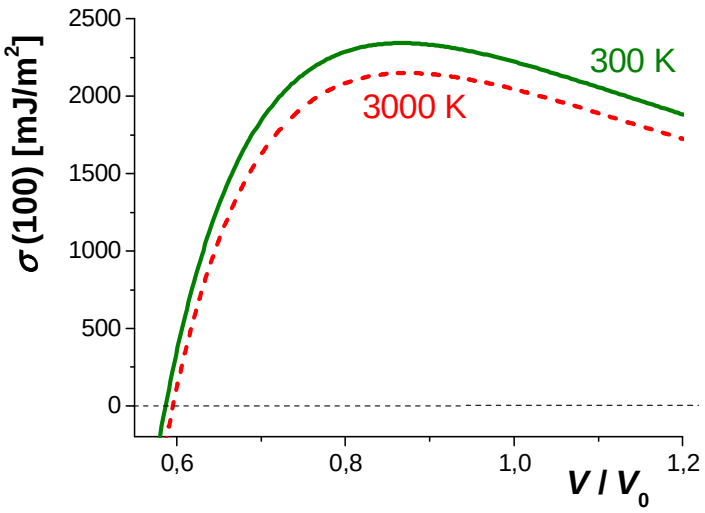


Рис.3.

Таблица 3.

T K	$(V/V_0)_{max}$	σ_{max} мДж/м^2	$P(\sigma_{max})$ кбар	$(V/V_0)_{fr}$	$P(\sigma = 0)$ Мбар
300	0.867	2343.6	457.55	0.586	5.35
3000	0.873	2150.3	611.06	0.596	5.18

На рис.4 показаны изотермы сжатия термического уравнения состояния ОЦК-железа, рассчитанные с потенциалом (24). Там же представлены экспериментальные зависимости для холодной (упругой) составляющей давления, взятые из обзора [4]:

$$P_x = \rho_0 C_0^2 [(V/V_0)^{-n} - 1] / n \ . \qquad (26)$$

Ввиду отсутствия параметров для высокобарической фазы ОЦК-β-Fe, мы использовали параметры, которые приведены в обзоре А.И. Фунтикова [4]: для ГПУ-ε-Fe (полученные до ~ 2.5 Мбар): ρ_0 = 8.3 г/см^3, C_0 = 4.444 км/с, n = 4.88, для ГЦК-γ-Fe (полученные до ~ 0.4 Мбар): ρ_0 = 7.98 г/см^3, C_0 = 4.57 км/с, n = 4.0,

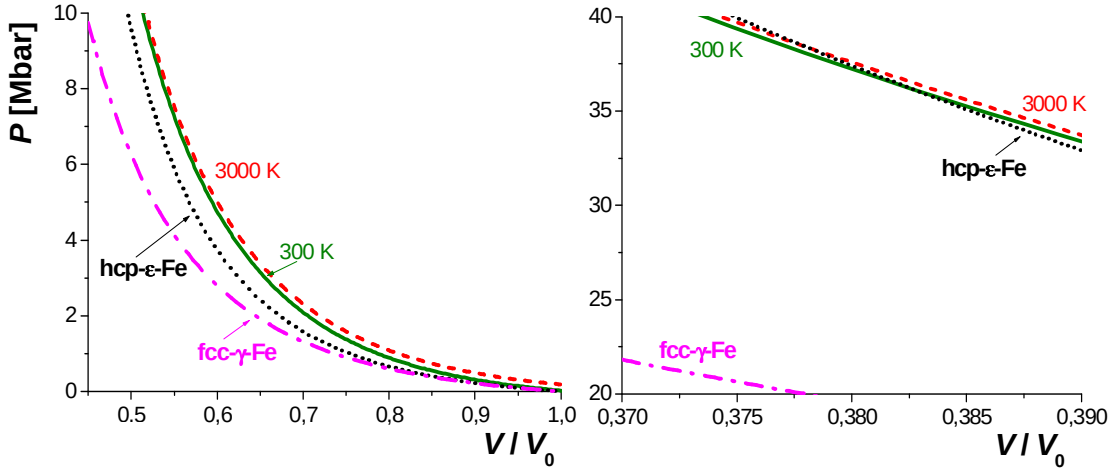


Рис.4.

Как видно из рис.4 (слева), при небольших сжатиях наши зависимости P(V/V0) для 300 K (сплошная линия) и 3000 K (пунктир) лежат несколько выше, чем экспериментальные зависимости упругих изотерм: точечная линия – упругая изотерма (26) для ГПУ-ε-Fe, штрих-пунктирная линия – упругая изотерма (26) для

ГЦК-γ-Fe [4]. Но если учесть, что помимо Px в общее давление входят вклады от тепловой и электронной составляющих внутренней энергии (которые всегда положительны [4]), то согласие между нашими зависимостями и экспериментальными улучшатся. Но, как видно из правого рис. 4, при больших степенях сжатия наши зависимости пересекают зависимость Px(V/V0) для ГПУ-ε-Fe: при V/V0 = 0.382 и P = 36.3 Мбар для 300 K, и при V/V0 = 0.377 и P = 38.5 Мбар для 3000 K. На основе полученных изотерм оценены давления в характерных точках зависимостей активационных параметров ОЦК-железа, которые приведены в таблицах 2 и 3.

Обсуждение полученных результатов. Как видно из рис. 1 при V/V0 = 0 величина температуры Дебая достигает максимума, что обусловлено квантовыми эффектами: при сверхсильном сжатии (т.е. при V/V0 < (V/V0)min или при P > P(V/V0)min) растет роль энергии «нулевых колебаний», т.е. Aw $\rightarrow \infty$ и kb Θ / D $\rightarrow$ 4/ξ. Поэтому при P $\rightarrow \infty$ возрастания функции Θ(P) до бесконечности не происходит.

Это объясняется тем, что при V/V0 < (V/V0)min (или при P > P(V/V0)min) межатомное расстояние становится сравнимым с амплитудой колебаний атомов, что приводит к подбарьерному туннельному переносу атомов по объему кристалла. Усиление туннельной миграции атомов приводит к росту эффективного числа пустующих узлов решетки. Рост вероятности подбарьерного туннельного активационного процесса при V/V0 < (V/V0)min (или при P > P(V/V0)min) приводит к усилению активационного процесса в кристалле при сжатии, и к независимости активационных параметров от температуры, что ясно видно из рис. 2. Такой же эффект независимости активационных параметров от температуры наблюдается в квантовых кристаллах гелия при T ≅ 0 K [2, стр. 287]. В них самодиффузия обусловлена уже не тепловым возбуждением атомов, а уменьшением при T $\rightarrow$ 0 K межатомного расстояния, и соизмеримостью его с амплитудой «нулевых колебаний» атомов. При этом функция Ed / kb T, определяющая изменение величины xd по формуле (7), имеет вид:

$$\lim_{\frac{\Theta_{eo}}{T} \rightarrow \infty} \left(\frac{E_d}{k_b T} \right) = \frac{2E_{d1}}{k_b \Theta_{eo}} = \frac{3m\, c_o{}^2 k_b \Theta_{eo}}{\left(2\pi \hbar\, k_p{}^{1/3}\right)^2} \quad . \qquad (27)$$

Аналогичное сближение амплитуды тепловых колебаний атомов с величиной межатомного расстояния происходит и при сжатии кристалла в области V/V0 < (V/V0)min. Но здесь усиление квантовых эффектов происходит не за счет изобарического уменьшения температуры в отношении Θeo / T, а за счет сильного роста величины Θeo при изотермическом сжатии кристалла. Но при барическом туннелировании функция co2Θeo уменьшается при сжатии в области V/V0 < (V/V0)min.

Отметим, что на возможность перехода вещества в состояние квантовой жидкости при сверхсильном сжатии кристалла в области низких температур было указано в работе В.И. Марченко [7].

Вместе с тем, при сжатиях до значений: (V/V0)min < V/V0 < (V/V0)fr , поверхностная энергия имеет отрицательное значение. В таких условиях кристалл стремится любым путем увеличить свою удельную (на атом) поверхность: свободную или межкристаллитную. Это ведет к усилению процессов приводящих к фрагментации кристалла. Флуктуационно отделившийся от кристалла и образовавший поверхность нанокристалл в таких условиях будет испытывать дополнительное «поверхностное» давление [2, гл. 6], которое еще более сожмет

флуктуационно отделившийся нанокристалл. Это приведёт к самосжатию образующихся при фрагментации нанокристаллов, и к освобождению некоторого пространства между нанокристаллами. Образующееся при этом «нанодисперсное» состояние вещества будет текучим, подобно жидкой фазе: оно примет форму сосуда, в котором находится. Таким образом, при сверхвысоких давлениях реализуется экзотермический процесс диспергирования макрокристалла на нанокристаллы, который, с одной стороны, приводит к резкому росту плотности образующихся нанокристаллов, а с другой – к резкому уменьшению вязкости образовавшейся «нанодисперсной» среды.

Исходя из данного эффекта барической экзотермической фрагментации, нами была выдвинута гипотеза, согласно которой наблюдающиеся на границе нижней мантии и верхнего ядра Земли (на глубине 2900 км) эффекты (резкое увеличение плотности, рост электропроводности с одновременным падением скорости сейсмических волн и вязкости вещества) можно объяснить переходом вещества в «нанодисперсное» текучее состояние под влиянием высоких P-T-условий [2, гл. 6; 3].

Легко понять, что при фрагментации возрастает роль межкристаллитной самодиффузии [8, гл. 4], что неизбежно ведет к росту эффективного коэффициента самодиффузии. Например, для металлов с ОЦК структурой отношение энергий активации самодиффузии по границам зерен (Eg) и в объеме равно [8, гл. 4]: Eg / Ed = 0.55 ÷ 0.7. Причем при плавлении всех металлов при P = 0 величина коэффициента межкристаллитной самодиффузии практически равна коэффициенту самодиффузии в объеме жидкого металла: Dg ≅ 10 – 5 см2/с. При переходе к нанокристаллическим средам коэффициент самодиффузии возрастает еще более [8, гл. 6].

Поэтому, полученные здесь результаты для изотерм Df(V/V0) при V/V0 < (V/V0)fr можно считать минимально возможными, справедливыми при отсутствии барической фрагментации кристалла. Отклонение измеренной изотермической зависимости Df(P) от зависимости полученной здесь можно использовать, как для индикации барической фрагментации, так и для оценки роли межкристаллитной самодиффузии в эффективной подвижности атомов по дисперсной среде.

Выводы:

1. Разработана методика и рассчитаны изотермические зависимости активационных параметров (как для образования вакансий, так и для самодиффузии) в ОЦК-железе при всестороннем сжатии до $V/V_0 = 0.001$, и при $T = 300$ и 3000 K.
2. Показано, что если при $V/V_0 > (V/V_0)_{min}$ происходит подавление активационных процессов при изотермическом сжатии и их усиление при изохорическом нагреве, то при $V/V_0 < (V/V_0)_{min}$ происходит усиление активационных процессов в кристалле при изотермическом сжатии, и к независимости активационных параметров от температуры. Это обусловлено квантовыми эффектами: при сверхсильном сжатии межатомное расстояние становится сравнимым с амплитудой колебаний атомов, что приводит к подбарьерному туннелированию атома в соседние ячейки.
3. Рассчитаны изотермические зависимости удельной поверхностной энергии для ОЦК-железа при всестороннем сжатии до $V/V_0 = 0.001$, и при $T = 300$ и 3000 K. Показано, что при $V/V_0 < (V/V_0)_{fr}$, поверхностная энергия имеет отрицательное значение, что должно стимулировать процесс фрагментации кристалла, который с одной стороны приводит к росту плотности образующихся

нанокристаллов, а с другой – к уменьшению вязкости образовавшейся нанодисперсной среды, и к росту в ней подвижности атомов.

4. Оценена изотермическая зависимость давления в ОЦК-железе при его сжатии до V/V_0 = 0.001, вдоль T = 300 и 3000 K. На основе полученных изотерм оценены давления в характерных точках зависимостей активационных параметров и поверхностной энергии ОЦК-железа.
5. Указано, что наблюдающиеся на границе нижней мантии и верхнего ядра Земли эффекты (резкое увеличение плотности и электропроводности с одновременным падением скорости сейсмических волн и вязкости вещества) можно объяснить переходом кристаллического вещества в «нанодисперсное» текучее состояние при высоких P-T-условиях, присущих границе нижней мантии и верхнего ядра Земли.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект № 2.1.19) и РФФИ (грант № 09–08–96508-р-юг-а).

Литература:

1. *Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетарных недр. М.: Наука, 1980. 448с.
2. *Магомедов М.Н.* Изучение межатомного взаимодействия, образования вакансий и самодиффузии в кристаллах. М.: Физматлит, 2010. 544с.
3. *Магомедов М.Н.* О барической фрагментации железа и природе геотермального тепла // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 6 (86). С.82–87.
4. *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.
5. *Темроков А.И.* Поверхностные явления в экстремальных условиях // В сб.: «Экстремальные состояния вещества» / Под ред. В.Е. Фортова и Е.А. Кузьменкова. М.: ИВТАН, 1991. 367 с. (С. 340 – 344).
6. *КяровА.Х., Темроков А.И., Хаев Б.В.* Теплофизические характеристики кристаллов инертных газов // Теплофизика Высоких Температур. 1997. Т. 35. № 3. С.386 – 390.
7. *Марченко В.И.* О фазах сжатого вещества // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2008. Т. 87. № 4. С.245–246.
8. *Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б.* Диффузия атомов и ионов в твердых телах. М.: МИСИС, 2005. 362с.

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ИХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАЛЕГАНИЯ

Эмиров С.Н.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: wemirov@mail.ru

Исследована эффективная теплопроводность осадочных горных пород (песчаника, алевролита, доломита) в условиях высоких давлений до 400МПа и температур (273-523)К. Установлено, что температурная и барическая зависимости теплопроводности существенно зависят от степени кристаллизации и блочности структуры породообразующих веществ.

Экспериментальные исследования тепловых свойств горных пород могут служить основой для разработки уравнения состояния и расчета термических и акустических свойств сложных неупорядоченных сред при высоких давлениях и температурах.

Механизм теплопереноса в твердых телах, особенно в горных породах, очень сложный. Даже при многих упрощениях теоретически точно определить теплопроводность пористых материалов затруднительно, а иногда и невозможно. Породы состоят из разных минералов с различным химическим составом, поэтому теплопроводность зависит не только от давления и температуры, но и от их минералогического состава, структуры и геометрии пор.

Имеющиеся в научной литературе результаты по экспериментальному исследованию теплопроводности твердых тел выполнены или только при высоких температурах, или при высоких давлениях. Работ, посвященных одновременному влиянию температуры и давления на теплопроводность твердых тел, в научной литературе недостаточно из-за трудности проведения эксперимента .

Исследования температурной зависимости теплопроводности горных пород и диэлектриков, начатые Эйкеным [1], показали, что для данных веществ теплопроводность обратно пропорциональна температуре

$$\lambda = CT^{-1} \quad . \qquad (1)$$

Дальнейший анализ температурной зависимости диэлектриков дан в работах Дебая [2], Пайерлса [3], Клеменса [4,5], Стильбанса [6], Могилевского [7], Оскотского и Смирнова [8], Займана [9].

Согласно существующим в настоящее время теоретическим и экспериментальным исследованиям зависимость фононной теплопроводности от температуры в твердых диэлектриках в области температур выше температуры Дебая можно описать уравнением

$$\lambda_{\Phi} = CT^{n}, \qquad (2)$$

где C–параметр, зависящий от упругих свойств вещества.

Показатель степени n в уравнении (2) является чувствительным параметром, зависящим от кристаллического состояния вещества и наличия дефектов [5,8,9]. Согласно этим работам n может иметь следующие значения:

$n \geq -1$ – для кристаллических соединений с малым количеством дефектов, у которых существует дальний порядок межатомных связей [5,8,9];

$n = -0.5$ – для кристаллических соединений с большим количеством дефектов [4,5];

$n = 0.5$ – для аморфных соединений, у которых отсутствует дальний порядок межатомных связей [9].

Зависимость относительной теплопроводности и показателя степени n диэлектриков от температуры можно представить в виде диаграммы (рис.1), которая показывает, что область между кривыми 1 и 2 относится к диэлектрикам с кристаллической структурой, в которых процесс теплопереноса осуществляется волновым механизмом. Кривая 3 относится к диэлектрикам с аморфной структурой, где механизм теплопереноса является активационный.

Как показывает рис.1, по величине и знаку показателя степени n в уравнении (2) можно классифицировать твердое тело по его кристаллическому состоянию и дефектности структуры.

Анализируя поведение температурной зависимости эффективной теплопроводности горных пород из работ [10-13] и наших экспериментальных данных, полученных раннее [14-19], можно сделать вывод, что для горных пород, содержащих в своей структуре как кристаллические, так и аморфны соединения, показатель n может находиться в области между кривыми 2 и 3, т.е. $n \approx -0.4 \div +0.5$. Случай, когда $n=0$ описан в работах [10-12,14,20].

Величина фононной теплопроводности твердых тел в области температур выше температуры Дебая существенно зависит от молекулярного веса (M), типа химической связи и межатомного расстояния (α), характеристической температуры Дебая (θ), параметра Грюнайзена (γ) и может быть описана формулой Лейбфрида-Шлемана [9,21]:

$$\lambda = const \frac{M\alpha\theta^3}{\gamma^2 T} \qquad (3)$$

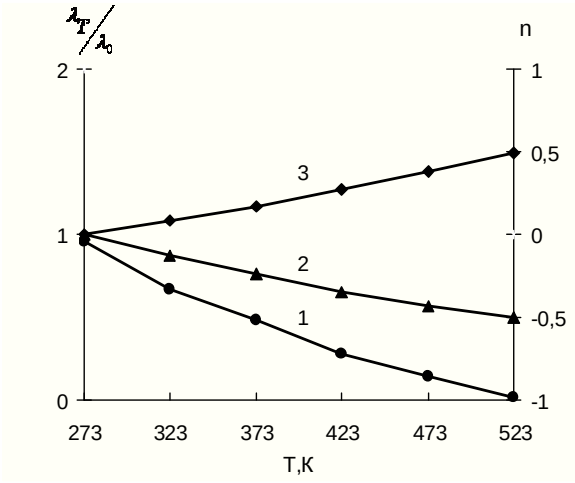


Рис.1. Зависимость относительной теплопроводности диэлектриков от температуры и показателя степени.

Однако на процессы распространения и рассеяния фононов в кристаллических твердых телах существенное влияние оказывают дефекты и дислокации. В работах [4,5] показано, что, если время релаксации фононов при 3-х фононных процессах рассеяния одного порядка со временем релаксации фононов при рассеянии на дефектах и дислокациях, то $n \rightarrow -0.5$ в равенстве (2).

Давление, с одной стороны, увеличивая максимальную частоту колебания атомов кристаллической решетки, приводит к изменению наклона дисперсной кривой и увеличению характеристической температуры Дебая [13,20,22], с другой – создает условия для изменения ее дислокационной структуры. Согласно работам [23,24] под давлением дефекты, перемещаясь по кристаллу, создают на границе блоков поликристаллических соединений «стенки дислокаций». В

работах [25,26] показано, что границы блоков в поликристаллическом твердом теле под давлением переходят в неравновесное возбужденное состояние. Рассеяние тепловых волн на вибрации дислокаций теоретически обосновано в работе [27].

Если рост характеристической температуры Дебая под давлением должен приводить к увеличению теплопроводности твердого тела согласно закону (3), то изменение дислокационной структуры может существенно влиять на температурную зависимость теплопроводности (2) и приводить к ее ослаблению.

Наблюдаемый интенсивный рост теплопроводности твердых тел до 100 МПа и дальнейшее его ослабление может свидетельствовать о возникновении процессов дополнительного рассеяния тепловых волн под давлением. Наши ранние исследования фононной теплопроводности под давлением полупроводниковых соединений InSb и GaSb в моно- и поликристаллическом состояниях [14,28,29] позволили сделать предположения о том, что нелинейная зависимость теплопроводности и дополнительное рассеяние тепловых волн возникают только в поликристаллических образцах (блочных структурах). Зависимость теплопроводности от давления в монокристаллических образцах подчиняется линейному закону.

Результаты эксперимента. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективной теплопроводности образцов осадочных горных пород в условиях высоких гидростатических давлений до 400 МПа в интервале температур (273-523)К: –песчаника – Дагестан, м/р Сухокумск, скв. "Юбилейная-48, гл. 4500-4900м, $\rho=2.28\cdot10^{-3}$ кг·м$^{-3}$, открытая пористость 7% ; –алевролита – Дагестан, Дмитровское газоконденсатное месторождение, скв. Д44, гл. 4570-4574м, $\rho=2.17\cdot10^{-3}$ кг·м$^{-3}$, открытая пористость 1-2%; –доломита – Дагестан, Дмитровское газоконденсатное месторождение, скв. Д44, гл. 4247-4248м, $\rho=2.70\cdot10^{-3}$ кг·м$^{-3}$, открытая пористость 1-2%.

Для измерения теплопроводности был использован один из вариантов абсолютного компенсационного метода плоских пластин в стационарном тепловом режиме [15,30].

Результаты экспериментальных исследований образцов песчаника представлены на рис. 2,3 и в таблице 1.

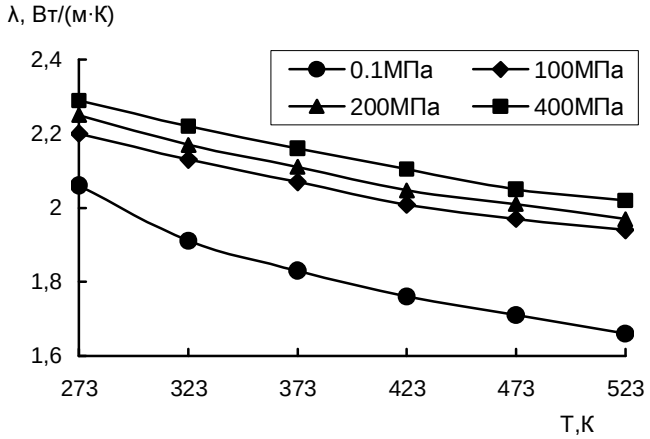


Рис.2. Зависимость теплопроводности песчаника от температуры при различных давлениях.

Как видно из рис.2, при атмосферном давлении эффективная теплопроводность песчаника обратно пропорциональна температуре и может

быть описана уравнением (2). Полученное низкое значение n= –0.28 (см. табл.1) указывает на наличие в данном образце кварцевых соединений с разной степенью кристаллизации, что приводит к разным механизмам теплопереноса (волновому и активационному).

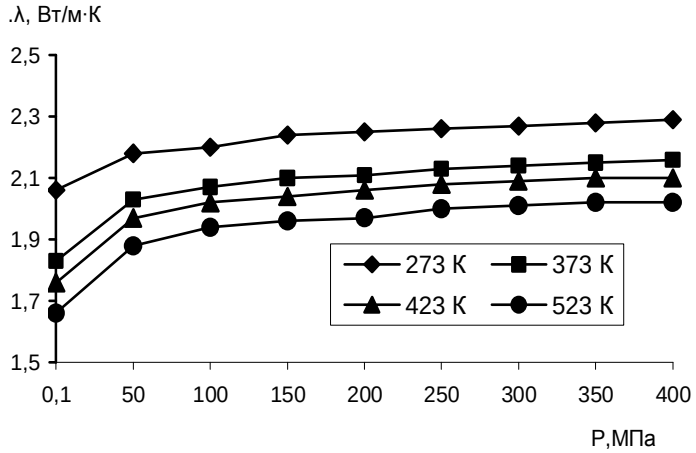


Рис.3. Зависимость теплопроводности песчаника от давления при различных температурах.

Давление до 400 МПа (рис.3) приводит к нелинейному росту величины эффективной теплопроводности: максимальному – порядка 80% до 100 МПа и далее плавному переходу на насыщение.

Давление также влияет и на температурную зависимость теплопроводности: если при P=0.1 МПа n= –0.28, то при P=400 МПа n= –0.19. Такое уменьшение показателя степени n в уравнении (2) может указывать на то, что под давлением возникают процессы дополнительного рассеяния тепловых волн [26,27]. Учитывая сказанное выше, влияние давления и температуры на эффективную теплопроводность образцов песчаника можно описать уравнением

$$\lambda_{эф}(P,T)=C(P)T^{n(P)}, \qquad (4)$$

где значения $C(P)$ и $n(P)$ указаны в таблице 1.

Таблица 1. Теплопроводность ($Вт \cdot м^{-1}К^{-1}$) песчаника в зависимости от температуры и давления.

T, K	P, МПа								
	0,1	50	100	150	200	250	300	350	400
273	2.06	2.18	2.2	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29
323	1.91	2.10	2.13	2.16	2.17	2.19	2.20	2.21	2.22
373	1.83	2.03	2.07	2.10	2.11	2.13	2.14	2.15	2.16
423	1.76	1.97	2.07	2.04	2.06	2.08	2.09	2.10	2.10
473	1.71	1.92	1.97	2.00	2.01	2.04	2.05	2.06	2.05
523	1.66	1.88	1.94	1.96	1.97	2.00	2.01	2.02	2.02
n	–0.28	–0.23	–0.20	–0.20	–0.20	–0.19	–0.19	–0.19	–0.19
C, $Вт\ м^{-1}$	9.87	7.82	6.80	7.09	7.08	6.49	6.48	6.48	6.48

Результаты экспериментальных исследований для образцов алевролита представлены на рис.4,5 и в таблице 2, которые показывают, что с увеличением температуры теплопроводность линейно растет. Это свидетельствует о преобладании в структуре алевролита вещества в аморфном состоянии [12,31,33]. Давление приводит к нелинейному росту теплопроводности алевролита (рис. 5), переход на насыщение наблюдается в области давлений до P=100 МПа.

Существенное влияние на теплопроводность под давлением оказывает температура. Так, рост теплопроводности под давлением при T=273К составляет λ_P/λ_0=1.36, а при T=523К – λ_P/λ_0=1.07, что указывает на ослабление барической зависимости теплопроводности при увеличении температуры.

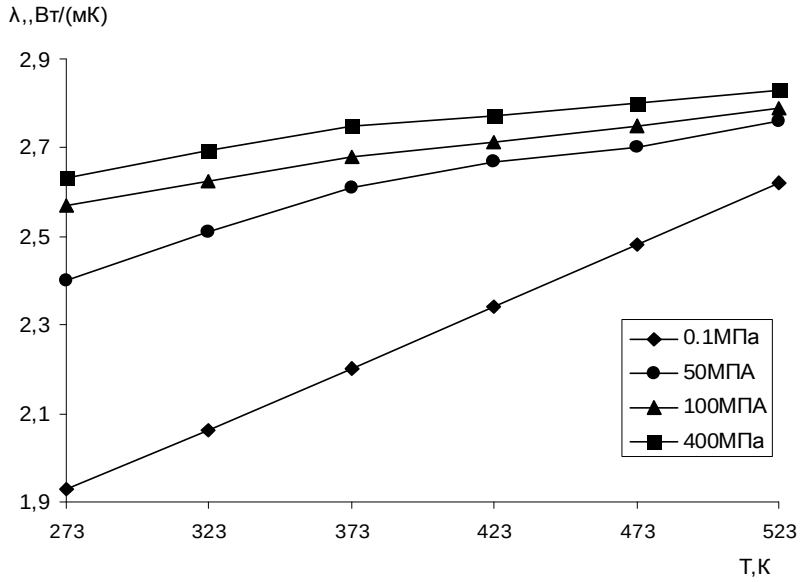


Рис.4. Зависимость теплопроводности алевролита от температуры при различных давлениях.

Влияние давления и температуры на теплопроводность образцов алевролита может быть описано равенством (4), где значения $C(P)$ и $n(P)$ указаны в таблице 2.

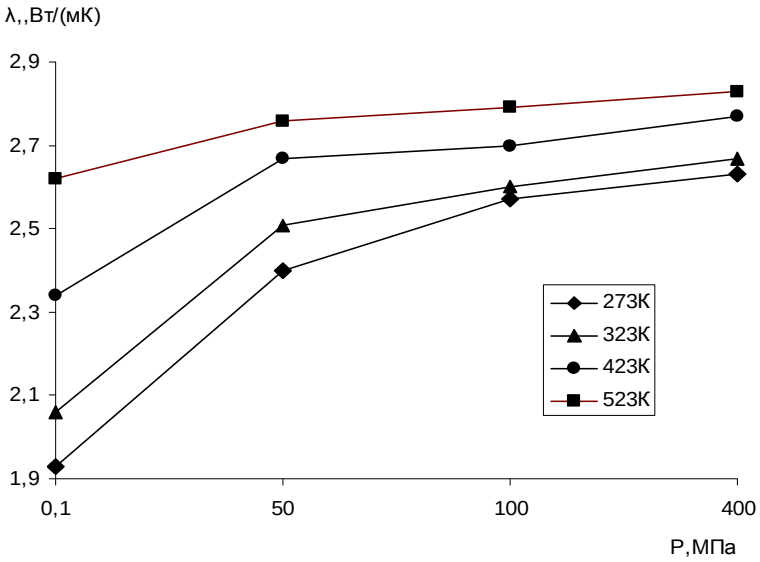


Рис.5. Зависимость теплопроводности алевролита от давления при различных температурах.

Экспериментальные исследования образцов доломита показали, что в области температур (273-523)К теплопроводность не меняется в пределах ошибки измерения и равна $\lambda_{эф}$=3.14Вт $м^{-1}К^{-1}$, что указывает на наличие в структуре доломита соединений как в кристаллическом, так и аморфном состояниях (т.е. n=0).

Под действием давления теплопроводность доломита (рис.6) сначала линейно растет, а затем переходит на насыщение в области P=100 МПа.

Некоторые авторы [31-33] объясняют наблюдаемый интенсивный рост теплопроводности горных пород при давлениях до 100 МПа процессами захлопывания микропор, трещин и уплотнением блоков. Если исходить из данного объяснения, то при снижении давления должен наблюдаться гистерезис. Однако, наши экспериментальные значения теплопроводности, полученные при подъеме и спуске давления, воспроизводились в пределах ошибки измерения и гистерезиса не наблюдалось. О наличии гистерезиса не указывается и в работах других авторов. Как было сказано ранее, такой ход теплопроводности можно объяснить возникновением под давлением дополнительного рассеяния тепловых волн.

Таблица 2. Теплопроводность (Вт·м$^{-1}$К$^{-1}$) алевролита в зависимости от температуры и давления.

T, C	P, МПа									λ_p / λ_0
	0.1	50	100	150	200	250	300	350	400	
273	1.93	2.40	2.57	2.59	2.60	2.62	2.63	2.63	2.63	1.36
323	2.06	2.51	2.60	2.63	2.64	2.66	2.67	2.67	2.67	1.29
373	2.20	2.61	2.68	2.71	2.72	2.73	2.75	2.75	2.75	1.24
423	2.34	2.67	2.70	2.73	2.74	2.76	2.77	2.77	2.77	1.18
473	2.48	2.70	2.75	2.77	2.78	2.79	2.80	2.80	2.80	1.13
523	2.62	2.76	2.79	2.80	2.81	2.82	2.83	2.83	2.83	1.07
n	0.47	0.22	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.105	0.105	
C, Вт м$^{-1}$К$^{-2}$	0.14	0.72	1.27	1.32	1.33	1.39	1.39	1.40	1.40	

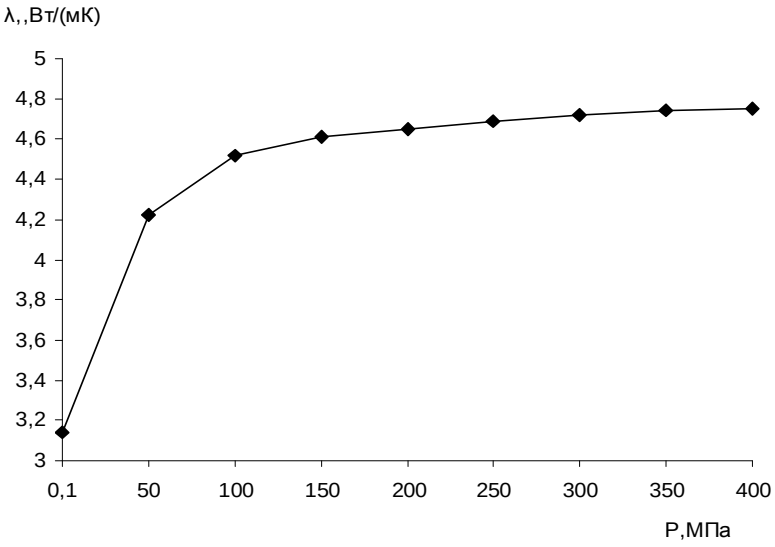


Рис.6. Зависимость теплопроводности доломита от давления.

Заключение. В заключении можно отметить следующие результаты, полученные в работе.

1. Экспериментальные данные по влиянию температуры на эффективную теплопроводность песчаника, алевролита и доломита значительно отличаются от закона Эйкена (1) и их можно описать равенством

$$\lambda_{эф}(T) = CT^{\pm n},$$

где значение $n \approx -0.5 \div +0.5$ (рис.1). Аналогичная слабая температурная зависимость $\lambda_{эф}$ горных пород получена в работах [10, 11,20].

2. Под влиянием гидростатического давления интенсивный рост $\lambda_{эф}$ исследованных горных пород наблюдается в основном до 100 МПа, а далее

кривая барической зависимости плавно переходит на насыщение. По экспериментальным данным, представленным в таблицах 1-3, следует, что показатель степени *n* являются функцией давления (для алевролита показано на рис.7).

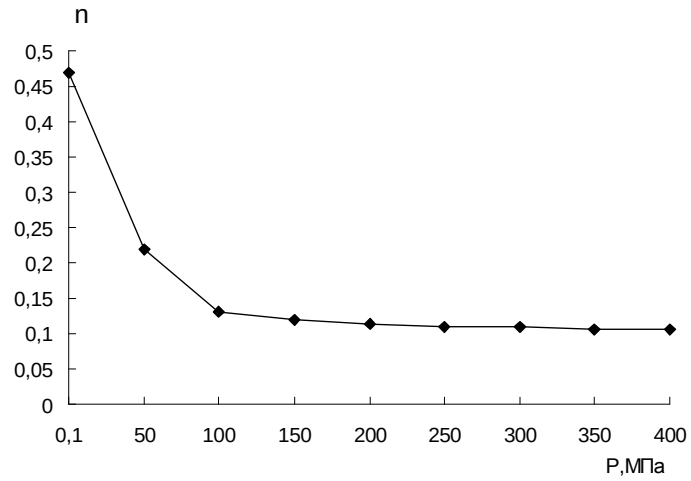


Рис.7. Зависимость показателя степени *n* от давления для алевролита.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00651-а.

Литература:

1. *Eucken A.* Uber die Temperaturabhangigkeit der Warmeleitfahigkeit fester Nichtmetalle. Ann. Phys. 34. 1911. 185.c.
2. *Debye P.* Vortrage uber die Kinetische Theorie der Materie und Electricitat. Berlin, 1914.
3. *Пайерлс Р.* Квантовая теория твердых тел.М.: И.Л., 1956. 324 с.
4. *Klemens P.G.* // Solid St. Physics. 1958. Proc 7. Symp. on Thermophys. properties. P.1.
5. *Klemens P.G.* // Proc.7 Symp. on Thermophys. properties. Hol., New-Jork. 1977. N4. P.100.
6. *Стильбанс Л.С.* Физика полупроводников. М.: Сов.радио, 1967. 452с.
7. *Могилевский Б.М., Чудновский А.Ф.* Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972. 535 с.
8. *Оскотский В.С., Смирнов И.А.* Дефекты в кристаллах и теплопроводность. М.: Наука, 1972. 157 с.
9. *Займан Дж.* Электроны и фононы. М.: И.Л., 1962. 1124 с.
10. *Кларк С.* мл. Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 543с.
11. *Horai K., Susaki J.* // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. V.55. P.292.
12. *Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И., Буртный П.А.* Петрофизические исследования при высоких РТ-параметрах и их геофизические приложения. Киев: Наука думка, 1988. 248с.
13. *Hughes D.S. and Savin F.* // Phys.Rev. 1967. V 161. №3. P.861-863.
14. *Эмиров С.Н.* Экспериментальные исследования теплопроводности полупроводников и горных пород при высоких давлениях и температурах. Дисс. д.т.н. МЭИ. 1997.
15. *Эмиров С.Н., Рамазанова Э.Н.* // ТВТ. 2007. Т.45. №2. С.1.

16. *Рамазанова А.Э. Эмиров С.Н.* // Тр. межд. симп. "Упорядочение в минералах и сплавах". Сочи, ОМА-12. 2009. С.245.
17. *Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н.* // Тр. межд. симп. "Термодинамика неупорядоченных сред и пьезоактивных материалов" (TDM&PM). Пятигорск, 2009. С. 238.
18. *Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н.* // Изв. РАН, сер.физ. 2010. Т.74. №5. С.725.
19. *Z.Z. Abdulagatova, I.M. Abdulagatov, S.N. .Emirov.* // J. of Petroleum Science and Engineering. 2010. 73. P.141.
20. *Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И.* Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. Киев: Наука думка, 1986. 200с.
21. *Leibfrid G., Schloeman E.* // Nach. Acad. Wiss. Gottingen Nat. Physik. 1954. K.1. 2. P.71.
22. *Родионов К.П.* // Ж.Т.Ф. 1956. Т XXVI. В.2. С.375.
23. *Стрельцов В.А., Зайцев В.И., Рюмшина Т.А.* // Физика и техника высоких давлений. 1980. №7. С.8.
24. *Стрельцов В.А.* // Физика и техника высоких давлений. 1983. №14. С. 24.
25. *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. 214с.
26. *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Явление образования в поликристаллах неравновесных границ зерен при поглощении ими решеточных дислокаций // Бюлл. Открытия. Изобретения. 1977. №7. Диплом №339.
27. *Toshiyuki Nimomiya.* // J. of the Phys.Soc.of Japan. 1968. V.25. №3. P.830.
28. *Амирханов Х.И., Магомедов Я.Б., Эмиров С.Н., Крамынина Н.Л.* // Физика и техника высоких давлений. 1982. №7. С.61.
29. *Эмиров С.Н., Булаева Н.М., Рамазанова Э.Н.* // Физика и химия обработки материалов. 2009. №4. С.60.
30. *Emirov S.N.* // High Pressure Investigation in Geosciences. Ch.3. 1989. P.123.
31. *Воларович М.П., Баюк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С.* Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М.:Наука. 1974. 223с.
32. *Seipold U., Engler R*// Gerlands. Beitz. Geophysik Leipzig. 1981. 90. №1. P.65.
33. *Любимова Е.А.* Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. 279с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В БИНАРНЫХ СИСТЕМАХ ВОДА-СПИРТ И СПИРТ-Н.АЛКАН

Базаев А.Р.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: emilbazaev@mail.ru

Методом пьезометра постоянного объема измерена зависимость величины давления насыщенных паров смесей вода-алифатический спирт (метанол, этанол, н-пропанол) и этанол-н.алкан (пентан, гексан, гептан, октан) в двухфазной области и в околокритическом состоянии. Определены параметры фазовых переходов жидкость-газ и газ-жидкость. Оценены величины критических параметров смесей в зависимости от состава. Получены критические кривые смесей.

Знание термодинамических свойств бинарных растворов (смесей), образованных как полярными компонентами (вода–спирт), так и полярными и неполярными компонентами (спирт–углеводород) важно для реализации технологических процессов сверхкритической флюидной экстракции (СКФЭ), сверхкритического водного окисления (СКВО) и повышения эффективности использования энергии нетрадиционных возобновляемых источников (НВИЭ) [1-4]. Вместе с тем фундаментальные исследования свойств подобных систем представляют интерес для развития термодинамической теории растворов [5].

В данной работе приведены результаты исследования p,ρ,T,x-зависимостей водных растворов алифатических спиртов (метанол, этанол, н-пропанол) и растворов спирт–углеводород (н-пентан, н-гексан, н-гептан, н-октан) в двухфазной и околокритической области параметров состояния (рис.1). По экспериментальным p,ρ,T,x данным определены значения параметров фазовых переходов жидкость-пар и пар-жидкость (табл.1). На рис.2,3 приведены диаграммы в некоторых сечениях термодинамической поверхности этих растворов. Как видно, по форме кривые сосуществования жидкой и паровой фаз этих гомогенных растворов и их чистых компонентов идентичны.

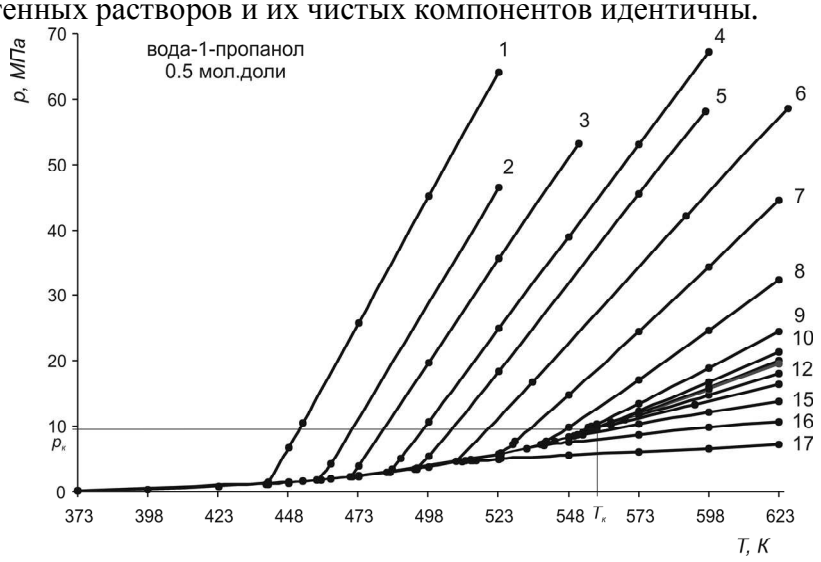


Рис.1. Изохоры зависимости давления пара раствора вода–н-пропанол состава 0.5 мол.доли от температуры для значений плотности, *кг/м*^{3}: 1 - 689.3, 2 – 660.8, 3 - 642.5, 4 - 617.1, 5 - 598.6, 6 – 562.4, 7 - 523.5, 8 - 466.0, 9 - 391.6, 10 - 343.0, 11 - 320.9, 12 - 304.8, 13 - 271.1, 14 - 225.3, 15 - 164.8, 16 - 111.5, 17 - 63.5.

Из этого экспериментального факта можно сделать важный вывод о том, что математические критерии описания критического состояния индивидуального вещества

$$\left(\partial p/\partial \rho\right)_T^C = 0\,, \quad \left(\partial^2 p/\partial \rho^2\right)_T^C = 0\,, \left(dp/dT\right)_{T=T_C} = \left(\partial p/\partial T\right)_{T=T_C,\rho=\rho_C} \qquad (1)$$

[6] могут быть применимы для оценки критических параметров смесей вода–спирт и спирт–н-алкан.

Таблица 1. Экспериментальные значения параметров фазовых переходов в системах вода–алифатический спирт и спирт–н-алкан (значения критических параметров выделены жирным шрифтом) состава, x - мол.доля второго компонента.

T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3	T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3	T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3
Вода–метанол 0,5			Вода–этанол 0,5			Вода–н-пропанол 0,2		
424,15	1,23	739,17	458,15	2,22	659,31	581,45	12,39	465,18
461,15	2,64	697,29	483,15	3,48	613,37	593,15	14,06	407,39
479,15	3,63	668,14	499,15	4,60	579,27	597,65	14,99	337,48
510,15	6,27	590,89	504,45	5,02	566,25	597,85	15,03	327,17
538,15	9,50	499,05	508,55	5,38	553,32	598,15	15,05	312,33
555,15	11,71	419,47	511,45	5,65	545,61	**598,20**	**15,05**	**303,20**
563,15	13,22	358,96	521,65	6,63	519,24	598,15	15,04	302,81
564,65	13,41	320,52	536,15	8,37	460,94	597,85	14,84	278,00
565,15	**13,45**	**292,20**	543,25	9,35	421,85	596,65	14,45	241,66
565,05	13,42	282,06	543,65	9,40	418,64	593,15	13,76	202,34
564,15	13,19	245,14	543,95	9,43	416,96	580,15	11,60	136,33
561,15	12,56	196,54	550,15	10,09	382,99	565,15	9,31	87,20
555,15	11,39	148,95	554,15	10,65	351,22	549,15	7,16	60,35
541,15	9,51	98,92	**556,20**	**10,90**	**282,00**	Вода–н-пропанол 0,5		
530,15	7,85	72,57	556,15	10,86	281,06	470,85	2,33	642,01
512,15	5,32	41,62	555,75	10,75	254,71	483,95	2,95	617,32
Вода–метанол 0,8			555,15	10,55	232,91	494,15	3,56	597,98
431,15	1,58	665,92	550,15	9,82	170,06	524,65	5,93	523,08
477,15	4,07	582,33	540,15	8,46	116,65	539,15	7,44	465,30
487,15	4,81	558,66	530,15	7,01	83,90	552,15	8,80	390,80
507,15	6,81	490,61	523,15	6,03	68,86	555,85	9,31	342,27
520,15	8,33	433,77	513,15	5,08	55,66	556,45	9,42	319,87
530,15	9,58	364,86	513,15	5,08	55,66	556,85	9,45	303,77
532,15	10,01	328,93	Вода–этанол 0,8			**557,00**	**9,45**	**287,50**
532,95	10,13	297,04	470,15	2,93	590,62	556,85	9,40	270,46
533,15	**10,15**	**285,50**	486,15	4,09	555,32	555,65	9,10	224,78
532,65	10,03	255,74	499,45	4,96	517,21	550,15	8,45	164,48
529,65	9,43	198,40	514,25	6,31	452,90	539,15	7,26	111,23
519,15	8,04	133,99	515,15	6,41	447,03	514,15	4,76	63,42
506,15	6,43	87,51	**516,15**	**6,51**	**440,62**	Вода–н-пропанол 0,8		
478,15	3,83	39,26	522,15	7,05	406,48	473,65	2,16	603,48
Вода–этанол 0,2 м.д.			525,15	7,35	383,33	481,15	2,52	585,57
539,15	7,65	619,96	527,15	7,52	367,96	496,15	3,31	553,72
565,15	10,81	548,30	529,65	7,86	312,83	516,15	4,69	493,28
585,15	13,97	453,52	529,75	7,87	307,49	533,45	5,90	413,06
591,15	14,74	418,77	530,00	7,90	280,10	538,15	6,23	371,60
600,15	15,74	350,96	529,65	7,74	261,02	540,65	6,44	322,33
600,65	15,94	324,98	529,15	7,59	244,18	540,95	6,45	294,94
601,00	15,99	308,31	525,65	6,95	188,87	**541,10**	**6,45**	**284,20**
601,15	**16,10**	**293,40**	510,15	5,55	115,27	541,05	6,43	276,40
601,00	15,85	286,70	493,15	3,93	53,34	540,65	6,36	249,56
599,15	15,09	221,72	Вода–н-пропанол 0,2			538,65	6,05	196,78
586,15	13,08	138,15	529,65	5,97	626,99	530,15	5,30	133,93
571,15	10,52	90,16	548,15	7,84	580,63	505,15	3,49	64,92
561,15	8,82	67,68	562,15	9,51	541,50	483,15	2,34	40,87

Таблица 1. (продолжение)

T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3	T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3	T_s, K	p_s, МПа	ρ_s, кг/м^3
этанол–н-пентан 0.5 м.д.			этанол–н-гептан 0.5 м.д.			этанол–н-октан 0.2 м.д.		
398,50	0,71	29,12	**527,15**	**5,37**	**239,93**	484,15	3,48	477,58
423,15	1,73	41,17	527,35	5,37	252,24	478,65	3,15	491,71
444,80	2,63	65,52	526,15	5,30	283,48	471,15	2,78	510,78
459,40	3,20	87,84	522,15	5,05	313,20	этанол–н-октан 0.5 м.д.		
479,70	4,30	137,10	510,15	4,29	373,10	501,10	2,54	68,42
491,70	5,35	210,12	505,15	3,97	392,88	518,08	3,52	111,85
491,70	5,62	252,82	491,65	3,19	442,50	529,00	4,20	146,86
491,10	**5,64**	**273,03**	486,15	2,95	456,65	533,50	4,50	165,81
487,00	5,47	323,59	470,15	2,45	492,81	539,00	4,91	200,00
482,20	5,22	349,54	этанол–н-гептан 0.8 м.д.			540,50	5,00	217,29
477,10	4,91	370,36	470,15	1,64	498,61	541,75	5,12	239,41
473,00	4,69	386,87	491,15	2,29	453,20	542,00	5,11	245,72
467,30	4,34	409,71	515,15	3,19	376,58	542,15	5,11	249,46
447,30	3,06	473,13	528,15	3,66	317,68	542,15	5,14	252,64
426,30	2,32	508,14	533,15	3,89	280,32	541,57	5,13	255,30
413,15	1,79	523,89	534,15	3,94	270,15	**541,50**	**5,14**	**268,64**
этанол–н-гексан 0.5 м.д.			534,65	3,96	259,22	540,58	5,12	279,59
416,15	1,25	537,77	**535,15**	**4,01**	**238,92**	538,43	5,06	296,58
431,15	1,90	520,74	534,65	3,98	221,63	533,41	4,88	323,04
443,80	2,50	500,54	533,15	3,86	196,15	528,30	4,69	347,39
461,15	3,24	467,09	528,15	3,40	149,98	518,00	4,24	387,01
483,50	4,35	408,23	520,65	2,97	118,29	508,15	3,80	417,14
498,90	5,10	340,59	508,15	2,38	81,63	493,70	3,19	454,50
511,40	**5,54**	**254,05**	497,15	2,02	62,97	475,45	2,47	495,00
501,10	4,80	157,05	493,15	1,90	57,46	этанол–н-октан 0.8 м.д.		
479,20	3,51	101,69	473,15	1,42	32,21	484,15	0,87	27,10
451,15	2,12	53,38	этанол–н-октан 0.2 м.д.			508,00	1,50	43,89
этанол–н-гептан 0.2 м.д.			480,15	2,80	60,58	522,20	1,93	60,70
455,15	2,37	526,48	491,15	3,47	81,56	532,10	2,29	74,67
466,15	2,95	496,99	506,90	4,54	122,59	544,00	2,79	102,87
488,15	3,92	444,99	511,90	4,97	142,90	551,70	3,17	133,79
504,15	4,99	381,95	521,80	5,65	197,19	555,90	3,41	169,34
506,15	5,14	374,99	523,50	5,79	215,01	557,70	3,53	190,25
516,15	5,85	316,28	524,40	5,89	228,54	558,00	3,61	206,64
519,15	6,15	274,96	524,90	5,97	243,23	558,60	3,64	225,07
518,95	**6,17**	**247,45**	525,30	6,03	257,72	558,60	3,65	232,43
516,15	5,97	205,46	525,60	6,05	264,99	**558,70**	**3,67**	**241,63**
512,15	5,50	168,18	525,30	6,03	273,76	558,50	3,67	256,13
497,15	4,14	104,62	**525,20**	**6,04**	**279,60**	558,20	3,63	267,87
463,15	2,45	52,35	524,80	6,02	291,15	557,30	3,64	287,32
этанол–н-гептан 0.5 м.д.			523,70	5,97	305,85	555,00	3,57	309,54
486,15	2,35	60,69	519,90	5,76	335,74	550,90	3,43	340,31
499,15	3,04	90,23	512,80	5,29	373,46	545,00	3,25	366,86
508,15	3,66	118,25	505,30	4,82	404,11	538,70	3,08	385,23
512,15	3,99	133,68	500,10	4,49	422,02	532,10	2,92	403,04
517,15	4,37	153,93	497,15	4,32	431,32	520,15	2,69	432,47
521,15	4,77	175,58	494,65	4,16	440,98	510,15	2,46	453,18
524,65	5,10	200,44	492,65	4,02	447,97	500,15	2,25	471,98
526,15	5,34	227,27	490,15	3,86	456,85	484,15	1,87	496,86

На рис.4-6 приведены проекции линий критических точек термодинамической поверхности растворов на *p,T*-плоскости. Общим для водных растворов метанола и этанола является то, что их критические точки как функция состава находятся между критическими точками чистых компонентов (рис. 4,5) и

их критические линии представляют собой гладкие слегка вогнутые вверх кривые. Кривая насыщения н-пропанола $p_s(T_s)$ практически совпадает с кривой упругости насыщенного пара чистой воды, а кривые насыщения растворов располагаются выше (рис.6). Критические точки раствора вода–н-пропанол ложатся почти на прямую линию при значениях концентрации 0-0.5 мол.долей спирта и на выпуклую вверх кривую при 0.5-1 мол.долей. Быстрое и немонотонное изменение критических параметров раствора вода–н-пропанол связано с критической температурой чистого н-пропанола (536.85 К), которая заметно выше критических температур двух первых членов гомологического ряда (513.25 К метанола и 516.25 К этанола). На немонотонность изменения критических параметров в начале гомологических рядов указывают авторы работы [7]. По видимому, сложная форма критической кривой раствора вода–н-пропанол объясняется изменением его структуры в зависимости от концентрации и разным вкладом отталкивающих и притягивающих сил между молекулами компонентов.

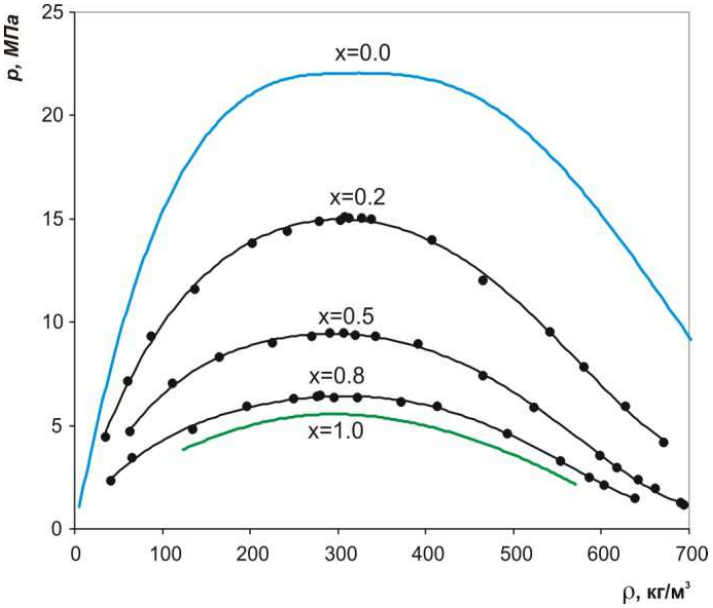


Рис.2. Зависимость давления от плотности и состава смеси вода–н-пропанол, х – мол.доля спирта.

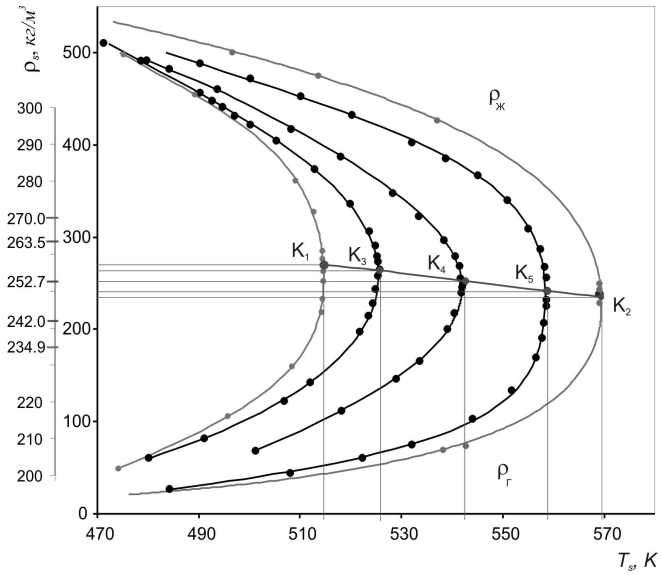


Рис.3. Зависимость плотности жидкой $\rho_ж$ и газовой $\rho_г$ фаз смеси этанол–н-октан от температуры. $К_1$, $К_2$ – КТ этанола и н-октана; $К_3$-$К_5$ - КТ растворов состава 0.2, 0.5 и 0.8 мол.доли н.октана.

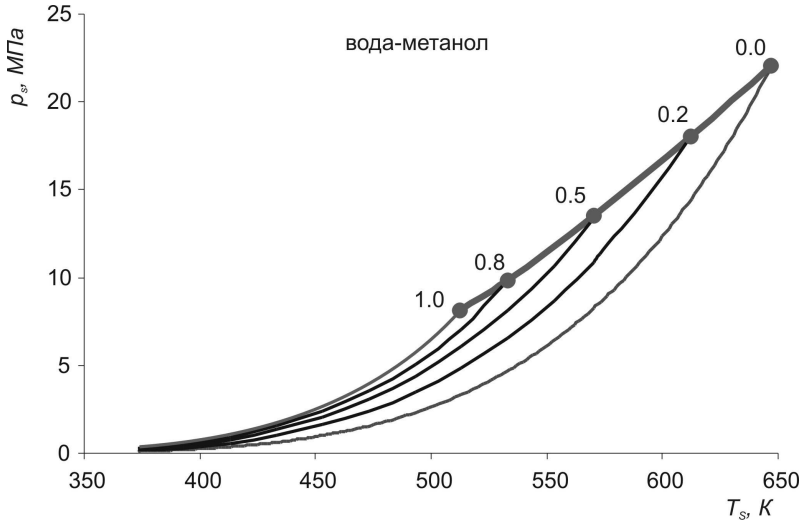


Рис.4. Проекция линии критических точек термодинамической поверхности в *p,T*-плоскости раствора вода-метанол для значений концентрации метанола *x*, мол.доли: 0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0.

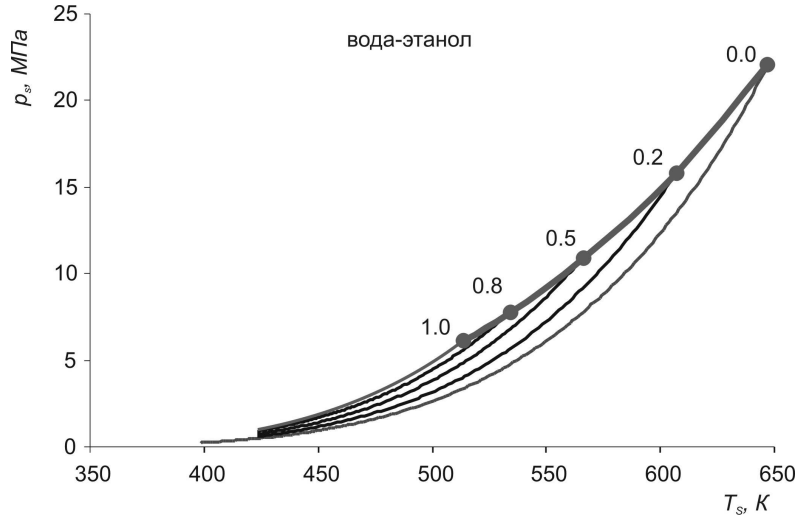


Рис.5. Проекция линии критических точек термодинамической поверхности в *p,T*-плоскости раствора вода-этанол для значений концентрации этанола *x*, мол.доли: 0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0.

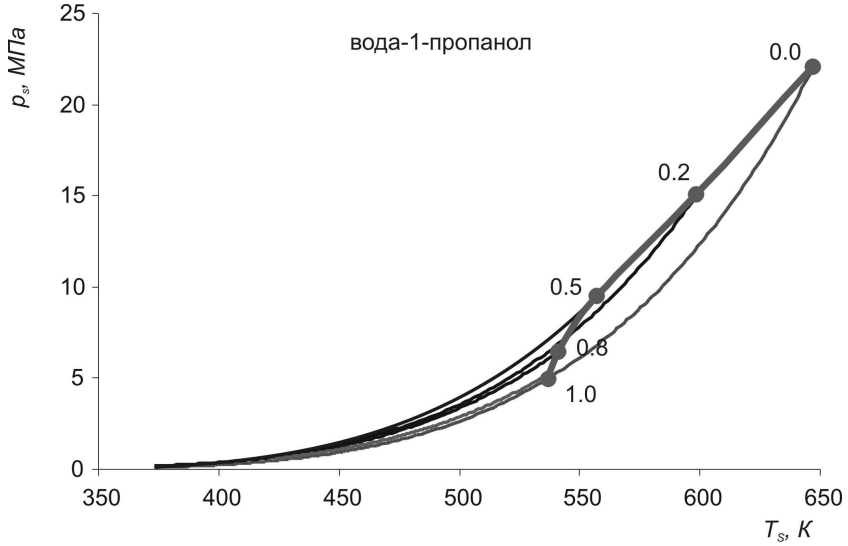


Рис.6. Проекция линии критических точек термодинамической поверхности в *p,T*-плоскости раствора вода-1-пропанол для значений концентрации 1-пропанола *x*, мол.доли: 0.0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0.

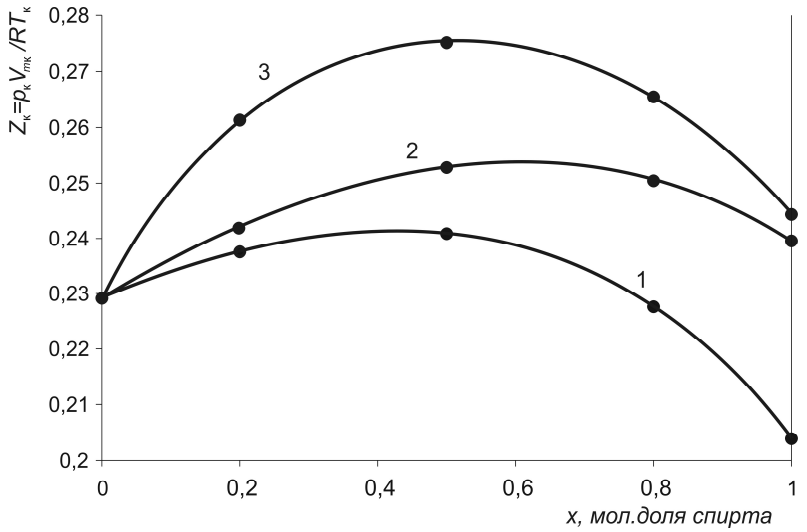


Рис.7. Зависимость фактора сжимаемости $Z_к$ растворов вода-спирт от состава в критическом состоянии: 1 - вода-метанол, 2- вода-этанол, 3 - вода-1-пропанол.

Для расчета критических параметров раствора вода-этанол можно использовать уравнения:

$$T_к=647.10-239.00\cdot x+177.76\cdot x^2-71.93\cdot x^3;$$
$$p_к=22.06-37.37\cdot x+37.15\cdot x^2-15.72\cdot x^3; \quad (2)$$
$$\rho_к=321.96-89.10\cdot x+84.56\cdot x^2-41.42\cdot x^3.$$

Относительная погрешность расчета составляет по температуре - 0.2%, по давлению - 0.9% и по плотности - 0.06%.

Важным параметром критического состояния является также безразмерная величина $Z_к=p_к V_{mк}/RT_к$, которую можно рассматривать как уравнение состояния. Характер зависимости $Z_к$ от состава для водных растворов метанола, этанола и 1-пропанола иллюстрирует рис.7. Общим для этих зависимостей является то, что вначале с ростом концентрации спирта $Z_к$ растет, достигая максимального значения при составе около 0.5, и уменьшается при дальнейшем росте концентрации. Зависимость $Z_к$ от x для раствора вода-этанол описывается с относительной погрешностью 0.1% выражением:

$$Z_к=0.2295+0,0649\cdot x-0.0249\cdot x^2-0.03\cdot x^3 \quad (3)$$

Литература:

1. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч.1. М.: Мир. 1989. 304 с.
2. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч.2. М.: Мир. 1989. 360 с.
3. *Васильев В.А.* Расчет параметров унифицированной геотермальной энергоустановки на водоаммиачной смеси. Теплоэнергетика. 1996. №5. С.27.
4. *Калина А.И.* Новая бинарная энергосистема с бинарным циклом. Калекс, LLC. 2630 Карлмонт Драйв. Бельмонт. Калифорния. 94002 США.
5. *Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э.* Термодинамика растворов. 2-е изд. М.: Энергия, 1980. 287 с.
6. *Стенли, Г.* Фазовые переходы и критические явления. М.: Мир. 1973. 419 с.
7. *Богатищева Н.С., Никитин Е.Д.* Критические свойства двенадцати гомологических рядов с общей формулой $H(CH_2)_SR$//ТВТ. 2005. Т.43. №2. С.196.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

Магомедов У.Б.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а; e-mail: m_umahan@rambler.ru

Для оптимизации технологических процессов по использовании тепла геотермальных вод необходимо иметь достоверные данные о теплофизических свойствах минерализованных вод.

Горячие подземные воды находят широкое применение в теплоснабжении жилых и не жилых помещений. Вода является лучшим средством для транспортировки тепла или холода т.к. обладает высокой теплоемкостью и является достаточно дешевым в экономическом плане.

Цель работы – на основе анализа экспериментальных данных по теплопроводности воды [1, 2] – плотности воды [1, 10] и теплопроводности водных растворов солей [11–34, 38, 39], получить обобщённые формулы, которые могут быть использованы для получения достоверных значений теплопроводности воды и водных растворов солей в интервалах давлений 0,1–100 МПа, температур 293–473 К и концентраций 0–25 масс.%.

На основе анализа данных о теплопроводности воды по формуле (1) и плотности [1] обычной воды получено уравнение, которое связывает коэффициент теплопроводности воды с плотностью при высоких давлениях и температурах до 473 К

$$\lambda_{(P,T)} = \lambda_{(P_S,T)}\left[1.700\ \frac{\rho_{(P,T)}}{\rho_{(P_S,T)}} - 0.7000\right], \qquad (1)$$

где $\lambda_{(P,T)}$ и $\lambda_{(P_S,T)}$ – соответственно теплопроводность воды при давлении P и температуре T и теплопроводность воды вблизи линии насыщения при P_S и T; $\rho_{(P,T)}$ и $\rho_{(P_s,T)}$ – соответственно плотность воды при давлении P и температуре T и плотность воды вблизи линии насыщения при P_S и T; Здесь $0{,}1 \le P_s \le 2{,}0$ МПа

Таблица 1. Значения теплопроводности воды по формуле (1).

T, К	Теплопроводность воды $\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К), при P, МПа					
	P_S	20	40	60	80	100
273.15	565	574	584	592	601	609
293.15	601	610	619	627	636	644
313.15	631	640	649	658	666	674
333.15	652	662	670	679	688	696
353.15	669	679	689	698	707	716
373.15	679	690	701	710	720	729
393.15	685	697	708	719	729	738
413.15	686	699	711	723	734	744
433.15	682	696	710	722	735	745
453.15	674	690	705	718	731	743
473.15	663	680	697	713	727	740

Важное преимущество такого метода обобщения – то, что плотность

исследуемого вещества находится с более высокой точностью и представляет собой менее трудоёмкую задачу, чем определение коэффициента теплопроводности.

Отклонение расчётных значений теплопроводности воды по формуле (1) от Международных данных [1] и от рекомендуемых справочных данных [2] составляет менее 1 %.

Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности водных растворов солей вблизи линии насыщения в интервалах температур 273–473 К, давлений $0{,}1 \le P_s \le 2$ МПа и концентраций 0–25 масс. %

$$\lambda^{Э}_{(P_s,T,c)} = \lambda^{B}_{(P_s,T)}\left[1.000 - \sum_{j,i=1}^{n} A_j\left(c_i + 2.000\times10^{-4} c_i^3\right)\right], \qquad (2)$$

где c_i – концентрация i-й системы раствора, масс. %. Массовая доля – г безводной растворённой соли / 100 г раствора; $\lambda^{Э}_{(P_S,T,c)}$ – теплопроводность раствора вблизи линии насыщения при P_s, T и c; $\lambda^{B}_{(P_S,T)}$ – теплопроводность воды вблизи линии насыщения; P_s–давление вблизи линии насыщения, т.е. $0{,}1 \le P_s \le 2$ МПа.

Необходимые данные для расчёта по формуле (2): $\lambda^{B}_{(P_S,T)}$ – теплопроводность воды по формуле (1); A_J – характерные коэффициенты для каждой бинарной системы раствора, которые найдены из экспериментальных данных по теплопроводности и плотности водных растворов солей и представлены в [33, 37, 38 и в других изданиях].

Отклонение расчётных данных по формуле (2) от экспериментальных данных по теплопроводности водных растворов солей вблизи линии насыщения [11–15, 20–23, 27–30] составило менее 1 %.

Таблица 2. Расчётные значения теплопроводности раствора по формуле (2).

T, К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К) системы NaCl + H_2O при c, масс.%						
	0	2.5	5	10	15	20	25
293.15	600	597	595	590	584	578	571
313.15	631	628	626	620	614	608	601
333.15	652	649	646	641	635	628	621
353.15	669	666	663	657	651	645	637
373.15	679	676	673	667	661	654	647
393.15	685	682	679	673	667	660	652
413.15	686	683	680	674	668	661	653
433.15	682	679	676	670	664	657	650
453.15	674	671	668	662	656	649	642
473.15	663	660	657	652	645	639	632

Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности (Вт/(м · К)) водных растворов солей в интервалах температур 273–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 масс. %

$$\lambda^{Э}_{(P,T,c)} = \lambda^{B}_{(P,T)}\left[1.000 - \sum_{j,i=1}^{n} A_j\left(c_i + 2.000\times10^{-4} c_i^3\right)\right] - 2.000\times10^{-8} PT\sum_{i=1}^{n} c_i \,, \qquad (3)$$

где $\lambda^{Э}_{(P,T,c)}$ – коэффициент теплопроводности (Вт/(м · К)) раствора при давлении P (МПа), температуре T (К) и концентрации c (масс. %); $\lambda^{B}_{(P,T)}$ – коэффициент теплопроводности воды при давлении P и температуре T.

Формула (3) получена на основе анализа данных различных работ по теплопроводности водных растворов солей [11–34, 38, 39] и теплопроводности воды.

Необходимые данные для расчёта по формуле (3): $\lambda^{B}_{(P,T)}$ – данные по формуле (1) и A_J – характерные коэффициенты для каждой бинарной системы водного раствора солей.

Отклонение расчётных значений теплопроводности водно-солевых систем по формуле (3) от данных различных авторов [11–34, 38, 39] составило менее 1,6 %.

Таблица 3. Расчётные значения теплопроводности системы $NaCl+H_2O$ по формуле (3).

T, К	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м · К) системы $NaCl + H_2O$ при P, МПа					
	Ps	20	40	60	80	100
	5 масс. %					
293.15	595	603	612	619	627	634
313.15	626	634	643	650	659	665
333,15	646	654	663	671	680	687
353,15	663	672	682	690	698	706
373.15	673	682	693	702	711	719
393.15	679	690	701	710	720	728
413.15	680	692	704	714	725	734
433.15	676	690	702	713	725	735
453.15	668	683	697	709	721	732
473.15	657	673	689	704	716	729
	10 масс. %					
293.15	590	598	605	614	620	627
313.15	620	627	636	643	650	657
333,15	641	649	656	664	672	678
353,15	657	665	673	681	689	696
373.15	667	676	684	693	701	709
393.15	673	682	693	701	710	717
413.15	674	685	696	706	714	723
433.15	670	682	694	704	714	724
453.15	662	675	689	700	710	721
473.15	652	667	682	695	707	719
	20 масс. %					
293.15	578	585	592	598	605	610
313.15	608	615	622	628	634	640
333,15	628	635	642	648	654	660
353,15	645	652	660	666	673	679
373.15	654	662	670	677	683	690
393.15	660	669	677	684	692	699
413.15	661	671	680	688	696	703
433.15	657	668	678	687	696	704
453.15	649	661	673	683	692	701
473.15	639	652	666	678	688	698

Представлена обобщённая формула для расчёта теплопроводности воды и

водных растворов солей в интервалах температур 273–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 масс. %

$$\lambda_{(P,T,c)} = \lambda^{Э}_{(P_s,T,c)}\left[\left(1.700\frac{\rho^{B}_{(P,T)}}{\rho^{B}_{(P_s,T)}} - 0.7000\right) - 2.500\times10^{-8}\,PT\sum_{i=1}^{n}c_i\right], \qquad (4)$$

где $\lambda^{Э}_{(P_S,T,c)_s}$ – теплопроводность раствора вблизи линии насыщения при P_s, T и c; $\rho^{B}(P,T)$ – плотность воды при P и T; $\rho(P_s,T)$ – плотность воды вблизи линии насыщения при P_s и T.

Рассчитанные по формулам (3) и (4) значения теплопроводности водных растворов солей согласуются между собой в пределах 0,6 %, а с экспериментальными данными различных авторов [12–35, 38, 39] – 1.6 %.

Таблица 4. Расчётные по формуле (4) значения теплопроводности многокомпонентной системы H_2O+NaCl+$MgCl_2$+$CaCl_2$

T, К	$\lambda\cdot10^3$, Вт/(м·К); P, МПа; c, масс. %.					
	Ps	20	40	60	80	100
	4 % NaCl + 4 % $MgCl_2$ + 2 % $CaCl_2$ + H_2O					
293.15	585	593	601	608	615	622
313.15	615	622	631	638	646	652
333.15	635	643	651	658	666	672
353.15	652	660	669	676	685	692
373.15	662	671	681	688	697	704
393.15	667	677	687	696	704	712
423.15	667	679	690	700	710	719
473.15	646	661	676	690	702	713
	5 % NaCl + 5 % $MgCl_2$ + 5 % $CaCl_2$ + H_2O					
293.15	579	587	594	601	607	614
313.15	608	615	623	630	637	643
333.15	629	636	644	652	658	664
353.15	645	652	661	668	675	682
373.15	654	663	671	679	686	693
393.15	660	669	678	686	694	702
423.15	660	671	681	690	700	708
473.15	639	653	668	680	691	702
	10% NaCl + 5% $MgCl_2$ + 5% $CaCl_2$ + H_2O					
293.15	574	581	588	594	600	606
313.15	602	609	616	622	628	633
333.15	622	629	636	642	648	654
353.15	640	647	654	661	667	673
373.15	648	656	664	671	677	684
393.15	654	663	671	678	685	693
423.15	654	664	674	682	691	698
473.15	633	646	660	671	682	691

Примечание. Значения табл. 4 согласуются с экспериментальными [30] в пределах 1,3%.

Литература:

1. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Государственной Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.
2. *Международные таблицы и уравнения* для теплопроводности воды и водяного пара. Спр. // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С. 70–74.

3. *Lawson A.W., Lowell R., and Jain A.L.* Thermal Conductivity of Water at High Pressures // J. Chem. Phys. 1959. V. 30. No. 3. P. 643–647.
4. *Bridgman P.W.* The Thermal Conductivity of Liquids under Pressure / Proc. Am. Acad. Arts. Sciences. 1923. V. 49. No. 7. P. 141–144.
5. *Dietz F.J., de Groot J.J., and Franck E.U.* The Thermal Conductivity of Water to 250 ^{0}C and 350 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1981. V. 85. No. 11. P. 1005–1009.
6. *Амирханов Х.И., Адамов А.П., Магомедов У.Б.* Экспериментальное исследование теплопроводности воды при температурах 30-200 ^{0}C и давлениях 98,2-686.5 МПа // В сб. Теплофизические свойства веществ и материалов / ГСССД. М.: Изд-во стандартов. 1984. Вып. 21. С.35–39.
7. Теплопроводность обычной и тяжелой воды и водных растворов неэлектролитов / Б.А. Григорьев, Ю. А. Ганиев, Г.А. Сафронов, А.М. Ишханов, Ю.Л. Расторгуев; Госстандарт, ВНИЦ МВ. М.: Изд-во стандартов. 1985. 64 с.
8. *Амирханов Х.И., Адамов А.П., Магомедов У.Б.* – Деп. Таблицы рекомендуемых справочных данных. Вода. Теплопроводность воды в диапазоне температур 25–200 ^{0}C и давлении 100–400 МПа / Всесоюзный научно-исследовательский центр по материалам и веществам Госстандарта СССР. М.: 1987. 10 с. – Деп. во ВНИИКИ 10.06.87, № 370-кк. 87.
9. *Григорьев Б.А., Григорьев Е.Б., Ишханов А.М.* Теплопроводность воды в зависимости от температуры и плотности при высоких давлениях. Часть 1 // Оборонный комплекс–научно-техническому прогрессу России. 2001. №3. С. 55–61.
10. Jùza J. and Šifner O., Mares R. Equation of State for Ordinary Water in the Fluid State from the Saturation Line to the Melting Line at Temperatures from – 45 to 300 ^{0} C and in the Region from 0,1 to 20 GPa Between 300 and 2000 ^{0}C. / Proc. 10-th Int. Conf. Prop. Water and Steam. USSR. Moscow. 1984. P. 106–116.
11. *Riedel L.* Wärmeleitfähigkeit von wäßrigen Lösungen starker Elektrolute // Chem. Ing. Techn. 1951. № 3. S. 59–64.
12. *Riedel L.* Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Natron-und Kalilauge verschiedener Konzentration und Temperatur // Chem. Ing. Techn. 1950. № 3. S. 54–56.
13. *Капустинский А. Ф., Рузавин И.И.* Теплопроводность водных растворов электролитов // Журнал физической химии.1955. Т. 29. № 12. С. 2222–2229.
14. *Варгафтик Н.Б., Осминин Ю.П.* Теплопроводность водных растворов солей, кислот и щелочей // Теплоэнергетика. 1956. № 7. С. 11–16.
15. *By Zdenek Losenicky.* The Thermal Conductivity of Aqueous Solutions of Alkali Hydroxides // J. Physical Chemistry. 1969. V. 73. № 2. P. 451.
16. *Dawis P.S., Theeuwes F., Bearman R.J., Gordon R.P.* Non-Steady-State, Hot Wire, Thermal Conductivity Apparatus // J. Chem. Phys. 1971. V. 55. № 10. P. 4776–4783.
17. *Юсуфова В. Д., Пепинов Р.И., Николаев В.А., Гусейнов Г.М.* Теплопроводность водных растворов хлорида натрия // Инженерно-физический журнал. 1975. Т. 29. № 4. С. 600–605.
18. *Эльдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов солей // Журнал физической химии. 1980. Т. 54. № 3. С. 606–609.
19. *Alloush A., Gosney W.B., Wakeham W.A.* A. Transient Hot- Wire Instrument for Thermal Conductivity Measurements in Electrically Conducting Liquids at Elevated Temperatures // Int. J. Thermophys. 1982. V. 3. № 3. P. 225–235.

20. *Nagasaka Y., Okada H., Suzuki J., Nagashima A.* Absolute Measurements of the Thermal Conductivity of Aqueous NaCl Solutions at Pressures up to 40 MPa // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1983. V. 87. № 10. P. 859–866.
21. *Rastorguyev Yu. L., Grigoryev B. A., Safronov G. A., Ganiyev Y. A.* Thermal Conductivity of Aqueous Solutions of Alkali Metals Halides // Proc. 10 Intern. Conf. on the Properties of Steam. Moscow, USSR. 1984. V. 2. P. 210–218.
22. *Эльдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов натриевых солей // Журнал физической химии. 1986. Т. 60. № 3. С. 603–605.
23. *Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С.* Исследование теплопроводности водных растворов нитратов натрия, калия и серебра // Изв. вузов. Энергетика. 1988. № 6. С. 78–89.
24. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность водных растворов электролитов при высоких давлениях. В сб.: Геотермия. Теплофизика геотермальных систем. Махачкала: Изд-во Даг. ФАН СССР, 1989. С. 103–109.
25. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность водных растворов электролитов. В сб.: Теплофизические свойства индивидуальных веществ и смесей. Махачкала: Изд- во Даг. ФАН СССР, 1989. С. 61–66.
26. *Ganiyev Y. A., Musoyan M.O., Rastorguyev Yu. L., Grigoryev B.A.* The Thermal Conductivity of Water and Aqueous Solutions of NaCl in the Range of Temperatures 20-400 ^{0}C and Pressures up to 100 MPa // Proc. 11– Intern. Conf. Proc. Steam. New York-Washington-Philadelphia-London. Prague, Czechoslovakia. 1989.
27. *Сафронов Г.А., Косолап Ю.Г., Расторгуев Ю.Л.* Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности бинарных растворов электролитов. М., 1990. 28 с. – Деп. ВИНИТИ 26.07.90, № 4262-В 90.
28. *Пепинов Р.И., Гусейнов Г.М.* Экспериментальное исследование теплопроводности водных растворов хлористого калия при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29. № 3. С. 605.
29. *Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Ахмедова Р.Э.* Исследование теплопроводности трехкомпонентных водных растворов солей $MgCl_2$ и $MgSO_4$ // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3-4. С. 65–68.
30. *Абдуллаев К.М., Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Зульфугаров Д. Ш.* Теплопроводность многокомпонентных водных растворов электролитов // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 3-4. С. 61–63.
31. *Эльдаров В.С., Вахабов И.И., Бабаева С.Ш. и др.* Анализ работ по теплопроводности многокомпонентных водных растворов солей // Изв. вузов. Нефть и газ. 1992. № 9–10. С. 59.
32. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния. В сб.: Геотермия. Геологические и теплофизические задачи. Махачкала: Изд-во Даг. НЦ РАН, 1992. С. 168–187.
33. *Пепинов Р.И., Гусейнов Г.М.* Теплопроводность водного раствора хлористого лития при высоких температурах // Журнал физической химии. 1993. Т. 67. № 6. С. 1101–1103.
34. *Абдуллаев К.М., Элдаров В.С., Мустафаев А.М.* Теплопроводность водных растворов системы NaCl – $CaCl_2$ // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. С. 397–401.
35. *Abdulagatov I.M., Magomedov U.B.* Meassurements of the Thermal Conductivity of Aqueous $CoCl_2$ Solutions at Pressures up to 100 MPa by the Parallel-Plate Apparatus // J. of Chemical Engineering of Japan. 1999. V. 32. № 4. P. 465–471.

36. *Магомедов У.Б.* Теплопроводность бинарных и многокомпонентных водных растворов неорганических веществ при высоких параметрах состояния // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. № 2. С. 241–245.
37. *Magomedov U.B.* Thermal Conductivity of Binary and Multicomponent Aqueous Solutions of Inorganic Substances at High Parameters of State // High Temperature. 2001. Vol. 39. No. 2. P. 221–226. Translated from Teplofisika Vysokikh Temperatur. 2001. Vol. 39. No. 2. P. 241–245.
38. *Abdulagatov I.M., Akmedova-Azizova L.A. and Azizov N.D.* Thermal Conductivity of Aqueous $Sr(NO_3)_2$ and $LiNO_3$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2004. V. 49**.** 688–703, American Chemical Society.
39. *Akhmedova–Azizova L.A.* Thermal Conductivity of Aqueous $Mg(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$, and $Ba(NO_3)_2$ Solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2006. 51**.** № 2. Pp. 510–517.
40. *Магомедов У. Б., Алиев М.М., Магомедов М.М-Ш.* Теплопроводность воды и водных растворов солей при различных температурах, давлениях и концентрациях / Труды Всероссийской научно-технической конференции – Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты. 23–25 декабря 2009. ДГТУ. Махачкала, Россия. 2009. С. 169–175.
41. *Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б***.** Теплопроводность водных растворов солей вблизи линии насыщения // Естественные и технические науки. 2010. № 4(48). С. 29–32.
42. *Магомедов М. М–Ш***.** Теплопроводность водных растворов солей вблизи линии насыщения / Материалы III Школы молодых ученых – Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. 27–30 сентября, 2010 г. Махачкала, Россия. С. 139–145.
43. *Алхасов А.Б., Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.* Теплопроводность водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2011. № 1(51). С. 23–26.
44. *Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б***.** Теплопроводность воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки. 2011. № 3 (53). С. 54–56.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, В ТОМ ЧИСЛЕ – НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Ильин Р.А.

Лаборатория нетрадиционной энергетики СНЦ РАН
(при Астраханском государственном техническом университете);
Астрахань, Россия; 414025, ул. Татищева, 16; e-mail: akilyin@newmail.ru

В последние 20-25 лет в теплоэнергетике произошли существенные изменения, которые позволяют сформулировать следующие основные положения (см. [1-16] и др.):

1. Стало очевидным, что преобразование энергии топлива в теплоэнергетических установках возможно, в том числе – с использованием существующей техники, с гораздо большей эффективностью при использовании комбинированных (парогазовых) установок, т.е. с КПД от 0,50 до 0,55 и перспективно выше (средний КПД ТЭС в России на органическом топливе в настоящее время – 0,37).

2. Широкомасштабно заменяются и устанавливаются новые промышленные и отопительные котлы и котельные, на которые тратится более 30 % топлива в стране. «Новые» – в техническом отношении, но с практически предельным энергетическим КПД – 0,85-0,92, полезно используемая эксергия в которых составляет всего около 30% [1-5, 7, 9, 12 и др.].

3. Другие виды вновь создаваемых топливных теплоэнергетических установок при их выборе и создании оцениваются как правило по финансовым показателям, а не по энергетической эффективности. Первый показатель является временным, неустойчивым, рыночным, второй (энергоэффективность) – является стабильным, базовым, чрезвычайно актуальным.

4. При использовании и анализе возможностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) не учитывается их высокая энергетическая эффективность [6, 7] (большая положительная разность между экономией топлива вследствие использования природной энергии и затратами топлива на создание установок на ВИЭ). Оценки только по финансовым показателям не отражают реальную ситуацию с энергоэффективностью теплоэнергетических установок на ВИЭ.

5. Использование комбинированных теплоэнергетических установок различных видов имеет не массовый, а частный характер.

6. По прежнему отсутствуют общие показатели эффективности установок различных видов, которые позволяли бы на стадии их выбора и сравнения вариантов принимать обоснованные технические, технологические и административные решения.

Очевидно, с учетом многочисленных публикаций представителей различных российских научных школ, центров, академических учреждений и с учетом пп.1-6 (выше), можно считать предварительно достаточно обоснованными следующие положения:

7. Для «большой» энергетики при наличии новой технологии (ПГУ) критически нецелесообразно строить традиционные ТЭС и ТЭЦ.

8. Далее невозможно множить парк отопительных котлов по «линейной» технологии, т.е. без комбинирования котлов с ГТУ (ГТУ - мини-ТЭЦ), или ПТУ (паровая мини-ТЭЦ), или с ВИЭ.

9. Только комбинирование установок различных видов может вывести их на новый, современный уровень общей энергоэффективности (комбинирование топливных установок как с топливными, так и с ВИЭ-установками).

Учет и развитие изложенных выше положений возможны только при разработке и использовании методологии и методик общей комплексной оценки эффективности теплоэнергетических установок различных видов.

Эта методология должна быть первым, основным этапом оценки эффективности установок, который обеспечивает высокую эффективность их использования, на стадии выбора, сравнения вариантов, модернизации, замены вследствие морального износа и неконкурентоспособности. При выборе конкретных или окончательных вариантов, каждый из которых имеет достаточно высокую начальную абсолютную энергоэффективность, должны использоваться обычные технико-экономические показатели.

Однако в проблеме оценки эффективности теплоэнергетических установок различных видов и их комбинаций имеются методологические и методические трудности из-за отсутствия комплексных показателей эффективности, которые бы учитывали использование и образование различных видов энергии, сложное комбинирование теплоэнергетических объектов и обеспечивали бы объективное сравнение эффективности различных объектов, схем, с различными видами энергии с общих методологических позиций, что особенно важно на стадии выбора энергетических установок разного вида для конкретных объектов и условий использования [8, 10].

Эффективность теплоэнергетических установок различных видов на стадии их выбора для данного источника энергии, сравнения вариантов и т.п. в настоящее время определяется с помощью частных критериев, различных по смыслу и по виду для различных видов теплоэнергетических установок. Это критерии часто непосредственно объединяют (в виде суммы, разности, комбинаций) разные виды энергии: тепловую, электрическую, которые имеют различную энергетическую ценность, с точки зрения эксергетического анализа, и не могут, таким образом, быть объективными как вообще, так и, особенно, – при сравнении эффективности установок различных видов [3, 5, 6, 10, 11 и др.].

Практически, критерии оценки эффективности установок различных видов, несмотря на их большое количество и разнообразие, не учитывают:

- совместимость источника энергии и потребителя энергии (близость или большое различие величин выходных энергетических параметров теплоэнергетической установки и входных параметров потребителя);
- структуру системы «Источник энергии – тепловой двигатель (если есть) - утилизационный контур (если есть) - система передачи энергии – потребитель» и ее варианты при параллельной работе нескольких источников энергии на один или несколько потребителей;
- потери располагаемой эксергии, выделяющейся при сгорании топлива в камерах сгорания, котлах и др., в системе (источник энергии – тепловой двигатель - система передачи (утилизации) энергии – потребитель»;
- затраты эксергии на топливо для «топливных» теплоэнергетических установок (добыча, очистка, переработка, транспортировка), которые весьма существенны и при их неучете дают неправильные представления об эффективности использования топлива в теплоэнергетических установках;
- затраты эксергии на «строительство» теплоэнергетических установок (создание материалов, деталей, узлов, агрегатов, транспорт и др.), снижающие в

определенной степени эффективность «топливных» установок и являющиеся основными затратами для нетопливных установок (на возобновляемых или вторичных источниках энергии и т.п.).

Важно также и то, что отсутствие общих комплексных показателей эффективности не позволяет сравнивать эффективность топливных и нетопливных установок на ВИЭ при их выборе для конкретных объектов – потребителей. Недостатком существующих показателей эффективности является то, что в них термодинамические (подавляюще наибольшие) потери учитываются совместно с потерями механическими, гидро- и аэродинамическими, химическими, потерями через тепловую изоляцию и с затратами энергии на собственные нужды. Эти потери (кроме термодинамических) в настоящее время в современной технике практически минимизированы, что также подтверждает важность и наибольшее значение именно термодинамического характера общих, комплексных показателей эффективности.

Автором введен и используется для оценки комплексный показатель эффективности теплоэнергетических установок, учитывающий термодинамические (наибольшие по величине) потери эксергии при преобразовании эксергии, затраты на создание установки и затраты эксергии на добычу, переработку и транспортировку топлива может использоваться в виде [3, 5, 6, 10, 15, 16]:

$$\eta_{ex.\text{полн}} = \delta\eta_{ex} \Big/ \left(1 + \delta\eta_{ex}/k_{\text{стр}} + \delta\eta_{ex}/k_{\text{топл}} + \delta\eta_{ex} \Big/ \sum_{1}^{n} k_i \right), \qquad (1)$$

где $\delta\eta_{ex}$ – коэффициент использования располагаемой эксергии [3, 4, 9]; $k_{\text{стр}}$ – коэффициент, учитывающий затраты эксергии на создание установок [5, 9]; $k_{\text{топл}}$ – коэффициент, учитывающий затраты эксергии на получение (добычу, очистку, переработку, транспортирование) топлива [9, 10]; k_i – коэффициенты других возможных затрат эксергии [10].

Формула (1) может принимать различный вид в зависимости от вида теплоэнергетической установки. Например, для установок на ВИЭ, удельная масса которых при их создании имеет весьма существенную величину, но отсутствуют затраты на создание топлива для ее работы, т.е. без учета коэффициента $k_{\text{топл}}$, а также вследствие малости различных других затрат, (без учета k_i) формула (1) примет вид:

$$\eta_{\text{ех.полн}} = 1/(1/\delta\eta_{\text{ех}} + 1/k_{\text{стр}}). \qquad (2)$$

Для топливных установок для некоторых их видов коэффициентом $k_{\text{стр}}$ можно пренебречь, тогда

$$\eta_{\text{ех.полн}} = 1/(1/\delta\eta_{\text{ех}} + 1/k_{\text{топл}}). \qquad (3)$$

При комбинировании топливных и нетопливных на ВИЭ (солнечных, геотермальных) установок используется оценка по (1).

Коэффициент $\eta_{ex.\text{полн}}$ является основным при оценке эффективности конкретных теплоэнергетических установок на стадии их выбора и сравнения для определенного энергоисточника и определенных условий, а также при модернизации установок, при оценке эксплуатационных ситуаций и др.

В формулах (1)-(3) коэффициент использования располагаемой эксергии $\delta\eta_{ex}$ отличается от эксергетического КПД теплоэнергетической установки η_{ex} тем, что последний учитывает потери непосредственно в установке (т.е.

эксергетическое качество установки), а первый - учитывает, какая доля располагаемой эксергии (топлива или ВИЭ) полезно используется в установке. При этом используется не температура на выходе, например, из котла, а температура рабочего вещества **на входе в потребитель**, т.к. именно с этого момента начинается полезное использование эксергии рабочего вещества. Этот коэффициент соответствует выражению

$$\delta\eta_{ex} = \frac{Ex_{\text{эл}} + Ex_{\text{тепл}}}{\text{Ex}_{\text{т}_\text{т}}}, \qquad (4)$$

где $Ex_{\text{эл}}$, $Ex_{\text{тепл}}$ – соответственно полезная эксергия: (электроэнергия $Ex_{эл}$ и эксергия теплоты $Ex_{тепл}$ непосредственно перед потребителем при температуре $T_{\text{п}}$), поступающая от установки к потребителям, $Ex_{\text{т}_\text{т}}$ – эксергия теплоты, выделяющейся при сжигании топлива, при максимальной теоретической температуре горения топлива $T_{\text{т}}$.

Как указано выше, учет существенных затрат эксергии на создание установок производится с помощью коэффициента $k_{\text{стр}}$, который в настоящее время в литературе пока конкретно не разработан. Он соответствует зависимости [10]

$$k_{\text{стр}} = \delta\eta_{\text{ех}} \cdot W \cdot \text{C}/(ex_{\text{о.стр}} \cdot m), \qquad (5)$$

где числитель – это количество полезной эксергии, произведенное при единичной мощности W за период времени C, а знаменатель – количество эксергии $ex_{\text{о.стр}}$, затраченной на создание (отнесенное к единице мощности) установки с удельной массой m: создание материалов, изготовление деталей, узлов, монтаж, транспорт и др.

Затраты эксергии на добычу, переработку и транспортировку топлива запишем в виде:

$$\delta Ex_{\text{топл}} = \delta Ex_{\text{доб}} + \delta Ex_{\text{пер}} + \delta Ex_{\text{тр}}, \qquad (6)$$

а коэффициент $k_{\text{топл}}$, учитывающий эти затраты, –

$$k_{\text{топл}} = 1/(1 - \delta Ex_{\text{топл}} / Ex_{\text{топл}}). \qquad (7)$$

Затраты эксергии на транспорт топлива, например – на характерное для России расстояние – 4000 км, составляют, в % от эксергии топлива: нефть – 1,5, газ – 18. Коэффициент $k_{\text{топл}}$ введен в связи с тем, что в настоящее время затраты эксергии на получение топлива достаточно большие (см. также [6, 9, 10]).

Затраты на добычу топлива, его переработку и на транспортировку находятся в достаточно широком диапазоне и должны учитываться при расчетном анализе для конкретных условий. Учет $k_{\text{топл}}$ особенно важен при использовании синтезированных топлив в случаях, когда эти затраты составляют значительную долю эксергии получаемого топлива или превышают ее (последнее, например, у водорода). В последнем случае топливные теплоэнергетические установки не могут окупаться.

Формула (1) является основой для определения полного комплексного коэффициента эффективности для всех видов теплоэнергетических установок в зависимости от его составляющих ($\delta\eta_{ex}$, $k_{\text{стр}}$, $k_{\text{топл}}$ и k_i). По (1) выполнены расчеты для широкого диапазона этих составляющих, учитывающих термодинамические потери при преобразовании эксергии, затраты эксергии на создание установок и затраты эксергии на добычу, переработку и

транспортировку топлива, без учета затрат k_i, вследствие их малости. Для топливных и нетопливных установок учтены различные варианты коэффициентов, входящих в зависимость (1), как по диапазону их реальных величин, так и по сочетанию коэффициентов для этих установок.

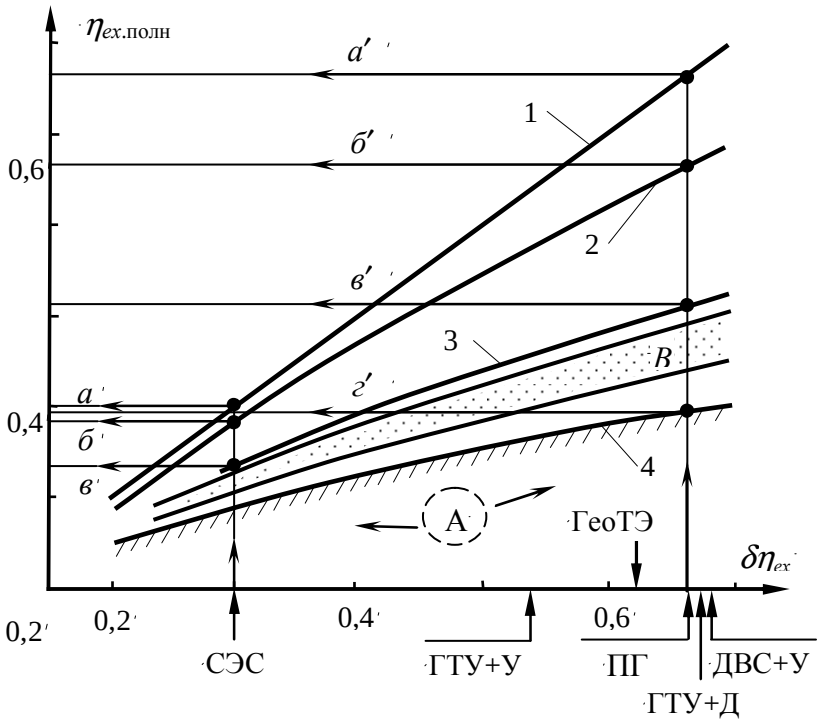


Рис.1. Обобщающие данные по эффективности топливных и нетопливных теплоэнергетических установок на основе формулы (1) при различных вариантах неучета и учета затрат эксергии на создание установок и на создание топлива для них [6,10]: 1 – без учета затрат эксергии на создание установок и на создание топлива; 2 – с учетом затрат эксергии на создание установок за срок $C = 4 \cdot C_{ex}$ в формуле (5) (C_{ex} – срок эксергетической окупаемости); 3 – с учетом затрат эксергии на создание установок при сроке окупаемости $C = C_{ex}$; 4 – с учетом затрат эксергии на создание установок и затрат эксергии на создание топлива; зоны A и B – пояснения см. в тексте

На основании расчетов по (1) построена обобщающая графическая зависимость полного коэффициента использования эксергии от его составляющих – рис.1, как обобщающий для установок различных видов. На оси абсцисс рис.1 нанесены, в качестве примера, величины коэффициента эффективности использования располагаемой эксергии $\delta\eta_{ex}$ [7] для топливных установок (ГТУ+УК, ДВС+УК, ПГУ, ГТУ +Двигатель Стирлинга) и установок на ВИЭ (ГеоТЭС и СЭС).

В качестве примера, воспользуемся номограммой на рис.1 для определения эксергетической эффективности солнечной электростанции (СЭС, с циклом Ренкина) с $\delta\eta_{ex} = 0{,}30$ [7]. Точки на рис.1 позволяют определить, что величина $\delta\eta_{ex} = 0{,}30$ (без учета затрат на создание установки) уменьшается до величины $\delta\eta_{ex.полн} = 0{,}23$, т.е. на 23,3 %. В точке на линии 3 информация по СЭС (как и для ГеоТЭС) заканчивается, т. к. ниже этой линии находятся области учета затрат на топливо, что для установок на ВИЭ не имеет смысла.

Аналогичный пример для ПГУ при $\delta\eta_{ex} = 0{,}66$ дает следующие результаты: при учете затрат только на создание установки $\delta\eta_{ex.полн} = 0{,}57$, при учете также и затрат на топливо величина полного коэффициента использования

располагаемой эксергии существенно уменьшается до диапазона 0,29-0,41 в зависимости от величины этих потерь.

Зона *B* между линиями 3 и 4 характеризует величины коэффициента $\delta\eta_{ex.полн}$ для топливных установок при реальных затратах эксергии на топливо. Ниже линии 4 находится зона *A*, в которой затраты эксергии на топливо больше, чем получаемая полезная эксергия. К таким топливам могут быть отнесены, например, некоторые синтезируемые топлива.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
2. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2010. 256 с.
3. *Андрющенко А.И., Ларин Е.А., Сандалова Л.А.* Метод эксергетического анализа термодинамических систем и комплексов. Уч. пособие. Саратов: СГТУ, 2008. 74 с.
4. *Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.* Солнечная энергетика. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с.
5. *Ильин Р.А., Ильин А.К.* Методология термодинамической оценки эффективности теплоэнергетических технологий / Материалы всеросс. конф. «Энергетика России в 21 веке: развитие, функционирование, управление». Иркутск: Институт систем энергетики им. Л. Мелентьева СО РАН. 2005. С. 21-28.
6. *Ильин Р.А.* К проблеме оценки эффективности теплоэнергетических технологий в промышленной энергетике // Вестник АГТУ. 2005. Вып.6 (29). С.214-229.
7. *Ильин Р.А., Ильин А.К.* Рейтинг современных теплоэнергетических установок // Академия энергетики. 2009. №3. С. 90-93.
8. *Ильин Р.А.* Сравнительная эффективность комбинированных теплоэнергетических установок // Промышленная энергетика. 2009. №10. С. 49-53.
9. *Ильин А.К., Ильин Р.А.* О структуре и качестве топливно-энергетического комплекса России / Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Сб. научн. тр. Саратов: СГТУ, 2010. С. 282-285.
10. *Ильин Р.А.* Комплексная термодинамическая оценка эффективности теплоэнергетических установок. М.: НИУ МЭУ (МЭИ), УМО вузов РФ по образованию в области энергетики и электротехники; Астрахань: «Новая линия», 2011. 66 с.
11. *Каганович Б.М., Филиппов С.П.* Теоретические основы анализа эффективности комбинированных технологий // Известия академии наук. Энергетика. 2008. №6. С. 116-126.
12. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 168 с.
13. *Шаргут Я., Петела Р. Эксергия.* Пер. с польск. М.: Энергия. 1968. 280 с.
14. Эксергетические расчеты технических систем / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, С.В. Дубовский и др. Справочное пособие. ИТТФ АН Украины. Киев: Наукова думка, 1991. 360 с.
15. *Янтовский Е.И.* Потоки энергии и эксергии. М.: Наука, 1988. 144 с.
16. *Yamauchi S., Fueki K.* New thermodynamic functions relevant to conservation of energy: theta function and reference of elements // Proc. Int. CODATA Conf. 1981. 7. P.242-245.

ТЕХНОЛОГИИ УМЯГЧЕНИЯ И ОЧИСТКИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОД СЕВЕРО-ДАГЕСТАНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

Каймаразов А.Г.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр.И.Шамиля, 39а; e-mail: kaymarazov@mail.ru

Обсуждаются результаты экспедиционных исследований, проведенных в 2009-2011 гг. по идентификации и количественному определению токсичных и загрязняющих компонентов в низкопотенциальных геотермальных водах Северо-Дагестанского артезианского бассейна (Тарумовский, Кизлярский, Бабаюртовский, Ногайский районы РД), перспективных для использования в системах геотермального теплоснабжения, а также проблемы обеспечения населения указанного региона качественной питьевой водой.
Представлены перспективные технологические решения и результаты апробации различных схем в масштабе укрупненного лабораторного эксперимента умягчения и эффективной очистки скважинных вод ряда населенных пунктов Кизлярского р-на от соединений мышьяка, тяжелых металлов, гуминовых веществ и других фенолсодержащих соединений. Изложены методические основы использования осадительных, сорбционных, ионообменных методов водоподготовки, в том числе с применением нанофильтров и трековых мембран.

Одной из наиболее важных народнохозяйственных задач по обеспечению потребностей населения северных территорий Республики Дагестан в энерго-, тепло- и водоснабжении является эффективное освоение ресурсов НПВ артезианского бассейна Северного и Приморского Дагестана. Оценка энергетического потенциала СДАБ и создание комбинированных технологий освоения этого вида ВИЭ – перспективные направления развития ТЭК республики и рационального использования традиционных энергоресурсов.

На их решение был направлен научный проект «Разработка эффективных технологий комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья», выполненный сотрудниками Института проблем геотермии при поддержке Министерства образования и науки РФ.

За период с 07.2009г. по 09.2011г. было обследовано около 200 скважин артезианского горизонта более чем 60 населенных пунктов и близлежащих территорий, обоснованы наиболее перспективные площади для создания опытных систем теплоснабжения и организованы стационарные пункты для гидрогеодинамического и экологического мониторинга в Ногайском, Тарумовском, Кизлярском и Бабаюртовском районах РД.

В качестве такого пункта в Кизлярском р-не была выбрана площадь со скважиной №4Т в с. Кардоновка, характеризующейся достаточно значительным дебитом - 1100 м3/сут (при полном открытии устьевой задвижки) и температурой воды на устье - 45-47 оС. Комплексное использование вод скважины 4Т для обеспечения населения теплом и для частичного покрытия его потребностей в питьевой воде вполне решаемая технологическая задача. Однако прямое использование указанных вод после снятия теплового потенциала в хозяйственно-питьевых целях невозможно ввиду высокого содержания токсичных и загрязняющих компонентов (мг/дм3), в том числе фенолов – 0,090 и соединений мышьяка – 0,300, – а также значительного фактора цветности вод (240 – 320 градусов).

Следует отметить, что наиболее токсичным компонентом в водах

большинства обследованных скважин как на уровне ПДК, так и в концентрациях, значительно превышающих этот показатель (50 мкг/дм3), является мышьяк. Нами установлены населенные пункты с повышенным содержанием мышьяка во всех скважинных водах хозяйственно-питьевого водопользования, что указывает на особую остроту проблемы обеспечения населения качественной питьевой водой и необходимость разработки и внедрения целевой технологии водоподготовки [1].

Таким образом, создание эффективной технологии умягчения и очистки НПВ на примере скважины 4Т от токсичных компонентов представляется актуальной задачей и с точки зрения создания комбинированной технологии теплоснабжения и питьевого водоснабжения, и ввиду возможности ее применения в качестве типовой схемы очистки НПВ Северо-Дагестанского артезианского бассейна, близких к кардоновской воде (скв № 4Т) по составу загрязнителей.

Ранее нами были опробованы методы очистки кардоновских вод и их имитатов от токсичных загрязнителей с помощью нанофильтров и трековых мембран, получивших в последние годы широкое распространение в практике водоснабжения, а также в пищевой промышленности, в медицине и в других областях на основе развития биотехнологий.

В частности, была проведена оценка сорбционной способности наноструктурных углеродных материалов (УНТ марки PTubes BC 15/1) и промышленных активных углей (БАУ, АГ-3, СКТ-3) для очистки вод от мышьяка [2].

Однако, несмотря на то, что в серии опытов с использованием БАУ и УНТ были получены вполне удовлетворительные результаты, нам не удалось преодолеть главный недостаток многих, в том числе электрокоагуляционных способов очистки природных вод и промышленных стоков от соединений мышьяка: не была достигнута степень очистки вод на уровне ПДК [3, 4].

Опробованные нами трековые мембраны (производитель ООО «Экомембраны») оказались весьма эффективными для очистки пробы кардоновской воды от гумусовых веществ, но недостаточно эффективными для сорбции соединений мышьяка.

Наиболее эффективными методами очистки вод от мышьяка в настоящее время продолжают оставаться методы, основанные на использовании соединений железа (III), как в реагентном [5], так и в адсорбционном вариантах [6]. Из реагентных широкое распространение получили осадительные методы с использованием недорогих природных материалов.

Принимая во внимание химический состав, показатель активной реакции, характер загрязняющих и токсичных веществ в воде, (мг/дм3): хлориды – 360, фториды – 0,8, сульфаты – 13,5, гидрокарбонаты – 1065, натрий+калий – 520-600, кальций – 13-17, магний – 9-14, железо общее – 0,12-0,6, марганец-0,05; общая минерализация (сухой остаток) – 1640-1755, pH – 8,1-8,3; токсичные и загрязняющие компоненты: фенолы – 0,067-0,075, мышьяк – 0,240-0,275, цветность (градусы) – от 150 до 340, – а также наличие свободных территорий в окрестности скважины 4Т с. Кардоновка, мы остановили выбор за осадительными методами очистки кардоновской воды от соединений мышьяка с использованием хлорида железа (III), которые могут быть легко реализованы в открытых бассейнах или прудах.

Выбор метода обусловлен следующими факторами:

– способ достаточно рентабельный, не требует дорогостоящего аппаратного оформления;

– активная реакция очищаемых вод способствует образованию осадка оксида

железа (III) непосредственно в сфере реакции;
– очистка кардоновской воды от сопутствующих загрязнителей (гумусовые кислоты и другие соединения фенольного ряда) на стадии осаждения мышьяка;
– расположение узла очистки воды от самого токсичного из компонентов – As – в «голове» технологической схемы исключает «размазывание» этого токсиканта в последующих стадиях водоподготовки.
– принципиальная возможность производства хлорида железа (III) на основе компонентов геотермальных вод;

Технология очистки НПВ от соединений мышьяка. Оптимальное количество осадителя: водного раствора хлорида железа (III),– необходимое для очистки кардоновской воды (скв 4Т) от мышьяка, определяли в серии опытов с использованием модельных растворов – имитатов НПВ.

Определение оптимального количества осадителя Модельным раствором служил раствор мышьяка (+3) с концентрацией 300 мкг/л, приготовленный в соответствии с требованиями ГОСТ 4212-76 и содержащий в качестве солевого фона хлорид натрия (600 мг/дм^3) и гидрокарбонат натрия (1500 мг/дм^3). Показатель pH модельного раствора доводили до значения ~ 8,2, вводя в раствор-имитат НПВ 1-% раствор NaOH.

В качестве раствора осадителя использовали раствор хлорида железа (III) с содержанием Fe^{3+} 117 г/дм^3, оптимальное количество которого определяли в серии опытов с модельными растворами, объемом 0,2 дм^3 каждый, содержащими по 60 мкгAs(III). В пробы вводили n-кратные избытки ионов Fe^{3+} в соотношениях: моль As(III) / моль Fe(III) ≈ 1:1, 1:5, 1:10, 1:50, 1:100, соответствующим квотам Fe^{3+} (мкг): 58, 290, 580, 2900, 5800, приходящимся на каждые 60 мкг мышьяка. Контроль полноты осаждения проводили по истечении 10, 30 и 60 мин с момента ввода раствора осадителя.

Исследования показали, что степень очистки, соответствующая значению показателя допустимого содержания мышьяка в водах хозяйственно-питьевого пользования – ПДКв.р.(As) = 50 мкг/дм^3 –, практически достигается в опытах с молярным соотношением As(III) : Fe(III) = 1:50 (см. таблицу 1). При соотношении As(III) : Fe(III) = 1:100 требуемая степень очистки достигается практически мгновенно, и к исходу 60 минут остаточное содержание мышьяка в пробе уже соответствует значению чувствительности метода определения. Кроме этого, к исходу часа достигается вполне удовлетворительная степень осветления пробы по железу: 1,5 мг/дм^3.

Изучение влияния температурного фактора

Ввиду возможного использования кардоновских вод (скв 4Т) на нужды хозяйственно-питьевого водопользования без предварительного съема теплового потенциала НПВ в теплонасосных системах теплоснабжения, нами апробирован вариант очистки модельного раствора от мышьяка с температурой, соответствующей устьевым значениям температуры скважинных вод.

Установлено, что с ростом температуры в интервале 25-45 ^{0}C и при соотношении As(III):Fe(III) = 1:50 требуемая степень очистки достигается вдвое быстрее. В тоже время степень осветления пробы по железу несколько снижается: от 1,1 до 3,2 мг/дм^3.

С учетом высокого фактора цветности НПВ скв. 4Т, обусловленного содержанием гумусовых веществ, для эффективной очистки кардоновской воды от соединений мышьяка в качестве оптимального было выбрано соотношение мышьяк : железо (III) не ниже 1 : 100.

Таблица. 1. Сравнительная степень очистки вод от мышьяка гидроксидом железа (III) в статических условиях.

Время осаждения (τ), мин	0	10	30	60
Соотношение As/Fe(III)	1:1			
C_{As} τ, мкг/л	300	278	272	273
Г, %	0	7,33	9,33	9,00
C_{Fe} τ, мг/л	0,29	0,26	0,21	0,21
Соотношение As/Fe(III)	1:5			
C_{As} τ, мкг/л	300	245	226	219
Г, %	0	18,3	24,7	27,0
C_{Fe} τ, мг/л	1,47	1,12	0,78	0,70
Соотношение As/Fe(III)	1:10			
C_{As} τ, мкг/л	300	163	126	114
Г, %	0	42,3	58,0	62,0
C_{Fe} τ, мг/л	2,93	2,03	1,32	1,23
Соотношение As/Fe(III)	1:50			
C_{As} τ, мкг/л	300	72	48	41
Г, %	0	76,0	84,0	86,3
C_{Fe} τ, мг/л	14,7	7,45	2,32	1,82
Соотношение As/Fe(III)	1:100			
C_{As} τ, мкг/л	300	58	12	> 5
Г, %	0	80,1	96,0	> 98,0
C_{Fe} τ, мг/л	29,3	9,45	3,02	1,41

Опыты с пробой кардоновской воды. Опробованный способ очистки модельных растворов был использован для очистки пробы кардоновской воды состава (мг/дм^3): хлориды – 331,5 сульфаты – 37,5, гидрокарбонаты – 1037, натрий+калий – 598, кальций – 17, магний – 14, железо общее – 0,6; общая минерализация (сухой остаток) – 1720, показатель pH – 8,3; цветность (градусы) – 180, с содержанием мышьяка 200 мкг/дм^3. В пробу объемом 6 дм^3 вводили в качестве осадителя 0,5 мл раствора хлорида железа (III) с содержанием Fe^{3+} 234 г/дм^3, что соответствовало молярному соотношению As / Fe(III) ~ 1 : 130.

Требуемая степень очистки от мышьяка кардоновской воды была достигнута практически в первые 10-15 мин.

Установлено, что мышьяк необратимо связывается гидроксидом железа (III), а гумусовые кислоты, адсорбируемые на свежеосажденном гидроксиде железа (III) в течение 30-90 мин, в дальнейшем возвращаются в раствор над осадком. Это очевидно связано с рекристаллизацией $Fe(OH)_3$, сопровождаемой образованием основного карбоната железа (III) с участием доминирующих в указанных водах HCO_3^- -анионов:

$[Fe(OH)_3 (H_2O)*(\text{phenolic acid})] + HCO_3^- + H_2O =$

$= [Fe(OH) (H_2O)_3 (CO_3)] + \text{phenolic acid} + OH^-$

Технологическая схема умягчения и доочистки НПВ с. Кардоновка (скв №4Т). Дальнейшая последовательность этапов очистки и умягчения НПВ с.Кардоновка (скв 4Т, Кизлярский р-н, РД) была определена с учетом высокой цветности вод, которая оказалась вторым лимитирующим показателем, сдерживающим использование вод скв 4Т для нужд хозяйственно-питьевого водопользования.

Для апробирования технологии очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка была использована водоочистительная установка напорного типа ВД-ТМ 205 Fex2, производимая ООО «ЭкоМембраны» (Россия), трековые мембраны которой вполне удовлетворительно проявили себя для целевой очистки вод от растворенного гумусового вещества.

В тоже время последовательность модулей установки в варианте поставки производителя оказалась недостаточно эффективной в плане оптимальной выработки ресурса модулей (картриджей), различающихся избирательностью в отношении различных видов и групп загрязнителей воды.

В частности, модуль с угольным картриджем установки предшествует модулю с трековой мембраной, что, безусловно, снижает ресурс угольного фильтра в виду конкурирующих процессов адсорбции олигомерных молекул гумусового вещества и низкомолекулярных органических соединений фенольного ряда.

В связи с чем, исходя из целей и задач по очистке и умягчению НПВ с. Кардоновка, мы унифицировали последовательность блоков очистки в водоочистительной установке ВД-ТМ 205 Fex2, доукомплектовав ее модули картриджами типа Slim Line 10" «Гейзер» (ООО «Акватория», г.С-Петербург, Россия) и «Посейдон» (ООО «Дон-Полимер-Маркет», г.Воронеж, Россия).

Апробация технологии водоподготовки НПВ с. Кардоновка (Кизлярский р-н, РД), прошедшей стадию очистки от соединений мышьяка. Основная задача этой стадии водоподготовки сводилась к очистке НПВ с. Кардоновка (скв 4Т) от механических примесей (взвешенных частиц) с контролем остаточного содержания ионов осадителя – Fe^{3+}.

Для ее решения был использован блок предфильтра, включающий последовательно соединенные модули (с характеристиками): фильтр FS-10^{ТН} (полипропилен 100%, пористость 5 мкм, производительность 10 л/мин, ресурс 20000л) и комбинированный фильтр ВДК-MFe2 (производительность 3 л/мин, ресурс 15000л), обеспечивающий эффективное удаление ионов железа, марганца, никеля, кадмия и свинца.

Пробу кардоновской воды объемом 6 дм^3 состава (мг/дм^3): хлориды – 403, сульфаты – 37,5, гидрокарбонаты(карбонаты) – 955(105), натрий+калий – 598, кальций – 17, магний – 14, железо общее – 2,3; общая минерализация (сухой остаток) – 1680, показатель pH – 7,1; цветность (градусы) – 142, направляли с помощью перистальтического насоса «Longer BT100-2J» в блок предфильтров со скоростью 2 л/ч.

Контроль этапа водоподготовки вели по следующим параметрам: показатель pH, цветность, значение жесткости общей, содержание ионов Ca^{2+}, Mg^{2+} и ионов железа в пробах воды, отбираемых через каждые полчаса, и в коллективной очищенной пробе.

Отмечена устойчивая динамика снижения цветности, показатель которой для коллективной пробы в сравнении со значением показателя исходной пробы уменьшился более чем на 30%. Концентрация Fe^{3+}-ионов в контрольных пробах и в коллективной пробе, прошедшей очистку, не превышала 0,1 мг/дм^3.

Апробация технологии очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка (Кизлярский р-н, РД) с использованием трековых мембран и угольных фильтров. Задача данной стадии включала очистку НПВ с. Кардоновка (скв 4Т) от гумусовых веществ.

Для ее решения использовали блок, включающий картридж на трековых мембранах ВДК-ТМ3 (пористость 0,38 мкм, производительность 3 л/мин, ресурс 6000 л) и угольный картридж СВС с добавкой серебра (пористость 0,6 мкм, ресурс 7000 л), производимый ООО «Акватория» и собранный на базе водоочистительной установки ВД-ТМ 205 Fex2.

Пробу кардоновской воды объемом 6 дм^3, очищенную от механических примесей на фильтрах FS-10^{ТН} + ВДК-MFe2, направляли с помощью

перистальтического насоса «Longer BT100-2J» в блок картриджей ВДК-ТМ3 + СВС со скоростью 2 л/ч.

Контроль этапа водоподготовки вели по тем же параметрам и с той же периодичностью, что и на стадии очистки пробы от ионов железа и механических примесей.

Показано, что опробованный комбинированный блок картриджей обеспечивает высокую степень очистки от растворенного гумусового вещества: показатель цветности снижается до значения 20°, соответствующего нормам СанПиН 2.1.4.559-96, и ниже.

Таким образом, на примере очистки НПВ с Кардоновка (скв 4Т, Кизлярского р-на РД) доказана принципиальная возможность использования указанных типов фильтров для устранения цветности природных (подземных) вод.

Апробация технологии умягчения НПВ с. Кардоновка (Кизлярский р-н, РД) с использованием Na^+–катионитных ионообменных смол. Несмотря на то, что величина общей жесткости, установленная для НПВ скв 4Т с. Кардоновка заметно ниже предельных значений, установленных нормами СанПиН 2.1.4.559-96 для данного показателя качества питьевой воды (мг-экв/$дм^3$): 2,0 против 7,0, представлялось интересным исследовать возможность умягчения вод скв 4Т с использованием ионообменников.

С этой целью нами опробованы возможности Na+–катионитных ионообменных смол, рекомендуемые для умягчения вод, предназначенных для хозяйственно-питьевого пользования, а именно, картриджа «Гейзер–3» типа БС в комбинации с модулями водоочистительной установки ВД-ТМ 205 Fex2: картриджем ВДК–UF(NL), предназначеным для фильтрации микропримесей, бактерий и вирусов картриджем ВДК-У4(NL), выполняющим роль угольного постфильтра.

Контролируемыми параметрами в опыте являлись: показатель pH, значение жесткость общ., содержание ионов Ca^{2+}, Mg^{2+} в пробах умягченной воды.

Исследования показали, что в коллективной пробе кардоновской воды (6 $дм^3$), прошедшей стадию умягчения на картридже БС (Na^+–ионообменная смола), остаточная жесткость обеспечивалась только Mg^{2+}-ионами, содержание которых составило менее 7% от исходного количества.

Апробация общей технологической схемы очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка (Кизлярский р-он, РД) в масштабе укрупненного лабораторного эксперимента. Общая схема очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка (скв №4Т), реализована в масштабе укрупненного эксперимента в последовательности технологических операций:

I- очистка НПВ от соединений мышьяка;
II- очистка НПВ от механических примесей и взвесей;
III- очистка НПВ от гумусовых и фенолсодержащих веществ;
IV- умягчение НПВ, очистка от ионов жесткости.

На первой стадии в пробу кардоновской воды объемом 50 $дм^3$ состава (мг/$дм^3$): хлориды – 326 сульфаты – 37,2, гидрокарбонаты(карбонаты) – 955(105), натрий+калий – 623, кальций – 17, магний – 14, железо общее – 0,3; общая минерализация (сухой остаток) – 1720, показатель pH – 8,46; цветность (градусы) – 180, с содержанием мышьяка 202 мкг/$дм^3$ вводили в качестве осадителя раствор хлорида железа (III) с содержанием Fe^{3+} 234 мг/$см^3$, что соответствовало весовому соотношению As / Fe(III) ~ 1 : 250.

По истечении 30 мин основной объем осветленной пробы НПВ, очищенной от соединений мышьяка, декантировали; остальную часть пробы, отделили от коллективного осадка гидроксида железа (III) методом фильтрования.

Технологическую пробу, прошедшую очистку от соединений мышьяка, направляли в водоочистительную установку, состоящую из следующих модулей:

а) модуль очистки от механических примесей, из последовательно соединенных картриджей: типа FS-10^{TH} и типа ВДК-MFe2;

б) модуль очистки от растворенного гумусового вещества, из последовательно соединенных 5 картриджей на трековых мембранах ВДК-ТМ3 и одного угольного картриджа СВС;

в) модуль умягчения (очистки от ионов жесткости), из последовательно соединенных картриджей: ВДК–UF (NL) + БС (Na^+–ионообменная смола) + ВДК-У4(NL).

В качестве контролируемых параметров были выбраны: остаточное содержание соединений мышьяка и железа, активная реакция пробы НПВ на каждом этапе очистки; показатели, характеризующие содержание гумусовых и иных фенолсодержащих веществ: цветность, окисляемость перманганатная, фенольный индекс; жесткость общая, содержание ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, ее обуславливающих, а также общепринятые показатели шестикомпонентного анализа вод.

Контрольные отборы проб проводили с периодичностью от 0,5ч до 6ч, с учетом характера показателя качества воды. Температура пробы во всех сериях опытов составляла 22-25 ^{0}C.

Регенерацию картриджей водоочистителя ВД-ТМ 205 Fex2 проводили дистиллированной водой с объемным расходом 2 л/час во всех модулях установки в течение 5-6 часов. Степень очистки контролировали, оценивая содержание характеристических компонентов пробы НВП в промывных водах (см. таблицу 2).

Исследования показали, что предлагаемая технологическая схема позволяет последовательно очистить НПВ с. Кардоновка (скв 4Т) от установленных в ее составе загрязнителей и токсичных компонентов и довести ее качество до кондиции питьевой воды.

Так, в соответствии с технологическими стадиями очистки НПВ содержание мышьяка было снижено с 200 мкг/дм^3 до следовых количеств, а содержание Fe^{3+}–катионов осадителей – до 0,1 мг/дм^3, что в 3 раза ниже значения ПДКв.(Fe).

Использование 5-ти кассетного картриджа на трековых мембранах позволило достичь 10-ти кратного снижения значения цветности исходной пробы НПВ (178° → 12°), с доведением этого показателя качества до регламентированного значения для питьевой воды: 20°. При этом показатель окисляемости перманганатной снижен с 16,6 до 1,5 мгО/дм^3 при нормативе не более 5 мгO_2/дм^3 согласно нормам СанПиН 2.1.4.559-96. Содержание низших структурных аналогов гумусовых кислот – фенолов в процессе очистки вод снизилось более чем в полтора раза. С учетом нового норматива максимально-допустимого значения фенольного индекса для хозяйственно-питьевых вод – 0,25 мг/дм^3 [7] – исследованные воды можно признать условно «благополучными» по фенолам.

Результаты шестикомпонентного анализа дают основание для вывода о значительном умягчении технологической пробы НВП: показатель общей жесткости пробы снижен втрое. При этом жесткость по кальцию снизилась в 25 раз, а жесткость по магнию в 2 раза (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Очистка пробы НПВ с. Кардоновка на комбинированной установке ВД-ТМ 205 Fex2 (ООО «Экомембраны) (объем пробы на каждом цикле – 50 дм^3; объемная скорость, V 100 мл/ 3мин; ~ 2л/час).

Время, час	Стадии очистки вод (содержание компонентов, мг-экв/дм^3; мг/ дм^3; (мкг/ дм^3 As))													
	Характеристика фильтров: предфильтры (войлочный /полипропиленовый/ + ВДК-MFe2)													
	Цв,^{0}	Окисл., мгО/дм^3	фенол	pH	минер	жест. общ.	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	HCO_3^- (CO_3^{2-})	Cl^-	SO_4^{2-}	As	$Fe_{общ}$
	Состав исходной пробы на стадии очистки от соединений мышьяка													
	178	16,6	0,057	8,46	1720	2,03	17,2	14,2	623,3	955(105)	326,1	37,2	202	0,30
	Состав пробы после ее очистки от соединений мышьяка													
0	142	14,3	0,052	7,10	1680	2,03	17,2	14,20	623,3	886	403	37,2	> 2	2,30
0,5	119			7,13		2,03	17,01	14,20						
1	124			7,20		2,01	17,0	14,12						
1,5	124	11,8	0,049	7,19	1688	2,01	17,0	14,12	637,5	895	398	37,2	след	0,15
2	128			7,20		2,0	17,0	14,0						
2,5	126			7,25		2,0	17,0	14,0						
3	126			7,29		2,0	17,0	14,0						
6	128	12,3	0,050	7,41	1656	2,0	17,0	14,0	581,4	906	390	39,1	н/обн	0,12
8	127			7,44		2,0	17,0	14,0						
10	128			7,47		2,0	17,0	14,0						
12	130	11,9	0,048	7,52	1645	2,0	17,0	14,0	549,4	909	392	40,2	н/обн	0,08
14	130			7,51		2,0	17,0	14,10						
16	132			7,50		2,0	17,0	14,0						
18	133	12,0	0,051	7,53	1678	2,0	17,0	14,0	560,1	912	372	41,0	н/обн	0,10
24	136	12,4	0,049	7,65	1631	2,0	17,0	14,0	550,7	910	365	42,5	н/обн	0,09
	физико-химические показатели коллективной пробы после первого цикла очистки													
	129	12,3	0,048	7,55	1648	2,01	17,01	14,2	594,5	890	391	39,3	н/обн	0,09

Продолжение таблицы 2.

№№	Время, час	Стадии очистки вод (содержание компонентов, мг-экв/дм^3; мг/ дм^3; (мкг/ дм^3 As))													
		Характеристика фильтров: трековые мембраны (ВДК-ТМ3) + уголь активированный кокосовый прессованный с серебром													
		Цв,^{0}	Окисл., мгО/дм^3	фенол	pH	минер	жест. общ.	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	HCO_3^- CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	As	$Fe_{общ}$
		Состав пробы перед вторым циклом очистки													
1		129	12,3	0,048	7,75	1648	2,01	17,01	14,2	594,5	890	391	39,3	н/обн	0,09
2	0				7,96		1,99	17,01	14,0						
3	0,5	14			8,00		1,99	17,0	14,0						
4	1				7,97		1,97	16,6	13,9						
5	1,5	13	0,70	0,044	8,01	1573	1,97	16,6	13,9	631	898	400	36,5		0,08
6	2				8,02		1,87	15,3	13,8						
7	2,5	14			8,03		1,87	15,0	13,7						
8	3				8,06		1,86	15,0	13,6						
9	6	15	0,85	0,042	8,10	1580	1,83	14,6	13,5	626	903	390	36		0,09
10	8				8,12		1,77	14,4	12,9						
11	10	17			8,10		1,70	13,0	12,9						
12	12	17	1,21	0,040	8,15	1531	1,70	13,0	12,9	640	902	379	36		0,09
13	14	19			8,18		1,62	11,2	12,9						
14	16				8,20		1,60	11,0	12,8						
15	18	20	1,36		8,25	1526	1,53	9,90	12,6	661	910	372	36		0,08
16	24	21	1,65	0,038	8,30	1526	1,45	9,05	12,6	663	920	372	36		0,10
		физико-химические показатели коллективной пробы после второго цикла очистки													
17		18	1,45	0,043	8,20	1587	1,98	16,7	13,9	646,8	908	388	36,5	н/обн	0,09

Окончание таблицы 2.

№№	Время, час	Стадии очистки вод (содержание компонентов, мг-экв/дм^3; мг/ дм^3; (мкг/ дм^3 As))													
		Характеристика фильтров: ВДК-UF(NL) + Na^+-катионообменная смола + постфильтр(ВДК-У4(NL))													
		Цв,^{0}	Окисл., мгО/дм^3	фенол	pH	минер	жест. общ.	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	HCO_3^- CO_3^{2-}	Cl^-	SO_4^{2-}	As	$Fe_{общ}$
		Состав пробы перед третьим циклом очистки													
1		18	1,45	0,043	8,20	1587	1,98	16,7	13,9	646,8	908	388	36,5	н/обн	0,09
2	0				8,20		1,97	15,1	12,4						
3	0,5				8,35		1,67	14,5	11,5						
4	1				8,40		1,57	12,8	11,3						
5	1,5	19	1,48	0,042	8,60	1606	1,40	9,90	10,7	759,8	880(27)	393	36		
6	2				8,65		1,24	7,20	9,92						
7	2,5				8,70		1,04	6,30	8,80						
8	3				8,70		0,97	5,80	8,30						
9	6	18	1,50	0,040	8,75	1420	0,94	5,50	8,01						

10	8				8,75		0,87	4,90	7,60						
11	10				8,80		0,80	3,50	7,60						
12	12	17	1,46	0,038	9,00	1467	0,65	1,10	7,20	807	844(63)	395	35,5		
13	14				9,10		0,63	0,80	7,10						
14	16				9,10		0,59	0,50	6,80						
15	18	19	1,46		9,15	1459	0,52	0,20	6,20	862	817(90)	402	35,5		
16	24	21	1,42	0,036	9,15	1480	0,52	0,20	6,20	862	817(90)	402	35,5		
		физико-химические показатели коллективной пробы после третьего цикла очистки													
17		18	1,47	0,037	9,03	1470	0,63	0,60	7,20	828	844(62)	400	35,5	н/обн	след

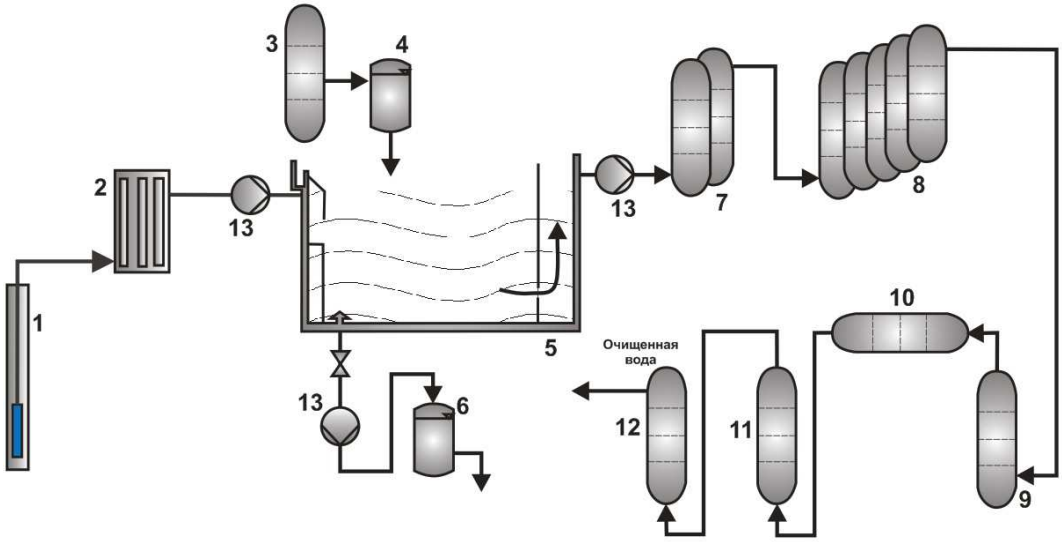


Рис.2. Общая технологическая схема очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка (скв 4Т, Кизлярский р-н, РД), 1. – геотермальная скважина; 2. - теплообменник; 3. - модуль реагента-осадителя; 4. – дозатор; 5. – резервуар-осадитель; 6. – шламонакопитель; 7. – блок модулей для механической очистки с картриджами FS-10TH + ВДК-Fe2; 8. - блок модулей с трековыми мембранами ВДК-ТМ3 * 5; 9. – модуль с угольным картриджем СВС (+ Ag); 10. – модуль универсальной очистки с картриджем ВДК-УС (NL); 11. – модуль для умягчения НПВ с картриджем БС (Na+–ионообменная смола; 12. - постфильтр с картриджем ВДК-У4(NL); 13. – насосы.

На основании полученных результатов была предложена общая технологическая схема очистки и умягчения НПВ с. Кардоновка (скв 4Т, Кизлярский р-н, РД) (см. рисунок 2).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт от 15.06.2009г. № 02.740.11.0059).

Литература:

1. *Каймаразов А.Г., Шабанова З.Э., Камалутдинова И.А., Ахмедов К.М.* Идентификация и количественное определение мышьяксодержащих загрязняющих компонентов низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна // // Материалы II Международной конференции. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала 27-30 сентября 2010г.; под ред. д.т.н. А.Б.Алхасова - Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2010.Махачкала. 2010. С. 295-307.
2. *Апандиев Р.Б., Шабанова З.Э., Каймаразов А.Г.* Оценка сорбционной способности наноструктурных углеродных материалов и промышленных активных углей для очистки вод от мышьяка // Материалы Ш Школы молодых ученых “Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов” им. Э.Э.Шпильрайна. Махачкала. 2010. С. 84-88.
3. *Коваленко А.С., Фомин А.В., Венгель П.Ф., Рогов В.В., Молчанов С.В.* Способ очистки сточных вод от мышьяка // Роспатент №2078052, дата регистр.27.04.1997.

4. *Кожемякин В. А., Градова И.О., Почтарев А.Н.* Электрокоагуляционный способ очистки сточных вод от мышьяка и взвешенных частиц //Тез. докл. II Всесоюзного совещания "Химия и технология халькогенов и халькогенидов", Караганда, 1982.– 226 с.
5. *Соложенкин П.М., Зубули А.И., Катсояннис И.А.* Очистка сточных вод от соединений мышьяка хемосорбционной фильтрацией // Хим. технология, 2007. т.8 №6. с. 277-283.
6. *Сибиряков А.* Железоокисный сорбент для водоподготовки //Материалы 9 Международного водного форума «ЭКВАТЭК-2010» (1-4 июня 2010). М.: МВЦ "Крокус Экспо", 2010.
7. Временные методические рекомендации по экспресс-опробованию подземных вод при ведении мониторинга. М.: ЗАО«ГИДЭК», 2004. – 67с.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ИНТЕНСИВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МНОГОСЛОЙНОЙ КОМПОЗИТНОЙ МИШЕНИ

Аливердиев А.А.

Учреждение РАН Институт физики им. Х. Амирханова Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т Шамиля, 39а; e-mail: aliverdi@frascati.enea.it

Изучение поведения вещества при высоких давлениях и температурах представляет фундаментальный и прикладной интерес в разных областях науки, включая астрофизику управляемый термоядерный синтез (с инерционным удержанием), материаловедение и т.д. [1-7]. Ударные волны в этих исследованиях имеют неоспоримое преимущество, позволяя получать давления, недоступные в статических условиях [8].

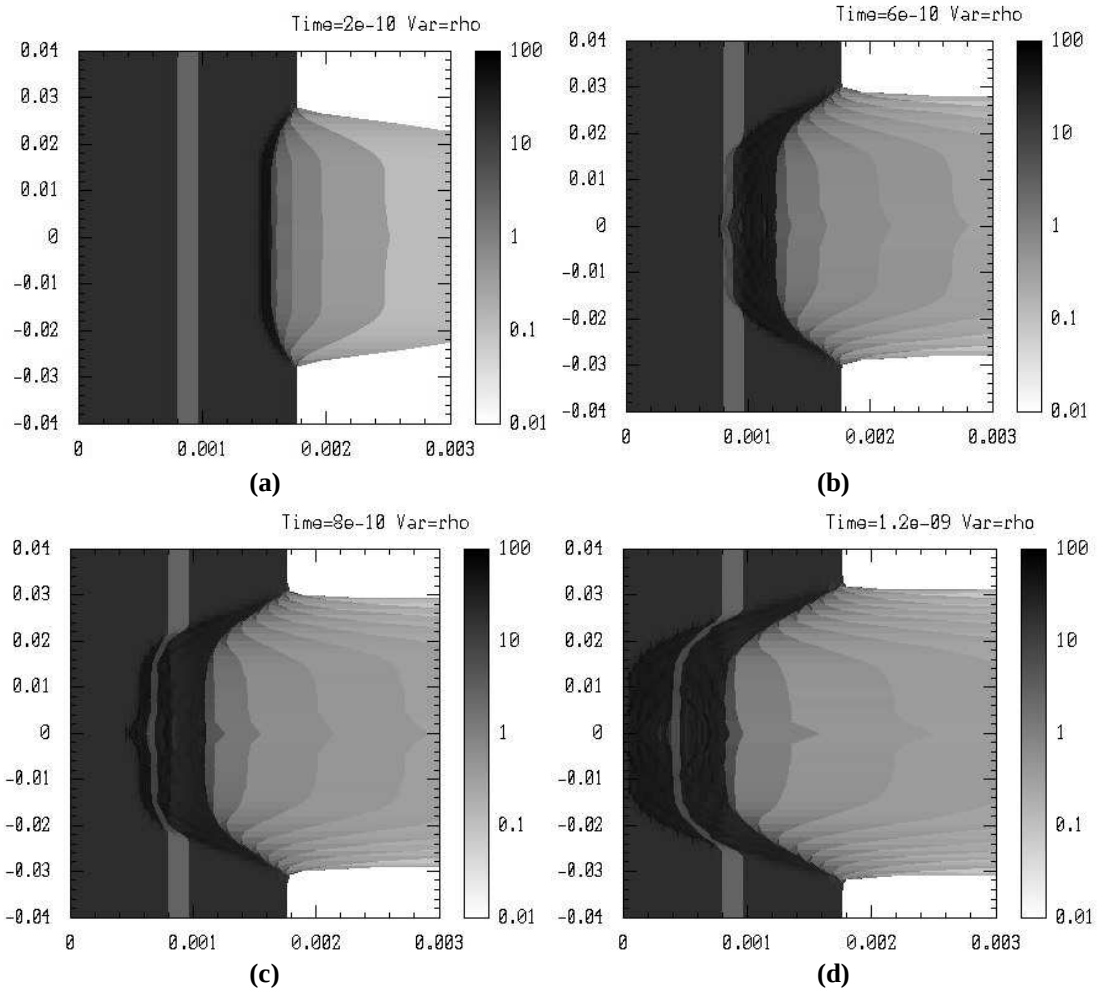


Рис.1.

Значительный прогресс был достигнут с появлением ионных пучков и мощных лазерных систем. В настоящий момент с их помощью удается достигнуть наибольших давлений среди лабораторных устройств [9]. Однако при высоких лазерных интенсивностях, необходимых для достижения давлений в десятки и сотни Мбар, в коллективных процессах лазерного поглощения начинает преобладать генерация горячих электронов и жесткого рентгеновского излучения, что приводит к предварительному разогреву мишени и создает трудности для ее сжатия [10,11].

Этот эффект проявляется слабо при интенсивностях лазерного излучения порядка 10^{13}-10^{14} Вт/см^2. При таких условиях во взаимодействии лазерного излучения с веществом продолжает преобладать режим столкновительного поглощения.

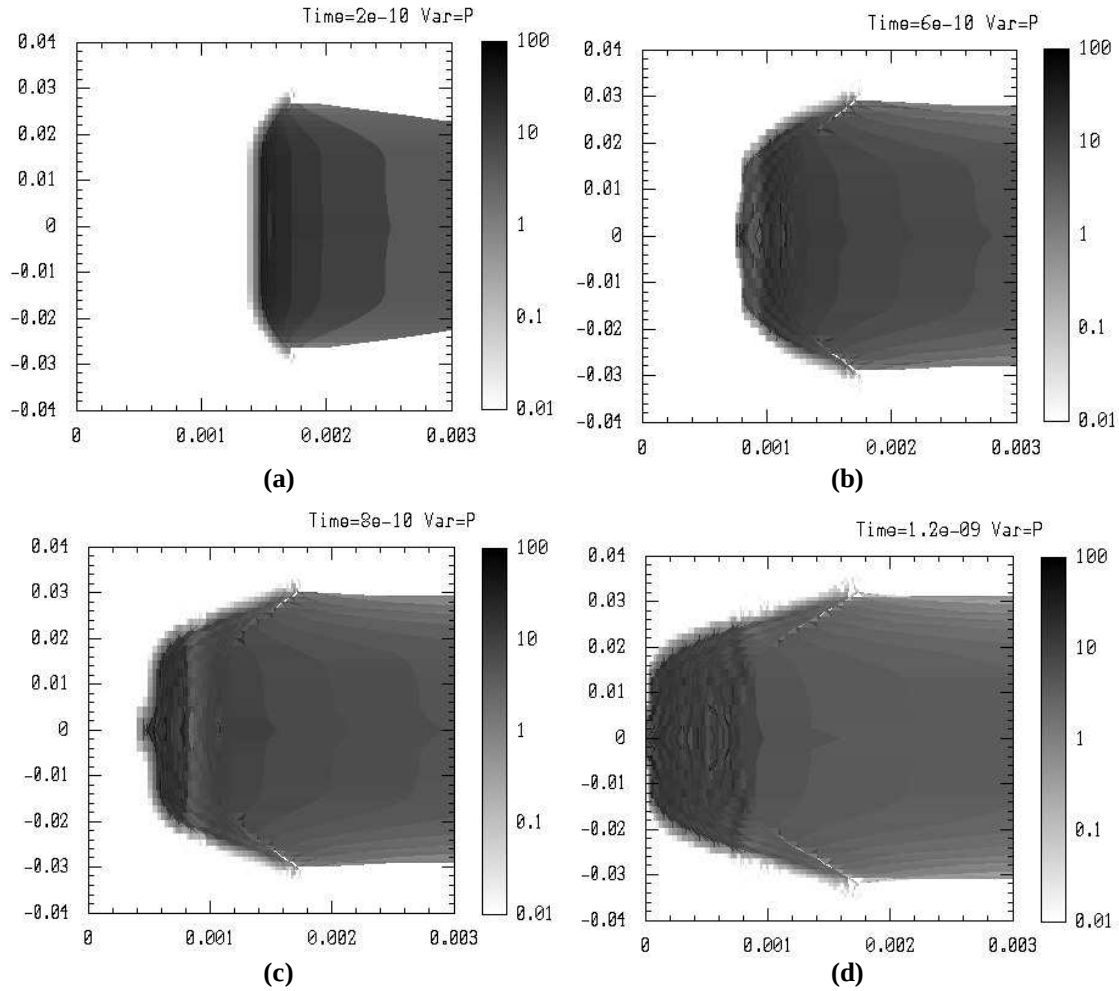


Рис.2.

Давление, получаемое в генерированной лазерным импульсом ударной волне, может быть оценено по формуле [12]:

$$P = 11.6\left(I/10^{14}\right)^{3/4}\lambda^{-1/4}\left(A/2Z\right)^{7/16}\left(Z^{*}t/3.5\right)^{-1/8}, \qquad (1)$$

где I интенсивность лазерного излучения в Вт/см^2, λ - длина волны в микронах, A, Z, и Z^{*} соответственно массовое число, атомное число и степень ионизации материала мишени, t – время в наносекундах. Другие оценки (см., например, [13]) дают близкие значения. Таким образом, интенсивности порядка 10^{14} Вт/см^2 могут быть давления в десятки мегабар.

Поэтому, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в последние годы с появлением тераваттных и петаватных лазерных систем [14,15], исследования в вышеочерченном диапазоне не теряют актуальности. С применением методики сглаживания пространственного профиля лазерного луча [16] и использованием высокоскоростной стрик-камеры, метод прямой передачи может давать относительную погрешность скорости ударной волны 1-2 % и давления 3-4 % при экстремальных давлениях 10-100 Мбар, что имеет значение, как для изучения астрофизических явлений, так и для технологии термоядерного синтеза инерционного удержания [17].

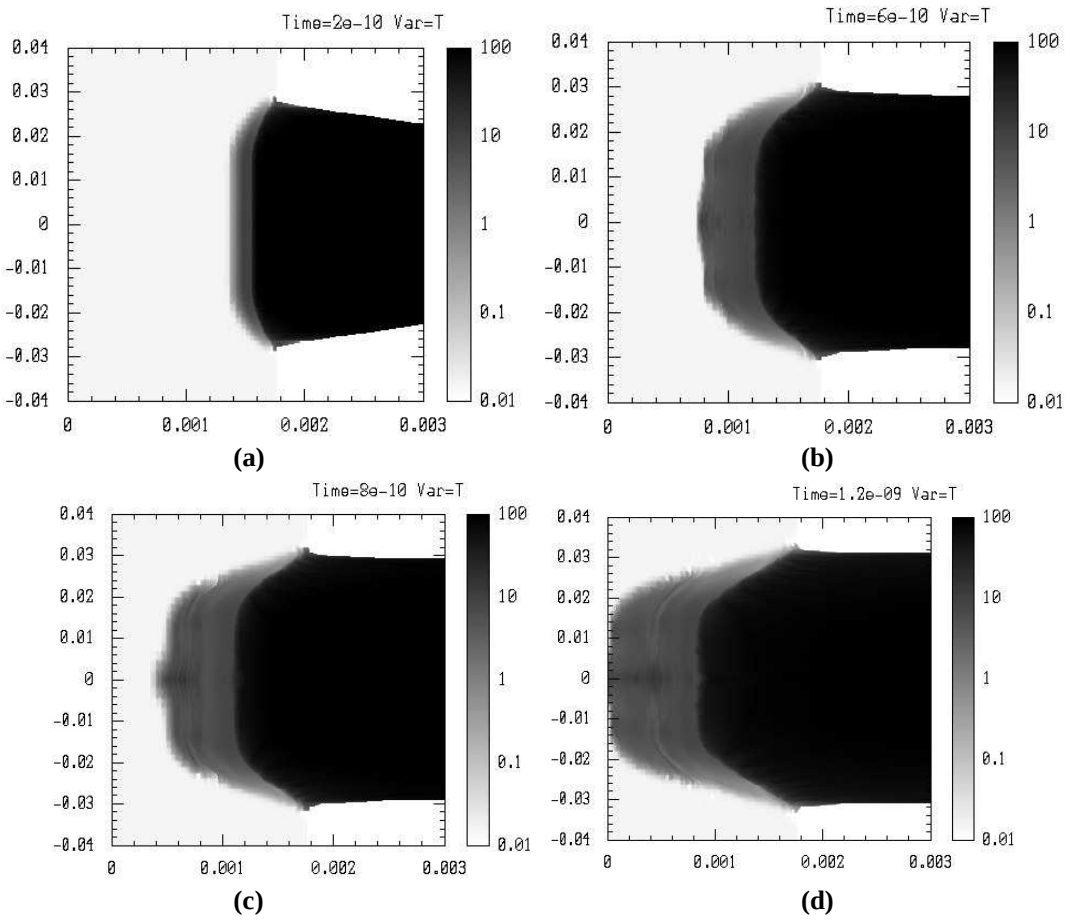


Рис.3.

Другое фундаментальное ограничение ударного сжатия состоит в том, что ударная волна сжимает и нагревает одновременно, так что давление и температура не являются независимыми переменными. Таким образом, могут быть получены только данные вдоль ударной адиабаты Гюгонио.

Частично преодолеть это ограничение можно, изменяя начальную плотность исследуемого вещества, как это, например, было использовано в [18-19]. Для получения более высоких давлений с меньшими температурами нами было предложено использовать трехслойные структуры, где тонкий слой материала с меньшим ударным импедансом зажат между слоями вещества с большим импедансом.

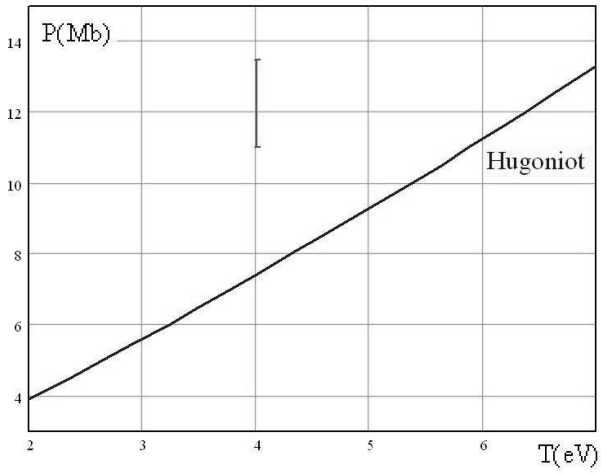


Рис.4.

Для определения оптимальных параметров нами была проведена серия численных экспериментов с использованием 2D гидрокода MULTI [20,21] с уравнениями состояния и коэффициентами поглощения, взятыми из стандартных библиотек [22-25].

Результаты типичного модельного эксперимента для трехслойной мишени золото-алюминий-золото (8 микрон- 1.7 микрон - 8 микрон) представлены на рисунках 1 (плотность в г/см^3) - 2 (давление в мегабарах) – 3 (температура в эВ). Мы видим, что после двух отражений (рис. 2-3 с) давление в тонком слое алюминия приблизительно равно первоначальному давлению в золоте, что существенно превышает соответствующее ударное давление в алюминии для той же температуры. Более наглядно это видно на рис. 4, где представлено давление в слое алюминия, удерживаемое в течение ~200 пс. Для сравнения приведена ударная адиабата алюминия.

Работа выполнена при частичной поддержке Landau Network - Centro Volta - Cariplo Foundation, INTAS (06-1000014-5638), ESF (SILMI, 2783), Госконтракта 02.740.11.0397 и РФФИ (09-01-96508).

Литература:

1. *А.В. Бушман, В.Е. Фортов,* Модели уравнения состояния вещества // УФН, том 140, вып.2, 1983, С. 180-232.
2. *J. Lindl,* Development of indirect-drive approach to inertial confinement fusion and target physics basis for ignition and gain // Phys. Plasmas, 2, 1995, pp. 3933-4024.
3. *P.M. Celliers, G.W. Collins, L.B. Da Silva, D.M. Gold, R. Cauble, R.J. Wallace, M.E. Foord, & Hammel, B.A.* Shock induced transformations of liquid deuterium into a metallic fluid. Phys. Rev. Lett. 84, 2000, pp. 5564–5567.
4. *B.A. Remington, R.P. Drake, H. Takabe, & D. Arnett* // A review of astrophysics experiments on intense lasers. Phys. Plasmas 7, 2000, pp. 1641-1652.
5. *D.H. Hoffmann, A. Blazevic, P. Ni , O. Rosmej, M. Roth, N.A. Tahir, A. Tauschwitz, S. Udrea, D. Varentsov, K. Weyrich, & Y. Maron,* // Present and future perspectives for high energy density physics with intense heavy ion and laser beams. Laser Part. Beams 23, 2005, 47-53.
6. *A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian, T. Vinci, A. Benuzzi-Mounaix, M. Koenig, and V. Malka,* Coronal hydrodynamics of laser-produced plasmas // Phys. Rev. E, 78, 046404, 2008.
7. *T. Desai, M. Bussoli, R. Dezulian, A. Villa, E. Krousky, A.A. Aliverdiev, M. Kubkowska and J. Wolowski,* Analogy of Meteorite impacts in Laboratory conditions, Physica Scripta, T142, 014027, 2010.
8. *Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер,* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений 2-е изд., М. Наука, 1966.
9. *В.Е. Фортов*. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН, том 177, вып. 4, 2007, стр. 347-368.
10. *D. Batani, A. Benuzzi, M. Koenig, I. Krasyuk, P. Pashinin, A. Semenov, I. Lomonosov, V. Fortov,* Problems of measurement of dense plasma heating in laser shock wave compression // Plasma Physics Controlled Fusion, 41, 1999 pp. 93-103.
11. *D. Batani, M. Koenig, A. Benuzzi, I.K. Krasyuk, P.P. Pashinin, A.Yu. Semenov, I.V. Lomonosov, & V. Fortov,* Problems of measurement of dense plasma heating in laser shock-wave compression // Laser and Particle Beams 17, 1999, 265-273.
12. *P. Mora,* Theoretical model of absorption of laser light by a plasma, Phys. Fluids, 25, 1982, 1051.
13. *J. Lindl,* Development of indirect-drive approach to inertial confinement fusion and target physics basis for ignition and gain. Phys. Plasmas 2, 1995, 3933-4024.

14. *A. Pukhov*, Strong field interaction of laser radiation // Rep. Prog. Phys. 66, 2003 p. 47.
15. *D. Umstadter*, Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers" Phys. Plasmas 8, 2001, p. 1774.
16. *M. Koenig, B. Faral, J.M. Boudenn, D. Batani, A. Benuzzi, & S. Bossi.*, Optical smoothing techniques foe shock wave generation in laser produced plasmas // Phys. Rev. E 50, R3314 (1994)
17. *S.D. Rothman, A.M. Evans, C.J. Horsfield, P. Graham, & B.R. Thomas*, Impedance mismatch equation of state using indirectly laser driven mutimagabar shocks // Phys. Plasmas 9, 2002, pp. 1721-1733.
18. *A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian and T. Vinci*, Porous carbon EOS: numerical analysis // Radiation Effects and Defects in Solids, 165, 2010, pp. 566-572.
19. *A. Aliverdiev, D. Batani, R. Dezulian and T. Vinci*, Carbon equation of state at high pressure: the role of the radiative transport in the impedance mismatch diagnostics // Nukleonika 2011, 56(2), pp. 165-169.
20. *R. Ramis, R. Schmattz, and J. Meyer-ter-Vehn*, MULTI – a computer code for one-dimension radiation hydrodynamics // Comput. Phys. Commun. 49, 1988, pp. 475-505.
21. *R. Ramis and J. Meyer-ter-Vehn*, MULTI2D – a computer code for two-dimension radiation hydrodynamics // Rep. MPQ174, Max-Plank-Institute für Quatenoptik, Garching, Germany, 1992.
22. SESAME Report on the Los Alamos Equation-of-State Library, Report No. LALP-83-4 (T4 Group LANL, Los Alamos, 1983)
23. *K.S. Holian* (ed.), T-4 Handbook of Material Properties Data Bases, Vol. 1C: Equations of State, LANL Report No. LA-10160-MS UC-34 (1984)
24. *M. Murakami, et al. J. of X-Ray* science and technology, 2, 127-148 (1990)
25. Final Report of Third International Opacity Workshop & Code Comparison Study, MPI fuer Quantenoptik, Garching, March 7-11 (1994).

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Абдуллаев А.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а; e-mail: ipgdncran.ru

Учёт высокой внутренней энергии, диссипативности, неоднородности структуры водной системы делает метод исследования её свойств локальным. Локальный метод исследования свойств водной системы и их изменения под влиянием внешних воздействий в первую очередь имеет целью объяснение локальных аномалий воды.

В предлагаемой работе проводится аналитико-экспериментальной анализ существующей информации по свойствам воды и разрабатывается методический подход к описанию локальных свойств водной системы и их изменений под влиянием внешнего магнитного поля.

Анализ влияния магнитного поля удобно начать с введения и использования понятия глубины его проникновения λ в водную систему. Исходя из физических соображений следует ожидать, что величина λ пропорциональна магнитной проницаемости водной системы соответствующей её локальной области.

В модели воды основанной на резонансном взаимодействии (РВ) атомов разных молекул магнитная проницаемость μ определяется равенством:

$$\mu = 1 - \alpha + 2\alpha^2 = 1 + \chi, \qquad (1)$$

где α – безразмерный параметр РВ атомов разных молекул, а $\chi = \alpha(2\alpha - 1)$ – магнитная восприимчивость локальной области.

Уточним теперь смысл и содержание термина глубины проникновения постоянного магнитного поля (ПМП) в водную систему в области действия РВ атомов разных молекул. В теории резонансных сил параметр α изменяется в интервале $0 < \alpha < 0{,}8$.

Известно, что молекулы воды обладают протонными донорно-акцепторными свойствами. Исследования показывают, что при $\alpha > 1/2$ протоны молекул H_2O способны совершать синхронные переходы между молекулами в области $R \approx 10^{-4}$см [1]. Влияние ПМП на область синхронных переходов протонов имеет сложных характер. Если принять, что действие ПМП на локальную область радиуса R проявляется в форме внешнего давления, то влияние внешнего ПМП сводится к созданию в локальной области условий для возникновения в них кластеров.

Глубину проникновения в воду магнитного поля как и размер области удобно определить по периметру области L. Имея ввиду пропорциональность величин λ и μ вышеотмеченную пропорциональность между λ и μ, можно получить важное соотношение:

$$\lambda = \mu L_0, \qquad (2)$$

где $L_0 = 2\pi R$.

Оценим теперь возможное число протонных переходов совершающихся во внутрь локальных областей радиуса R. Из выше приведенной модели действия магнитного поля легко убедится, что число синхронных протонных переходов СПП приблизительно определяется равенством:

$$N_{П} \approx \frac{2\pi R}{l}, \qquad (3)$$

где l – протяженность замкнутого контура в области СПП приходящейся на одну её молекулу. Для оценки $N_п$ можно положить: $l \approx 2 \cdot 10^{-8}$ см.

В этом случае имеем $N_п \approx \pi \cdot 10^4$. Определим теперь зависимость параметра α от ПМП. С этой целью нужно решить уравнение:

$$\alpha - \alpha^2 - K(1 - \alpha + 2\alpha^2) = 0, \qquad (4)$$

где $K = \frac{H^2 L_0 N_{П}}{4\pi\sigma_0} = \frac{H^2 L}{4\pi\sigma_0}$, $\sigma_0 = 38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м^2

Физически удовлетворительное решение уравнения (4) имеет вид:

$$\alpha_H = \frac{K}{1 - 2K} = \frac{H^2 L}{4\pi\sigma_0 - 2H^2 L}, \qquad (5)$$

Подставляя это значение параметра $\alpha_Н$ в определение локального значения поверхностного натяжения имеем:

$$\sigma'(H) = \alpha_H (1 - \alpha_H) = \frac{H^2 L(4\pi\sigma_0 - 3H^2 L)}{4\pi\sigma_0 - 2H^2 L}, \qquad (6)$$

Исследуя это выражение для σ´(Н) на экстремум, легко показать, что поверхностное натяжение σ´(Н) как функция имеет максимум при

$$\frac{H^2 L}{4\pi\sigma_0} = 1/4 \quad \textit{или} \quad \alpha_H = 1/2$$

В научной литературе [3] имеется указание о том, что функция σ(Н) имеет максимум H_{max}= 600 кА/м. Однако аналитические исследования там полностью отсутствуют.

Далее, обозначая через σ_0 значение поверхностного натяжения воды, возникающего за счет других локальных не резонансных сил, локальное значения полного поверхностного натяжения можно представить в виде:

$$\sigma(H) = \sigma_0[1 + \alpha_H (1 - \alpha_H)] \qquad (7)$$

Результаты расчета кривой σ(Н) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость поверхностного натяжения водной системы от магнитного поля.

$\alpha_Н$	Н, кА/м	$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м^2
0,104	224,40	60,32
0,10	348,55	63,22
0,20	444,44	67,28
0,50	600,00	72,50
0,66	630,48	70,70
0,75	645,00	69,02

Рассмотрим теперь вязкость воды. Согласно экспериментально установленному Бачинским закону вязкости жидкостей и в частности воды по существу определяется молекулярным объемом. В общем случае молекулярный объем зависит от сил взаимодействия между молекулами и внешних воздействующих факторов. В модели воды основанной на РВ атомов разных молекул, молекулярный объем выражается через параметр РВ. Это вытекает из следующих простых соображений. Так как в области РВ атомов различных молекул элемент объема определяется величиной $V = v_0\alpha^{-1}$, то сжатый объем локальной области следует определить с помощью равенства:

$$V_{сж} = v_0 \cdot \left(\frac{0.8 - \alpha}{0.8 + \alpha} \right), \quad (8)$$

где число 0,8 есть максимальное возможное значения параметра α.

В этом случае модельная разность объемов Бачинского определяется величиной:

$$V - V_{сж} = v_0 [\frac{1}{\alpha} - \frac{0.8 - \alpha}{0.8 + \alpha}] = v_0 [\frac{0.8 - 0.2\alpha + \alpha^2}{\alpha(0.8 + \alpha)}] \quad (9)$$

Так как свободный объем является главным фактором в формуле Бачинского для объемной вязкости по Бачинскому может быть представлен в виде:

$$\eta = \eta_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\alpha(0{,}8 + \alpha)}{0.8 - 0.2\alpha + \alpha^2} \right] \right\}, \quad (10)$$

где η_0 – независящая от взаимодействия атомов разных молекул и от внешнего магнитного поля часть вязкости водной системы.

Зависящая же часть от внешнего магнитного поля часть вязкости воды–η_1 определяется вторым членом равенства (10), где значения параметра α при различных значениях внешнего магнитного поля определяются таблицами 2 и 3.

Таблица 2.

$H \cdot 10^{-2}$ кА/м	3,14	4,11	4,65	5,10	5,47	16,27	16,77	16,87
α	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,66	0,75	0,8

Значения вязкости воды в области синхронных протонных переходов определяется таблицей 3

Таблица 3.

α_H	0,5	0,66	0,75
η_1	0,24	0,39	0,44

Анализ расчётных данных таблиц 1-3 позволяет сделать следующие выводы:

Изменения величин поверхностного натяжения и вязкости значительны и представляют практический интерес.

Вклады резонансных сил впервые учтенных в данной работе и зависящие от внешнего магнитного поля состоят: в понижении поверхностного натяжения и в понижении вязкости соответственно 24 и 25 %.

В области существования в водной системе кластерной компоненты ($\alpha \succ 1/2$) магнитное поле приводит к уменьшению поверхностного натяжения на 5 % и к увеличению вязкости на 23 %.

Выявленные изменения свойства воды ассоциированы с регулированием в процессах добычи и использования термальных вод и остаточных углеводородов целого ряда капиллярных эффектов (смачивание, капиллярное давление, межфазное натяжение и т.д.).

Отметим также, что при магнитной обработке термальных вод более существенно изменяются диэлектрическая проницаемость и магнитная восприимчивость. Эти вопросы до конца ещё не исследованы.

Литература:

1. *Зацепина Г.Н.* Физические свойства и структура воды. Изд-во Московского университета. 1967. 171с.
2. *Абдуллаев А.А.* Журнал Ядерная физика. 1968. № 6. С.139.
3. *Душкин С.С., Евстратов В.Н.* Магнитная водоподготовка на химических предприятиях. М.: Химия. 1986. 141с.

ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ LI,CA//SO_4,MOO_4

Дибиров Я.А.

Филиал объединенного института высоких температур РАН;
Махачкала, Россия; 367030, Махачкала, ул.Ярагского, 75; e-mail: jakhya@yandex.ru

Разработка новых энергоемких теплоаккумулирующих композитных материалов является одной из важных проблем современной тепловой энергетики. Перспективным направлением в решении этой проблемы является разработка высокоэффективных способов аккумулирования тепла, в частности, тепловое аккумулирование с использованием скрытых теплот фазовых переходов солевых нонвариантных смесей. Основным критерием, позволяющим оценить эффективность того или иного теплоаккумулирующего материала, является плотность аккумулируемой тепловой энергии, т.е. количество запасаемой теплоты, приходящееся на один кубометр бака-аккумулятора, в качестве рабочего тела которого служит искомый состав. Плотность аккумулируемой тепловой энергии фазопереходных нонвариантных составов многокомпонентных солевых систем можно увеличить в разы, если использовать их в сочетании с теплоемкостной и (или) термохимической составляющими запасаемой тепловой энергии этих сплавов.

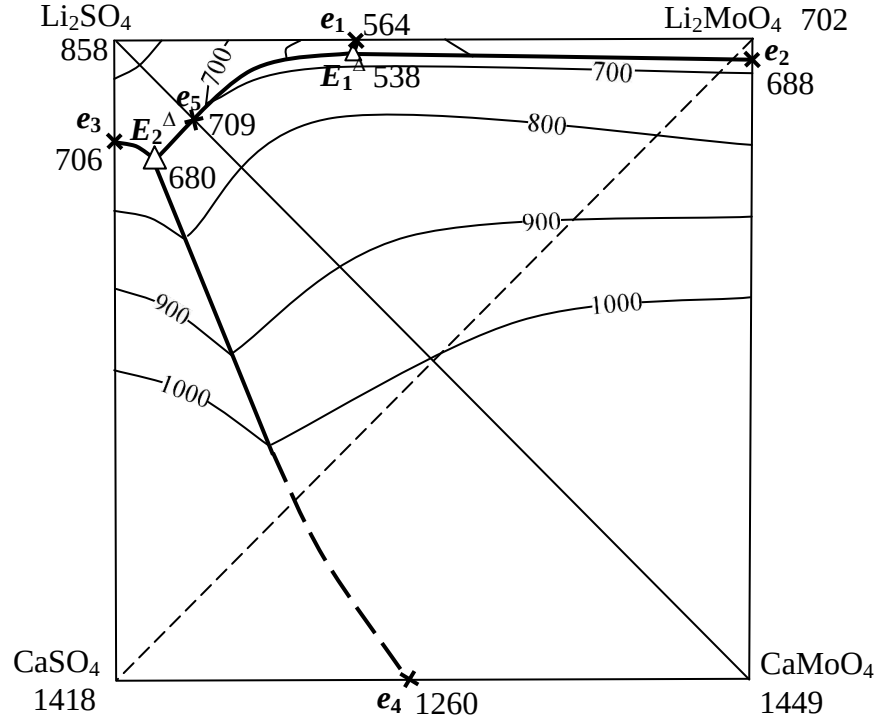


Рис.1. Проекция политермы на квадрат составов системы Li,Ca//SO_4,MoO_4.

С целью получения энергоемких фазопереходно - теплоемкостных и термохимических составов для теплового аккумулирования в качестве объекта исследований выбрана тройная взаимная система Li,Ca//SO_4,MoO_4, выбор которой обусловлен тем, что в ее состав входят достаточно теплоемкостные кальциевые природные минералы: ангидрит ($CaSO_4$), повеллит ($CaMoO_4$) и литиевые соли, обладающие высокими значениями энтальпий фазового перехода, а реакции обмена между компонентами выбранной системы характеризуются высокими

значениями тепловых эффектов.

Температуры плавления и составы всех нонвариантных сплавов исследуемой системы были определены методами физико-химического анализа:
Li_2SO_4 – Li_2MoO_4 ($\boldsymbol{e_1}$): эвтектика при 564 ^oC и 62,5 экв.% Li_2SO_4, [1];
Li_2MoO_4 – $CaMoO_4$ ($\boldsymbol{e_2}$): эвтектика при 688 ^oC и 3 экв.% $CaMoO_4$ [2];
Li_2SO_4 – $CaSO_4$ ($\boldsymbol{e_3}$): эвтектика при 695 ^oC и 16,2 мол.% $CaSO_4$ [1];
$CaSO_4$ – $CaMoO_4$ ($\boldsymbol{e_4}$): эвтектика при 1260 ^oC и 43 мол.% $CaMoO_4$ [3];
Li_2SO_4 – $CaMoO_4$ ($\boldsymbol{e_5}$): эвтектика при 709 ^oC и 11 мол.% $CaMoO_4$ [4];
Li_2SO_4 – Li_2MoO_4 – $CaMoO_4$ ($\boldsymbol{E^{\Delta}_1}$): эвтектика при 538 ^oC и 59,8 мол.% Li_2SO_4, 36,7 мол.% Li_2MoO_4, 3,5 мол.% $CaMoO_4$ [4] ;
Li_2SO_4 – $CaSO_4$ – $CaMoO_4$ ($\boldsymbol{E^{\Delta}_2}$): эвтектика при 680 ^oC и 82 мол.% Li_2SO_4, 11,44 мол.%, $CaSO_4$, 6,56 мол.% $CaMoO_4$ [4].

Теплоты фазовых переходов ($\Delta H_{ф.п.}$) всех нонвариантных составов системы определяли количественным дифференциально-термическим анализом по формуле [5]:

$$\Delta H_{ф.п.обр.} = (\Delta H_{ф.п.эт.} \cdot S_{обр} \cdot (1+0{,}00052\Delta T)) / S_{эт},$$

где $S_{обр}$ и $S_{эт}$, $\Delta H_{ф.п.обр.}$ и $\Delta H_{ф.п.эт.}$, ΔT – соответственно площади пиков, энтальпии плавления и разность температур плавления образца и эталона.

Теплоемкостную составляющую этих составов, в которой учитывается тепло за счет теплоемкости материала при переходе его к стандартной температуре (298,15 К) от температуры фазового перехода, рассчитывали по высокотемпературным составляющим энтальпий индивидуальных веществ (H^o_T - H^o_{298}). Значения H^o_T - H^o_{298} приводятся в справочных таблицах термодинамических функций индивидуальных веществ.

Термохимическую составляющую аккумулируемой тепловой энергии соответствующего сплава рассчитывали по тепловым эффектам реакций взаимного обмена (ΔH^o_T) при температуре Т по формуле [6]:

$$\Delta H^o_{Тт.х.} = \Delta H^o_{298} + \sum(n_i \cdot (H^o_T - H^o_{298})),$$

где ΔH^o_{298} – изменение энтальпии реакции при 298 К, $\sum(n_i \cdot (H^o_T - H^o_{298}))$– алгебраическая сумма значений ее для соответствующих количеств начальных веществ и конечных продуктов реакции.

Как известно, тепловой эффект реакции при температуре 298 К (ΔH^o_{298}) равен сумме значений изменения теплоты образования соответствующих количеств конечных продуктов за вычетом суммы этих же значений для соответствующих количеств начальных веществ [6]:

$$\Delta H^o_{298} = \sum (n_i (\Delta H^o_{298})_i)_{кон} - \sum(n_i(\Delta H^o_{298})_i)_{нач}.$$

Для определения левой и правой частей реакции взаимного обмена, протекающей при температуре кристаллизации в соответствующей нонвариантной точке, состав фигуративной точки данного состава подбирали составляющими как стабильного комплекса, так и составляющими метастабильного комплекса. Состав данной фигуративной точки в метастабильном комплексе (метастабильном треугольнике) является левой частью, а тот же состав в стабильном комплексе (в стабильном треугольнике) – правой частью уравнения реакции взаимного обмена (табл. 1). Так, например, состав $\boldsymbol{E^{\Delta}_1}$ на рис. можно подбирать составляющими метастабильного треугольника Li_2SO_4–Li_2MoO_4–$CaSO_4$ (левая часть уравнения), а также составляющими стабильного треугольника Li_2SO_4–Li_2MoO_4–$CaMoO_4$ (правая

часть уравнения) (табл. 1).

Правомерность трех уравнений химических реакций взаимного обмена, протекающих в нонвариантных точках при их температуре кристаллизации и расположенных на поле (а не на двойных сторонах) квадрата составов исследуемой тройной взаимной системы ($\boldsymbol{e_5}$, $\boldsymbol{E^{\Delta}_1}$ и $\boldsymbol{E^{\Delta}_2}$), проверена расчетом стандартного изменения энергии Гиббса (ΔG^o_T) в результате реакций (табл. 1) по формулам [6]:

$$\Delta G^o_T = - RT \cdot lnK \quad \text{и} \quad \Delta G^o_T = \Delta H^o_T - T \cdot \Delta S^o_T,$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,3143 Дж/(моль·К); Т – абсолютная температура, К; K – константа равновесия реакции; ΔH^o_T – стандартное изменение энтальпии реакции при температуре Т, Дж/моль; ΔS^o_T – стандартное изменение энтропии реакции при температуре Т, Дж/(моль·К).

Таким образом, суммарная тепловая энергия, запасаемая фазопереходно-теплоемкостным аккумулятором в интервале температур 298 ÷ $T_{пл.}$, определяется формулой:

$$\Delta H_1 = (H^o_{Тф.п.} - H^o_{298}) + \Delta H_{ф.п.},$$

где $T_{ф.п.}$ – температура фазового перехода.

Суммарная теплота, запасаемая фазопереходно-термохимичским аккумулятором при температуре фазового перехода, определяется по формуле:

$$\Delta H_2 = \Delta H_{ф.п.} + \Delta H^o_{Тт.}.$$

Суммарная тепловая энергия, запасаемая фазопереходно-теплоемкостно-термохимическим аккумулятором в интервале температур 298 ÷ $T_{пл.}$, можно рассчитать по формуле:

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 + \Delta H_2 - \Delta H_{ф.п} = (H^o_{Тф.п.} - H^o_{298}) + \Delta H_{ф.п.} + \Delta H^o_{Тт.х.}.$$

Плотность расплавов солей определялась методом гидростатического взвешивания платинового шарика, прикрепленного на платиновой нитке к одному плечу коромысла аналитических весов [7]. Фиксирование глубины погружения осуществлялась с применением платинового электрода. Плотность расплава рассчитывалась по формуле:

$$\rho_t = (m_b - m_d)/V_t,$$

где ρ_t – плотность расплава при температуре t ^oC, кг/м^3; m_b – масса платинового шарика при 20 ^oC, кг; m_d – масса шарика в расплаве при температуре t, ^oC, кг; V_t – объём шарика при температуре t ^oC, м^3. Объём шарика при различных температурах определялся по расплавам солей с известной плотностью в нужном интервале температур.

Параметры теплоаккумулирующих нонвариантных сплавов тройной взаимной системы Li,Ca//SO_4,MoO_4 приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, доля теплоемкостной составляющей сопоставима и во всех случаях в разы превосходит долю фазопереходной составляющей общей аккумулируемой тепловой энергии.

Для возможности более полного использования термохимического эффекта в тепловых аккумуляторах нонвариантная точка должна быть близка по составу с элементами полной конверсии. В общем случае исходные нонвариантные составы практически никогда не соответствуют элементам полной конверсии. Концентрации исходных веществ, которые полностью расходуются в

процессе реакций взаимного обмена, а, следовательно, и доля используемого термохимического эффекта, в реальных взаимных системах обычно не превышает 30 ÷ 40 %.

Отметим, что термохимические аккумуляторы тепла данной тройной взаимной системы можно использовать только как монотропные термохимические накопители тепла, т. к. система $Li,Ca//SO_4,MoO_4$, является необратимо-взаимной и значения ΔG^o_T в результате этих реакций при температуре их плавления (табл.1) свидетельствует об их практической необратимости при данной температуре.

Таблица 1. Подбор составов нонвариантных точек системы $Li,Ca//SO_4,MoO_4$ составляющими стабильного и метастабильного комплексов и параметры их химического взаимодействия.

Нонв. точка	**Состав, эквивалентные доли**		**ΔG^o_T, кДж**	**$\Delta H^o_{Tт.х.}$, кДж/кг**
	метастабильный симплекс	**стабильный симплекс**		
e_5	$0,78Li_2SO_4+0,11Li_2MoO_4+$ $+0,11CaSO_4$	$0,89Li_2SO_4+0,11CaMoO_4$	-37,7	- 35,6
E^{Δ}_1	$0,567Li_2SO_4+0,4Li_2MoO_4+$ $+0,033CaSO_4$	$0,6Li_2SO_4+0,033CaMoO_4+$ $+0,367Li_2MoO_4$	-35,2	- 9,0
E^{Δ}_2	$0,754Li_2SO_4+0,066Li_2MoO_4+$ $+0,18CaSO_4$	$0,82Li_2SO_4+0,114CaSO_4+$ $+0,066CaMoO_4$	-37,3	- 21,7

Таблица 2. Параметры теплоаккумулирующих нонвариантных составов тройной взаимной системы $Li,Ca//SO_4,MoO_4$

Обоз.	**$T_{пл.}$, ^oC**	**$\Delta H_{ф.п.}$, кДж/кг**	**$H^o_T-H^o_{298}$, кДж/кг**	**$\Delta H^o_{Tт.х}$, кДж/кг**	**ΔH_1, кДж/кг**	**ΔH_2, кДж/кг**	**ΔH_3, кДж/кг**	**$\rho_ж$, кг/м^3**	**ΔH, МДж/м^3**
e_1	564	358	698	-	1056	-	1056	2353	2485
e_2	688	295	694	-	989	-	989	2922	2890
e_3	695	272	1175	-	1447	-	1447	2047	2962
e_5	709	197	1214	35,6	1411	233	1447	2123	3072
E^{Δ}_1	538	407	645	9,0	1052	416	1061	2385	2530
E^{Δ}_2	680	207	1127	21,7	1334	229	1356	2110	2861

Полученные на основе тройной взаимной системы $Li,Ca//SO_4,MoO_4$ теплоаккумулирующие составы с температурой фазового перехода 538 ÷ 709 ^oC и плотностью суммарной аккумулируемой тепловой энергии 2485 ÷ 3072 МДж/м^3 рекомендуются использовать как теплонакопители в тепловых аккумуляторах.

Литература:

1. Справочник по плавкости систем из безводных неорганических солей. Т. 1. Двойные системы // Под ред. Н. К. Воскресенской. - М.; – Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – 845 с.
2. *Гасаналиев А.М., Трунин А.С., Дибиров М.А.* Диаграмма плавкости системы $Li,Ca//Cl,MoO_4$ // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 1981. – Т. 4, № 2. – С. 194 -196.

3. *Арбуханова П.А., Дибиров Я.А., Вердиев Н.Н., Вайнштейн С.И.* Система CaF_2 – $CaSO_4$ – $CaMoO_4$ // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, № 2. – С. 36 – 38.
4. *Вердиев Н.Н., Дибиров Я.А., Арбуханова П.А., Вайнштейн С.И.* Трехкомпонентная взаимная система $Li,Ca//SO_4,MoO_4$ // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. – 2009. – Т. 50, Вып. 2. – С. 139 – 144.
5. *Васина Н.А., Грызлова С.Е., Шапошникова С.Г.* Теплофизические свойства многокомпонентных систем. – М.: Химия, 1984. – 113 с.
6. *Киреев В.А.* Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. – М.: Химия, 1970. – 520 с.
7. *Трунин А.С.* Комплексная методология исследования многокомпонентных систем. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 1997. -308 с.

ДОКЛАДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТЕХНОЛОГИЯ СЪЕМА ПЕТРОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛА

Алхасова Д.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а

В настоящее время в возобновляемой энергетике широко распространено использование петротермальной тепловой энергии.

В данной работе проведена оценка эффективности использования глубоких скважинных теплообменников для извлечения тепла горных пород.

На рис. 1 приведена принципиальная схема вертикального скважинного теплообменника (СТО) для нагрева артезианской воды за счет съема тепла горных пород.

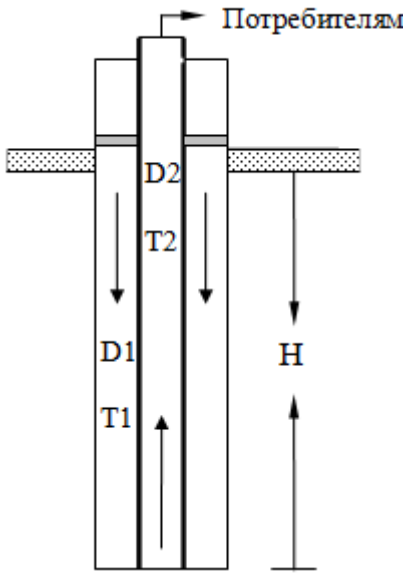


Рис. 1. Схема вертикального СТО.

В кольцевой зазор, образованный лифтовой и обсадной колоннами, поступает вода артезианского водоносного пласта. Двигаясь вниз по кольцевому зазору, вода нагревается за счет отбора тепла горных пород. В нагретом состоянии вода поднимается вверх по лифтовой колонне и направляется потребителям. Наружная поверхность лифтовой колонны теплоизолирована во избежание теплопотерь. Циркуляция воды в теплообменнике обеспечивается насосом, расположенном над пакером, выше артезианского водоносного пласта.

Тепловые потоки направлены: от горной породы через обсадную колонну в кольцевой зазор артезианской воде; от подогретой воды через лифтовую теплоизолированную колонну к нагреваемой воде в кольцевом зазоре. Ставится

задача определения температуры артезианской воды на выходе из скважинного теплообменника.

Режим течения теплоносителей по трубе и по кольцевому зазору турбулентный. Среднюю по кольцевому сечению установившуюся температуру обозначим $T_1(z)$, среднюю по круговому сечению температуру - $T_2(z)$.

Тепловые потоки от горной породы в кольцевой зазор, а также из лифтовой колонны в кольцевой зазор

$$q_{T1}=\frac{2\pi(T_Г-T_1)}{\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_1^i}{R_1^i-\delta_{T1}}+\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_1^e}{R_1^i}+\frac{1}{\lambda_Г}\ln\frac{R(t)}{R_1^e}} \quad (1)$$

$$q_{T2}=\frac{2\pi(T_2-T_1)}{\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_2^i}{R_2^i-\delta_{T2}}+\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_2^e}{R_2^i}+\frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}}{R_2^e}+\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}+\delta_{T1}}{R_2^e+\delta_{из}}} \quad (2)$$

z – вертикальная координата, направленная вниз; R_1^i, R_1^e - внутренний и внешний радиусы обсадной колонны; R_2^i, R_2^e - внутренний и внешний радиусы лифтовой колонны; $R(t)$ – условный радиус температурного влияния скважины; H – глубина теплообменника; $Г$ – геотермический градиент; λ_B, λ_M, $\lambda_Г$, $\lambda_{ИЗ}$ – коэффициент теплопроводности воды, металла, горной породы, изоляционного материала; δ_{T2} - толщина температурного пристеночного слоя на внутренней поверхности внутренней трубы; δ_{T1} - толщина температурного пристеночного слоя на наружной поверхности внутренней трубы и внутренней поверхности обсадной трубы; $\delta_{ИЗ}$–толщина изоляции.

Тепловой поток из лифтовой колонны в горную породу выше уровня артезианского водоносного горизонта рассчитывается отдельно для каждой из двух зон в кольцевом зазоре: водной и воздушной

$$q_{T3}=\frac{2\pi(T_2-T_{Г(В,ВЗ)})}{\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_2^i}{R_2^i-\delta_{T2}}+\frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_2^e}{R_2^i}+\frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}}{R_2^e}+\frac{1}{\lambda_{В,ВЗ}}\ln\frac{R_1^i}{R_2^e+\delta_{из}}+\frac{1}{\lambda_M}\frac{R_1^e}{R_1^i}+\frac{1}{\lambda_Г}\frac{R(t)}{R_1^e}} \quad (3)$$

Выражения для тепловых потоков получены с учетом теплового сопротивления, оказываемого температурным пристеночным слоем, образующимся на поверхностях труб. Толщины его зависят от числа Нуссельта для трубы и кольца.

Решение задачи сводится к решению дифференциальных уравнений, описывающих изменение температуры теплоносителя по высоте теплообменника. После некоторых выкладок получим выражения для профилей температуры теплоносителя в круговом и кольцевом зазорах.

$$T1(z)=\left(1-\frac{k1}{\beta}\right)C1e^{k1z}+\left(1-\frac{k2}{\beta}\right)C2e^{k2z}+Гz+B-\frac{Г}{\beta} \quad (4)$$

$$T2(z)=C1e^{k1z}+C2e^{k2z}+Гz+T_Г(0), \quad (5)$$

где $$\alpha = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_1^i}{R_1^i-\delta_{T1}} + \frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_1^e}{R_1^i} + \frac{1}{\lambda_\Gamma}\ln\frac{R(t)}{R_1^e}\right)c_B Q}$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_2^i}{R_2^i-\delta_{T2}} + \frac{1}{\lambda_M}\ln\frac{R_2^e}{R_2^i} + \frac{1}{\lambda_{из}}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}}{R_2^e} + \frac{1}{\lambda_B}\ln\frac{R_2^e+\delta_{из}+\delta_{T1}}{R_2^e+\delta_{из}}\right)c_B Q}$$

$$k1,2 = \frac{-\alpha}{2} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{4}+\alpha\beta}\ ;\ \begin{pmatrix} C1 \\ C2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\frac{k1}{\beta} & 1-\frac{k2}{\beta} \\ \frac{-k1}{\beta}e^{k1H} & \frac{-k2}{\beta}e^{k2H} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} T1(0)-T_\Gamma(0) \\ \frac{\Gamma}{\beta} \end{pmatrix}$$

Для расчетов примем следующие данные: λ_B =0,63 Вт/м·°С; λ_M =45 Вт/м·°С; $\lambda_{ИЗ}$ =0,05 Вт/м·°С; Q=500 м^3/сут; c_B =4,19 МДж/м^3·°С; D_1^i=200 мм; D_1^e=220 мм; D_2^i=88 мм; D_2^e =107 мм; $R(t)$=10 м; $\delta_{ИЗ}$=12 мм.

Профили температуры по высоте теплообменника при различных значениях геотермического градиента представлены на рис. 2

В расчетах условный радиус распространения температурного фронта R(t) принимаем равным 10 м, что приблизительно соответствует 1 году эксплуатации теплообменника [1].

Выражения (1) и (2) для теплового потока представлены с учетом толщин температурного пристеночного слоя, образующегося на поверхностях труб. Как показали расчеты, эти толщины малы в сравнении с радиусами труб. Для наших значений параметров δ_{T1} =0,3 мм; δ_{T2} =0,1 мм.

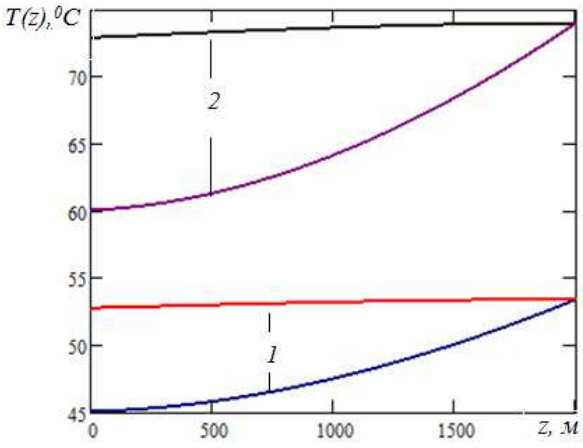


Рис. 2. Профили температур по высоте СТО
1- Г=0,03°С/м; 2- Г=0,05°С/м.

Прирост температуры теплоносителя определится как $\Delta T = T2(0) - T1(0)$.

В табл. 1, 2, 3 приведены результаты расчетов прироста температуры в СТО различной высоты.

Табл. 1. Прирост температуры теплоносителя в СТО. Г=0,03°С /м; D_1^i =200 мм; D_1^e =220 мм; D_2^i =88 мм; D_2^e =107 мм.

H, км	*Q=500 м³/сут*			*Q=1000 м³/сут*			*Q=2000 м³/сут*			*Q=3000 м³/сут*		
	$\lambda_Г$, *Вт/м·°С*											
	2,0	***2,5***	***3,0***	***2,0***	***2,5***	***3,0***	***2,0***	***2,5***	***3,0***	***2,0***	***2,5***	***3,0***
2	6,3	7,7	9,0	3,3	4,0	4,8	1,6	2,0	2,5	1,1	1,4	1,7
3	13,5	16,3	18,2	7,2	8,9	10,5	3,7	4,6	5,5	2,5	3,1	3,7
4	22,7	27,2	31,3	12,6	15,4	18,1	6,6	8,1	9,7	4,4	5,5	6,6
5	33,7	39,9	45,4	19,2	23,4	27,3	10,2	12,5	14,9	6,9	8,5	10,2

Табл. 2. Прирост температуры теплоносителя в СТО при различных значениях геотермического градиента. D_1^i =200 мм; D_1^e =220 мм; D_2^i =88 мм; D_2^e =107 мм.

H, км	*Q=1000 м³/сут*						*Q=2000 м³/сут*					
	Г=0,03°С /м		*Г*=0,05°С /м		*Г*=0,06°С /м		*Г*=0,03°С /м		*Г*=0,05°С /м		*Г*=0,06°С /м	
	$\lambda_Г$, *Вт/м·°С*											
	1,5	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***
2	2,5	3,3	4,1	5,5	5,0	6,6	1,2	1,6	2,1	2,8	2,5	3,3
3	5,5	7,2	9,2	12,1	11,0	14,5	2,8	3,7	4,7	6,2	5,6	7,5
4	9,6	12,6	16,1	21,0	19,3	25,2	5,0	6,6	8,3	11,0	10,0	13,2
5	14,8	19,2	24,7	32,0	29,6	38,5	7,7	10,2	12,9	17,0	15,5	20,4

Табл. 3. Прирост температуры теплоносителя в СТО при различных значениях геотермического градиента. D_1^i =390 мм; D_1^e =410 мм; D_2^i =187 мм; D_2^e =205 мм.

H, км	*Q=1000 м³/сут*						*Q=500 м³/сут*					
	Г=0,03°С /м		*Г*=0,05°С /м		*Г*=0,06°С /м		*Г*=0,03°С /м		*Г*=0,05°С /м		*Г*=0,06°С /м	
	$\lambda_Г$, *Вт/м·°С*											
	1,5	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***	***1,5***	***2,0***
2	2,8	3,7	4,8	6,3	5,7	7,5	5,4	7,1	9,6	11,8	10,9	14,2
3	6,3	8,2	10,5	13,8	12,6	16,5	11,7	14,9	19,5	24,9	23,4	29,9
4	11,0	14,2	18,3	23,8	22,0	28,5	19,7	24,7	32,8	41,2	39,4	49,5
5	16,7	21,5	27,9	35,9	33,5	43,1	28,9	35,8	48,2	59,7	57,8	71,6

Проведенные расчеты для различных значений глубин теплообменника, геотермического градиента, теплопроводности горных пород, расходов теплоносителей позволяют судить о том, что установка глубоких скважинных теплообменников в областях с высоким геотермическим градиентом оправдана с учетом их достаточно высокой тепловой производительности при данных условиях. При этом съем тепла горных пород будет более эффективен при малых расходах теплоносителя. Однако, малые расходы ведут к уменьшению прироста энергетической мощности $\Delta E = cQ\Delta T$.

Потери давления по высоте лифтовой колонны можно вычислить с использованием закона Дарси-Вейсбаха

$$\Delta p = \frac{\xi \rho \omega^2 H}{2D_2^i},$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность воды; ω – скорость воды в колонне.

При турбулентном течении коэффициент гидравлического сопротивления определим по формуле Альтшуля

$$\xi = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{D} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}25},$$

где среднее значение абсолютной шероховатости $\Delta_э$ для стальных труб равно 0,2 мм.

Полезная извлекаемая мощность равна $N = cQ\Delta T - Q\Delta p$.

В табл. 4 приведены рассчитанные значения полезной извлекаемой мощности в СТО различной высоты.

Табл. 4. Полезная извлекаемая мощность *N, кВт.* D_1^i=200 мм; D_1^e=220 мм; D_2^i=88 мм; D_2^e=107 мм.

H, км	*Q=500 м³/сут*		*Q=1000 м³/сут*		*Q=2000 м³/сут*	
	Г=0,03° С /м	*Г*=0,05 °С /м	*Г*=0,03 °С /м	*Г*=0,05 °С /м	*Г*=0,03 °С /м	*Г*=0,05 °С /м
2	151,3	253,1	148,5	255,2	63,58	180,0
3	325,1	543,4	331,8	569,4	221,5	463,9
4	547,5	916,0	587,9	995,3	456,9	883,7
5	813,5	1359,0	902,2	1523,0	760,3	1420,0

В районах с высоким геотермическим градиентом теплопроизводительность глубоких СТО достаточно высока. В работе [2] приведены различные проекты по извлечению петротермального тепла с использованием скважинных теплообменников. Реализация одного из таких проектов на северо-востоке Германии, позволяет нагреть воду с начальной температурой, лежащей в диапазоне 55÷77 °С, до температуры 155÷160 °С. Расход воды при этом составляет 100÷150 м^3/час. Согласно нашим расчетам, максимальный прирост температуры 70 °С наблюдается при небольшом расходе воды (500 м^3/сут) при геотермическом градиенте 0,06°С/м и глубине теплообменника 5000 м. При больших расходах высокого прироста не наблюдается.

Литература:

1. *Алхасов А.Б., Алишаев М.Г.* Скважинный теплообменник для съема тепла с горной породы // материалы Международной конференции Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Махачкала. 2005. С. 263-275.
2. *Рыженков В.А., Мартынов А.В., Кутько Н.Е., Никифирова Д.В.* О возможности использования тепла глубинных пород земли для электро- и теплоснабжения обособленных потребителей //Энергосбережение и водоподготовка. 2009. №1. С. 12-16.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ НА ОСНОВЕ ПОЛНОГО УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Чимаев Г.Г., Алишаев М.Г.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а

Введение. Извлечение петротермальных ресурсов (тепла сухих горных пород) для получения электроэнергии и теплоснабжения является одним из перспективных направлений развития энергетики. Преимущества петротермального источника энергии следующие: повсеместное распространение, неисчерпаемость, приближенность и приспособляемость к потребителю, сравнительно низкая и трудоемкость при освоении, безотходность, безопасность в эксплуатации, экологическая чистота.

Австралийская фирма Geodynamics собирается построить первую коммерческую электростанцию в Бассейне Купера. Под Южно-Австралийской пустыней на глубине 4,5 км имеются горячие невулканические породы с температурой 270-300°С. Фирма уже пробурила две экспериментальные скважины (Хабанеро 1 и 2), геоинженеры компании сумели расширить естественные трещины в граните и создали горизонтальный блин 2 км в диаметре. Был произведен пробный пуск скважин, на поверхности паро-термальная смесь имела температуру 244°С при массовом дебите 27 кг/с (2500 т/сут), повторный эксперимент дал близкие результаты. Если инженерам компании удастся утроить циркуляцию потока, компания Geodynamics постоит первую электростанцию на 50 МВт [10].

Гомогенное течение. В [1] предлагается метод приближённого аналитического определения распределения давления и температуры по стволу вертикальной скважины для высокотермальных месторождений с температурой 150-320°С. Данный метод основывается на теории гомогенного течения, которая дает простейший способ исследования двухфазных (или многофазных) течений. В ней определяется соответствующие средние свойства, и смесь рассматривается как некоторая однородная среда. Различие скоростей, температур и химических потенциалов фаз обычно обусловливает взаимный обмен количеством движения, теплом и массой. Часто эти процессы протекают очень быстро, особенно в тех случаях, когда одна из фаз тонко диспергирована в другой, и тогда можно сделать допущение о достижении равновесия [4].

Вполне очевидно, что при пробном пуске скважин в Бассейне Купера имел место фазовый переход закачиваемой воды в пар. Геотермальный градиент на данном месторождении составляет в среднем 0,06°С/м. Закачиваемая вода, проходя ствол скважины, на глубине 4,5 км приобретает новую температуру, порядка 50-60°С. Пройдя по трещинам расстояние 1 км, вода приобретет температуру порядка 250°С. При этом фазового перехода воды в пар не происходит, так как в плоскости температур и давлений точке (250°С, 45 МПа) соответствует жидкое состояние [1]. При подъеме по стволу добывающей скважины происходит снижение давления, в основном статической ее доли. Вскипание воды и образование пузырьков водяного пара возможно лишь в стволе скважины, когда давление станет ниже примерно 5 МПа. Рост содержания приводит пара к тому, что режим течения переходит от пузырькового к снарядному и далее к стержневому, когда центральную часть колонны скважины

занимает пар. Производить вычисления для каждого отдельного участка смеси (с учетом необходимости исследовать вопрос о развитии последующего режима из предыдущего) – задача сложная и громоздкая. В данной статье используется более простой инженерный расчет, основанный на однородности потока смеси. Он дает качественно тот же результат.

В [1] были предложены формулы для определения местоположения начала фазового перехода в скважине:

$$z_{нас} = \frac{p_{заб} - p_{нас}}{\rho_0 g(1+\delta_0)}, \text{ где } \delta_0 = \frac{\lambda M^2}{4\pi^2 R^5 \rho_0^2 g} \quad (1)$$

здесь $p_{заб}$ и $p_{нас}$ - давление на забое скважины и давление насыщения соответственно, ρ_0 - плотность воды на момент начала фазового перехода, M – массовый дебит, R – радиус скважины и λ - коэффициент гидравлического сопротивления, вычисляемый по числу Рейнольдса и шероховатости труб.

Если предположить, что вода прогревается до температуры 250°C, то давление насыщения составит примерно 4 МПа. Забойное давление можно оценить как вес столба воды высотой 4,5 км, то есть около 50 МПа. Плотность чистой воды равна 800 $кг/м^3$, λ = 0,02, радиус скважины 8 см. По формуле (1) находим $z_{нас} \approx$ 3,9 км, если считать от забоя, то есть участок движения пароводяной смеси будет равен примерно 600 м.

По нашим оценкам максимально возможный отбор мощности тепла горного массива в форме диска радиусом 1 км при перепаде температур 200°C ограничивается значениями: в первый год эксплуатации – 330; к четвертому году – 160; к 10 годам – 100 и 25 годам – 65 МВт. Для пароводяной смеси с температурой 244°C кпд преобразования тепловой энергии в электрическую энергию выше 30%, что позволит компании Geodynamics построить электростанцию желаемой мощности и регулировать добываемую мощность.

Основные уравнения. Основные уравнения одномерного стационарного гомогенного течения в канале имеют следующий вид:

уравнение неразрывности

$$M = \rho_c v S = const \quad (2)$$

уравнение количества движения

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_c g - \frac{2}{R}\tau_w \quad (3)$$

уравнение энергии

$$\partial(c_v T + \frac{p}{\rho_c}) - \frac{\partial p}{\rho_c} + v\partial v + g\partial z = 0 \quad (4)$$

где M – массовый расход, ρ_c - плотность смеси, P и S – соответственно периметр и площадь сечения канала, g – ускорение свободного падения, τ_w - среднее касательное напряжение на стенке, v - скорость потока, p - давление, z – вертикальная координата. В работе [1] авторы пренебрегли последними двумя членами уравнения (4).

Из уравнения (1) находим:

$$v\partial v = \frac{M^2}{2\pi R^2}\partial(\frac{1}{\rho_c^2}) \quad (5)$$

Выразим касательное напряжение на стенке через коэффициент трения и радиус канала:

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho_c v^2 \tag{6}$$

где коэффициент трения имеет постоянное значение для всех условий [2]:

$$C_f = 0.005 \tag{7}$$

подставив (6) в (2) найдем:

$$g\partial z = g \frac{\partial z}{\partial p} \partial p = g \frac{\partial p}{\partial p / \partial z} = -\frac{\partial p}{\rho_c + \frac{C_f M^2}{\pi^2 R^5 g \rho_c}} \tag{8}$$

Уравнение энергии с учетом (5) и (8) принимает вид:

$$\frac{\partial i_c}{\partial p} - \frac{1}{\rho_c} + \frac{M^2}{2\pi^2 R^4} \partial \left(\frac{1}{\rho_c^2}\right) - \frac{\partial p}{\rho_c + \frac{C_f M^2}{\pi^2 R^5 g \rho_c}} = 0 \tag{9}$$

где $i_c = c_v T + p/\rho_c$ есть энтальпия смеси. В [1] было показано, что при использовании понятия массовой доли пара ψ i_c обладает свойством аддитивности, то есть

$$i_c = \psi \cdot i_{пара} + (1-\psi) \cdot i_{воды} \tag{10}$$

Соответственно плотность смеси также выражается через массовую насыщенность

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{\psi}{\rho_{пара}} + \frac{1-\psi}{\rho_{воды}} \tag{11}$$

Подставив (10) и (11) в (9) получим дифференциальное уравнение первого порядка в виде

$$\psi'_p(p) = f(p, \psi) \tag{12}$$

Данное уравнение решалось с помощью пакета MathCAD. Начальным условием являлось равенство нулю ψ при различных значениях $p_{нас}$ (3, 5, 7, 9, 11 МПа). Аппроксимации энтальпии и плотности воды и пара брались на линии насыщения [1]. По существу были пересчитаны все результаты работы [1].

На рис.1 показано сравнение графиков зависимости массовой доли со снижением давления пара при подъеме по стволу скважины. Данные значения были получены при следующих параметрах: дебит – 10000 т/сут, радиус скважины – 10 см. Линии, которые проходят выше, соответствуют решениям на основе неполного уравнений энергии [1]. На большей части значения графиков совпадают, а разнятся лишь на устье скважины, где столь малые давления вряд ли будут иметь место. Это можно объяснить тем, что по мере подъема пароводяной смеси два последних члена уравнения (4) начинают вносить более существенный вклад в энергетический баланс, что препятствует активному фазовому переходу.

На рис. 2 представлены значения объемной доли пара со снижением давления. Зависимости были вычислены с помощью формулы:

$$\varphi = \frac{\rho_в \psi}{\rho_в \psi + \rho_п (1-\psi)}$$

Полного превращения воды в пар не происходит, но на устье скважины доля пара составляет практически 99%.

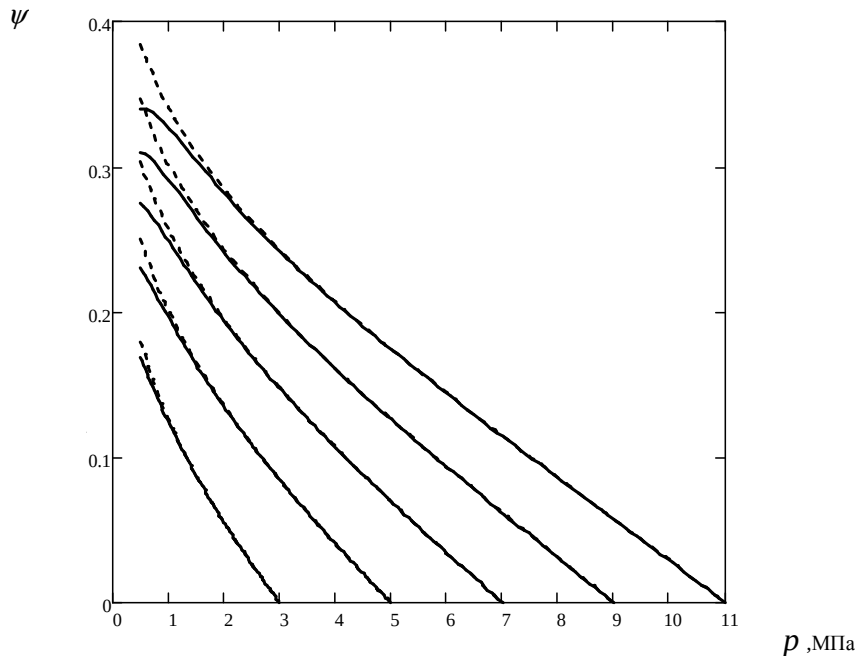


Рис.1. Рост массовой доли пара со снижением давления для участка пароводяной смеси, сплошные линии – полное уравнение энергии, пунктирные – неполное.

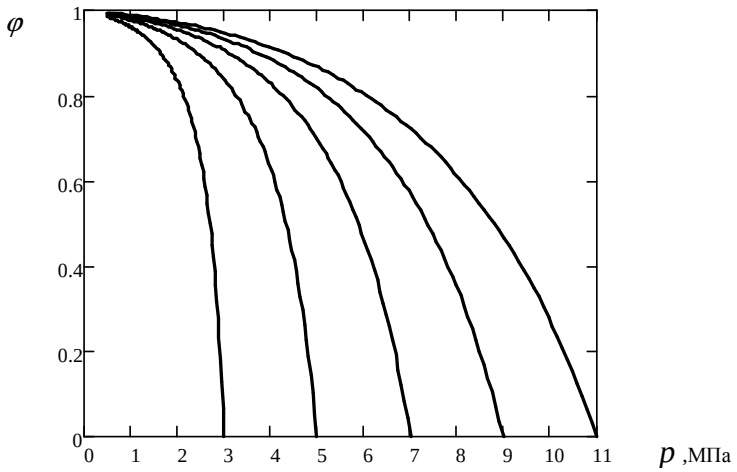


Рис. 2. Рост объемной доли пара со снижением давления для участка пароводяной смеси.

Прямым следствием этого являются графики плотности смеси, показанные на рис. 3. Плотность смеси, равная в точке начала фазового перехода плотности воды, уменьшается и на устье достигает значений плотности пара.

На рис. 4 показана связь падения давления в скважине с подъемом пароводяной смеси вверх по стволу. Здесь дебит – 7000 т/сут, радиус – 8 см. Нулевое значение координаты z соответствует точке начала перехода воды в пар. Видно, что с ростом пластового давления (и температуры соответственно) длина участка движения смеси становиться длиннее. На большей части отрезка зависимость имеет почти линейный характер, а по мере приближения к устью скважины имеет место более резкое падение давления.

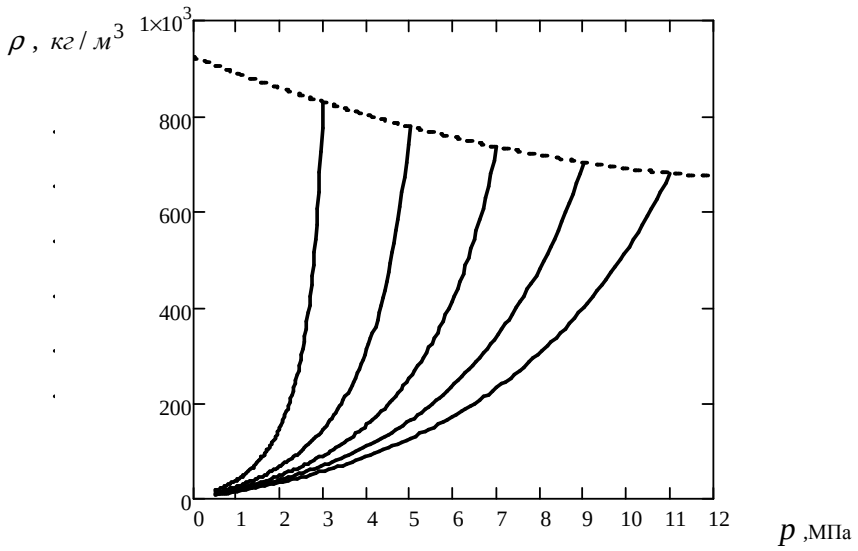


Рис. 3. Связь плотности смеси от давления при подъеме по стволу скважины, пунктирная линия – плотность воды.

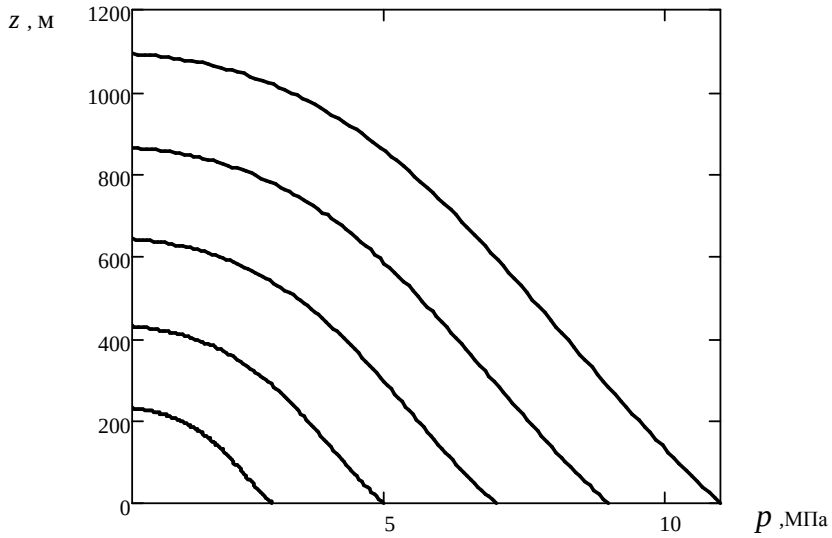


Рис. 4. Падение давления пароводяной смеси с подъемом вверх по стволу скважины, дебит – 7000 т/сут, радиус скважины – 8 см.

На рис. 5 представлена связь падения плотности смеси с подъемом по стволу скважины.

Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Приведенные результаты имеют приблизительный, оценочный характер. Для более точного описания физических явлений, происходящих при подъеме пароводяной смеси по стволу скважины, можно использовать уравнением Клапейрона – Клаузиуса. Оно справедливо не только для перехода жидкости в пар, но и для всех других фазовых переходов [12]. Оно выражает собою изменение давления с изменением температуры, при котором фазы находятся в равновесии. Для равновесного перехода воды в пар уравнение имеет вид

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T(V_2 - V_1)}, \qquad (13)$$

где T – абсолютная температура, r – удельная теплота парообразования, V_2 и V_1 – удельные объемы пара и воды при текущем значении давления и температуры.

Уравнение (13) было менее удобно для наших расчетов, так как нам пришлось бы отказаться от всех аппроксимаций, использованных в этой статье и в [1].

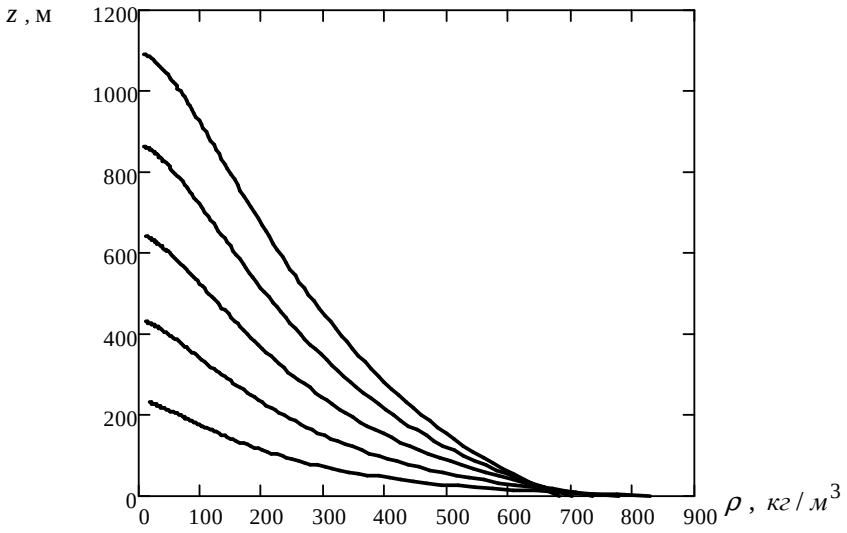


Рис. 5. Связь падения плотности пароводяной смеси с подъемом по стволу скважины.

Заключение. Результаты расчетов с использованием полного уравнения энергии показали, что предложенный в [1] приближенный аналитический метод вполне применим, если фазовое равновесие достигается мгновенно, т.е. если температура и давление в стволе скважины связаны линией насыщения. Желательно было бы отказаться от предположения мгновенного достижения фазового равновесия течения и пользоваться уравнением Клапейрона - Клаузиуса.

Литература:

1. *Алишаев М.Г., Азизов Г.А.* Термобарический расчет паротермальной скважины. Теплофизика №7 2011. 50-55 с.
2. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. М.: «Недра», 1982. 224 с.
3. Проблемы геотермальной энергетики Дагестана. Авт.: А.Г. Гаджиев, М.К. Курбанов, В.В. Суетнов и др. М., Недра, 208 с.
4. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. Изд.: «Мир», 1972. 440 с.
5. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. М.: МЭИ, 1999. 168 с.
6. http://www.wsp.ru
7. *Мищенко И.Т.* Скважинная добыча нефти. М.: «Недра», 2003.
8. *Виноградов К.В.* Движение газонефтяной смеси в фонтанных скважинах. М.: «Недра», 1964. 138 с.
9. Теория и практика газлифта. Авт.: Ю.В. Зайцев, Р.А. Максумов, О.В. Чубанов и др. М., Недра, 1987г., 256 с.
10. http://www.geodynamics.com.au
11. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Изд.: «Наука», 1964. 568 с.
12. *Кикоин И.К., Кикоин А.К.* Молекулярная физика. М.: «Физматгиз», 1963. 500 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ДВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ – ГОРНАЯ ПОРОДА»

Матусевич И.Л.[1], Абасов Г.М[2].

[1] *Институт (филиал) ГОУ ВПО «Московский государственный открытый университет» Махачкала, Россия , 367027, пр. Акушинского, 21*
[2] *Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а*

Рассмотрена задача о теплообмене между двумя вертикальными скважинами и массивом горных пород. Изучена интенсивность отбора тепла горных пород в такой системе для различных расстояний между скважинами и различных перепадах температуры в скважине и невозмущенных горных породах. Результаты сравниваются со случаем одиночной вертикальной скважины.

Постановка задачи. В две вертикальные скважины радиуса r_c закачивается холодная вода с температурой T_c. Предполагается, что температура на скважине T_c и температура невозмущенных пород $T_П$ постоянны (геотермическим градиентом пренебрегаем). Считаем, что длина скважин много больше, чем характерное расстояние продвижения эффективного холодного фронта от скважин за рассматриваемое время. Последнее предположение позволяет рассмотреть двухмерную задачу.

1. **Математическая формулировка задачи**. Будем отсчитывать температуру от температуры скважины T_c. Рассмотрим двухмерную задачу в горизонтальной плоскости ортогональной скважинам. Направим ось x вдоль прямой проходящей через центры скважин, а ось y перпендикулярно к ней вдоль оси симметрии задачи. Обозначим расстояние между скважинами $2a$. Запишем математическую задачу, соответствующую описанной модели (рис. 1.).

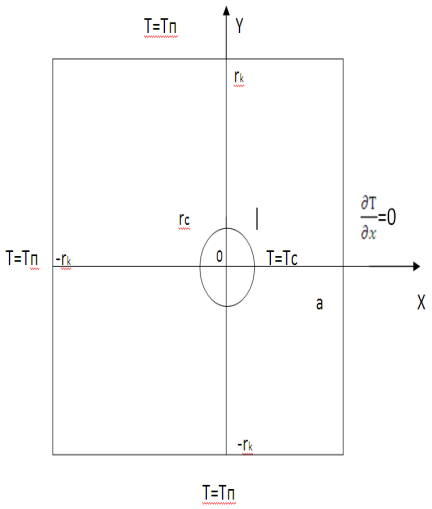


Рис. 1. Модель задачи.

Уравнение теплопроводности для горной породы

$$C\frac{\partial T(x,y,t)}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y,t)}{\partial y^2}\right);\ -r_к < x < a,\ -r_к < y < r_к. \quad (1)$$

где С - теплоемкость горной породы, λ- коэффициент теплопроводности горной породы.

Граничные условия:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial T(a,y,t)}{\partial x}=0; \quad -r_к < y < r_к;\\
&T(-r_к,y,t)=T_П; -r_к < y < r_к;\\
&T(x,-r_к,t)=T_П; -r_к < x < a;\\
&T(x,r_к,t)=T_П; -r_к < x < a;\\
&T(x,y,t)=T_c; \; при \; x^2+y^2=r_c^2;
\end{aligned} \tag{2}$$

Введем безразмерные параметры следующим образом:

$$\bar{T}=\frac{T-T_c}{T_П-T_c};\ \bar{x}=\frac{x}{r_c};\ \bar{y}=\frac{y}{r_c};\ \bar{a}=\frac{a}{r_c};\ \bar{r}=\frac{r}{r_c};\ \bar{t}=\frac{t}{t_0};\ t_0=\frac{C r_c^2}{\lambda};\ \bar{r}_к=\frac{r_к}{r_c};\ \bar{r}_c=1;$$

В безразмерных параметрах постановка задачи имеет вид:

Уравнение теплопроводности для горной породы

$$\frac{\partial \bar{T}(\bar{x},\bar{y},\bar{t})}{\partial \bar{t}}=\frac{\partial^2 \bar{T}(\bar{x},\bar{y},\bar{t})}{\partial \bar{x}^2}+\frac{\partial^2 \bar{T}(\bar{x},\bar{y},\bar{t})}{\partial \bar{y}^2};\ -\bar{r}_к < \bar{x} < \bar{a};\ -\bar{r}_к < \bar{y} < \bar{r}_к; \tag{3}$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \bar{T}(\bar{a},\bar{y},\bar{t})}{\partial \bar{t}}=0; \quad -\bar{r}_к < \bar{y} < \bar{r}_к;\\
&\bar{T}(-\bar{r}_к,\bar{y},\bar{t})=\bar{T}_П=1; -\bar{r}_к < \bar{y} < \bar{r}_к;\\
&\bar{T}(\bar{x},-\bar{r}_к,\bar{t})=\bar{T}_П=1; -\bar{r}_к < \bar{x} < \bar{a};\\
&\bar{T}(\bar{x},\bar{r}_к,\bar{t})=\bar{T}_П=1; -\bar{r}_к < \bar{x} < \bar{a};\\
&\bar{T}(\bar{x},\bar{y},\bar{t})=\bar{T}_c=0; \; при \quad \bar{x}^2+\bar{y}^2=\bar{r}_c^2;
\end{aligned} \tag{4}$$

Начальное условие:

$$\bar{T}(\bar{x},\bar{y},0)=(1-\exp(-\alpha((\bar{x}^2+\bar{y}^2)^{1/2}-\bar{r}_c)^2); \tag{5}$$

2. **Метод решения задачи.** Значение параметра $r_к$, заменяющую бесконечность подбиралось достаточно удаленной от скважины, чтобы для рассматриваемого отрезка времени она не влияла на результат. Прямоугольную область $-\bar{r}_к \le \bar{x} \le \bar{a};\ -\bar{r}_к \le \bar{y} \le \bar{r}_к;$ разобъем прямыми, параллельными осям координат, на прямоугольные ячейки. Разбиение интервала $-\bar{r}_к \le \bar{x} \le \bar{a};$ равномерным шагом оказывается неприемлемым из-за того, что если выбрать равномерный шаг $\Delta\bar{x} \ll 1$, то в силу $\bar{r}_к \gg 1$ число шагов до контура будет слишком велико. Разумно взять неравномерную сетку, которая сгущается к скважине, а вдали от скважины имеет шаг $\Delta\bar{x} \ll \bar{r}_к$. В области $1 \le \bar{x} \le \bar{a}$ такую возможность представляет преобразование

$$z=Ln\bar{x}+\frac{\bar{x}-1}{\bar{r}_1-1}Ln\bar{r}_1, \tag{6}$$

с последующей равномерной сеткой для переменной z (где $\bar{r}_1=\bar{a}-1$). Значению $\bar{x}=1$ соответствует z=0, значению $\bar{x}=\bar{r}_1$ соответствует $z=2Ln\bar{r}_1$. В области

$0 < z < 2Ln\bar{r}_1$ для каждого узла сетки $z_i = (i-1)\Delta z$ соответствующее значение $\bar{x}_i$ находится итерационным решением уравнения (6). В области $-\bar{a} \le \bar{x} \le -1$ сетку формируем симметрично относительно x=0. В области $-\bar{r}_к \le \bar{x} \le -\bar{a}$ сетку формируем с равномерным шагом $\bar{x}_i = (i-1)\Delta\bar{x}$. Аналогичным образом формируем сетку в области $-\bar{r}_к \le \bar{y} \le \bar{r}_к$.

Для численного решения задачи (3-5) нами была использована [1,2] безусловно устойчивая неявная схема переменных направлений (продольно – поперечная схема), имеющая второй порядок аппроксимации по пространственным переменным x,y и первый порядок аппроксимации по времени t. Полученные разностные уравнения решены методом продольно – поперечной прогонки на каждом временном шаге [3]. Приводимые расчеты проводились с постоянным временным шагом $\Delta\bar{t}t = 0{,}01$.

Расчеты проводились при следующих значениях параметров:

$r_c = 0{,}075\ м$, $r_к = 75\ м$, $\lambda = 2.5$ ватт/м*К, $C = 2.5*10^6\ Дж/м^3*К$;

$\chi = \frac{\lambda}{C} = 10^{-6}\ м^2/с$; $T_П - T_c = 10\ ^0C; 15\ ^0C; 20\ ^0C$; $2a = 10м; 15м; 20м$; $\alpha = 2$.

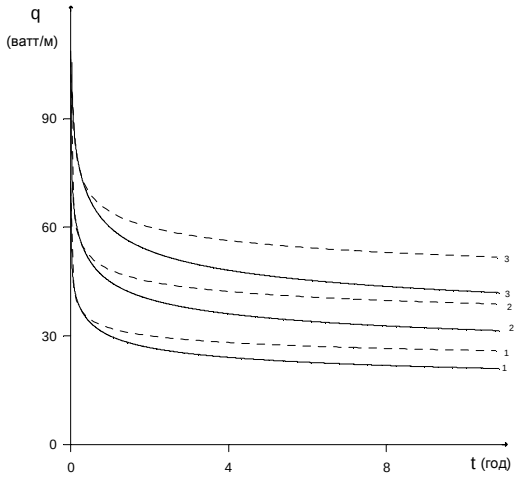


Рис.2. Зависимость потока тепла в скважину (на один метр) от времени при $2a = 10\,м$; 1-3- $T_П - T_c = 10\ ^0C; 15\ ^0C; 20\ ^0C$; пунктир – одиночная скважина.

3. Результаты исследования. На рис.2. показаны зависимости притока тепла в скважину (ватт/м) от времени (год) при расстоянии между скважинами 10 м, и различных перепадах температуры в скважине и невозмущенных породах. Пунктирами показаны соответствующие кривые для одиночной скважины. Из рисунка видно, что в течении примерно одного года тепловой поток в скважину близок к таковому для одиночной скважины. Далее взаимодействие эффективных холодных фронтов идущих от обеих скважин приводит к заметному уменьшению притока тепла в скважину. При этом с ростом перепада температуры, влияние взаимодействия скважин растет, т.е. растет отклонение теплового потока от значения для одиночной скважины.

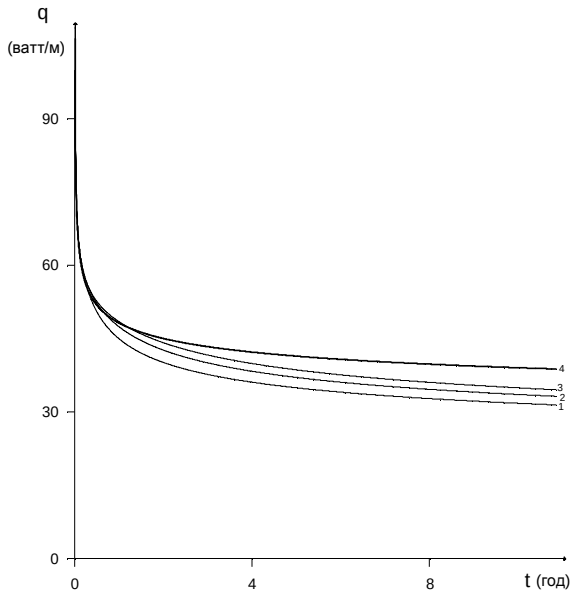


Рис.3 Зависимость потока тепла в скважину (на один метр) от времени при $T_П - T_c = 15\ ^0C$; 1-3- $2a = 10м; 15м; 20м$; 4-одиночная скважина.

На рис. 3. показаны зависимости теплового потока в скважину на один метр при $T_П - T_c = 15\ ^0C$ и различных расстояниях между скважинами. Из рисунка видно, что приток тепла в скважину с ростом расстояния между ними увеличивается и приближается к случаю одиночной скважины. Сравнивая указанные два рисунка можно отметить, что эффект взаимодействия скважин относительно слабо зависит от расстояния между скважинами. Так в течение 10 лет разброс теплового потока для $2a = 10м; 15м; 20м$ и одиночной скважины при $T_П - T_c = 15\ ^0C$ составляет не более 20 %.

Литература:

1. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
2. *Бахвалов Н.С.* Численные методы. М.: Наука, 1975. 631 с.
3. *Самарский А.А., Николаев Е.С.* Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978, 592 с.

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ КОНВЕКЦИИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ В ПОРИСТОМ ПРЯМОУГОЛЬНИКЕ ПРИ УСЛОВИИ МОДУЛЯЦИИ ГРАДИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ

Булгакова Н.С.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ipgnatali@rambler.ru

Условия возникновения конвективных потоков в условиях периодической модуляции градиента концентрации были получены в [1,2] на основе линеаризованной системы дифференциальных уравнений, описывающих свободную конвекцию трехкомпонентной изотермической смеси. С увеличением амплитуды возмущений, возникают нелинейные механизмы, которые могут быть исследованы лишь на основе полных нелинейных уравнений конвекции. Конечные возмущения в надкритических условиях при стационарных граничных условиях, вообще говоря, демонстрируют довольно сложное поведение. В [3] исследована двумерная тепловая конвекция однокомпонентного флюида в пористой среде для двукратно вытянутой прямоугольной области с постоянными параметрами и фиксированной температурой. Рассчитаны поля конвективных скоростей и температур, установлены размеры конвективных ячеек в зависимости от числа Рэлея. В трехкомпонентных изотермических системах при определенных условиях возникают конвективные потоки, наложение которых на молекулярный перенос приводит к неустойчивости механического равновесия смеси при диффузии [4,5]. Основным предметом обсуждения в данной работе будет вопрос о влиянии периодически модулируемого градиента концентрации на развитие конечных возмущений трехкомпонентной изотермической смеси, насыщающей пористый прямоугольник. Задача решена конечно-разностными методами, с использованием неявной разностной схемы расщепления для уравнений переноса в сочетании с методом переменных направлений с постоянными параметрами для уравнения Пуассона [6]. Проведен сравнительный анализ результатов расчетов по линеаризованной и полной системам уравнений, описывающих конвекцию смеси в пористой среде. Исследованы надкритические режимы конвекции смеси при стационарных граничных условиях и в условиях периодической модуляции параметра.

Постановка задачи.

Система уравнений и граничные условия, описывающие конвекцию трехкомпонентной изотермической смеси при модуляции градиента концентрации приведены в [1,2].

После введения функции тока $u_x = \frac{\partial \psi}{\partial z}$ $u_z = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ и исключения давления нелинейная, обезразмеренная система примет вид:

$$\Delta\psi = -\frac{\partial C_1}{\partial x} - \frac{Rd_2}{NRd_1}\frac{\partial C_2}{\partial x}$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + u_x\frac{\partial C_1}{\partial x} + u_z\frac{\partial C_1}{\partial z} - \left(1 - \delta\frac{\partial \Theta_s}{\partial z}\right)u_z = \frac{1}{Rd_1}\Delta C_1 \qquad u_x = \frac{\partial \psi}{\partial z}\ \ u_z = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \qquad (1.1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} + u_x\frac{\partial C_2}{\partial x} + u_z\frac{\partial C_2}{\partial z} - u_z = \frac{1}{Rd_1}\Delta C_2$$

$$Rd_1 = \frac{\rho_0 g k \beta_1 B_1 L^2}{D_1 \eta},\ Rd_2 = \frac{\rho_0 g k \beta_2 B_2 L^2}{D_2 \eta},\ N = \frac{D_1}{D_2},\ \delta = \frac{T_0}{B_1 \cdot L}.$$

$\Theta_s(t,z) = \Theta_1(z)\sin\Omega t + \Theta_2(z)\cos\Omega t$, $\Theta_1(z) = -[q_1 sh\alpha z\cos\alpha z + q_2 ch\alpha z\sin\alpha z]$,

$\Theta_2(z) = -[q_1 ch\alpha z\sin\alpha z - q_2 sh\alpha z\cos\alpha z]$, $\alpha = \sqrt{\frac{Rd_1\Omega}{2}}$, $\Omega = \omega\frac{m\eta}{\rho_0 gk\beta_1 B_1}$, $q_1 = \frac{sh\alpha\cos\alpha}{S}$,

$q_2 = \frac{ch\alpha\sin\alpha}{S}$, $S = sh^2\alpha\cos^2\alpha + ch^2\alpha\sin^2\alpha$

(характерные масштабы: L- толщины, $B_1 L$ - концентрации первой компоненты, $\frac{\rho_0 gk\beta_1 B_1 L}{\eta}$ - скорости, $\frac{m\eta}{\rho_0 gk\beta_1 B_1}$ - времени, $B_2 L$ - концентрации второй компоненты, $\rho_0 g\beta_1 B_1 L^2$ -давления).

При граничных условиях:

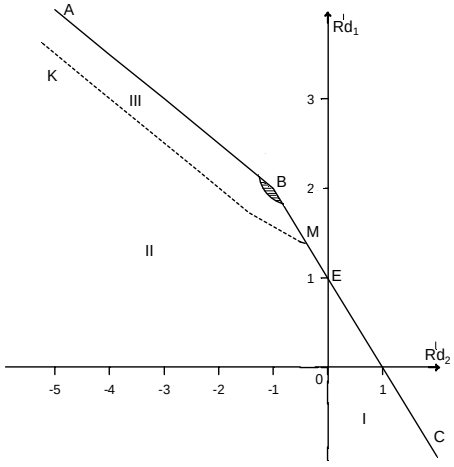
$x = -1;1 : \frac{\partial C_1}{\partial x} = 0, \frac{\partial C_2}{\partial x} = 0, \psi = 0$

$z = 0;1 : C_1 = 0,\ C_2 = 0, \psi = 0$

N- отношение диффузий первой и второй компоненты, δ - безразмерная амплитуда модуляции, Rd_1, Rd_2 - диффузионные числа Рэлея.

В [1,2] показано, что точкам области равновесия смеси (при отсутствии модуляции), на плоскости амплитуда-частота модуляции соответствует нейтральная кривая, ниже которой возмущения затухают, выше – нарастают. Структуры нейтральных кривых в случаях бинарной и трехкомпонентной изотермических смесей качественно различны. Для трехкомпонентной смеси эта область разбита на три подобласти, которым соответствуют нейтральные кривые одинакового типа.

В расчетах использованы значения *N*=2, характеризующие отношение диффузий смеси. Ломанная *ABC* на плоскости (Rd_1', Rd_2') (фиг.1) служит границей устойчивости трехкомпонентной смеси при отсутствии модуляции (Rd_1', Rd_2' - приведенные диффузионные числа Рэлея).



Фиг.1. Карта устойчивости трехкомпонентной изотермической смеси при стационарных граничных условиях.

Причем при пересечении луча *BA* снизу вверх имеет место колебательная неустойчивость, а при пересечении луча *BC*– монотонная. Над ломанной *ABC*, имеет место неустойчивость для всех частот и амплитуд.

Возмущения в надкритической области, и в частности, предельные режимы, возникающие в результате развития конечных возмущений, могут быть исследованы лишь на основе полных нелинейных уравнений конвекции (1.1). При этом основными характеристиками возмущений будут безразмерный поток

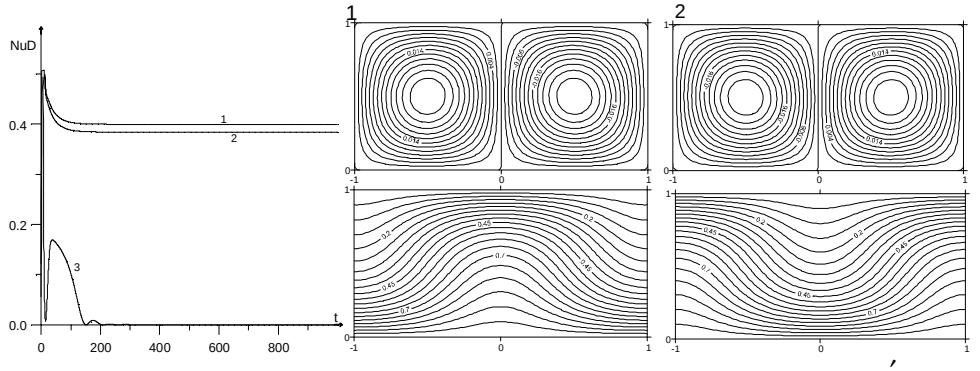
вещества (диффузионное число Нуссельта): $Nu = -\frac{1}{2}\int_{-1}^{1} \left.\frac{\partial C_1}{\partial z}\right|_{z=1} dx$, линии тока и изолинии концентрации примеси.

Численный расчет концентрационной конвекции изотермической трехкомпонентной смеси в пористой среде на основе полных уравнений (1.1) был выполнен как с постоянным, так и с модулируемым во времени градиентом концентрации одной из компонент. Для решения данной системы уравнений использовалась неявная монотонная разностная схема расщепления для уравнений переноса в сочетании с методом переменных направлений с постоянными параметрами для уравнения Пуассона [6]. Полученная разностная схема решалась методом продольно-поперечной прогонки, с проверкой невязок на каждом временном шаге. В качестве начального условия выбиралось распределение концентраций $C_i(x,z) = a_i \cos\pi x \sin\pi z \; (i = 1,2)$, в отсутствии конвекции $\psi(x,z) = 0$.

Обсуждение результатов.

Расчеты показали, что на карте диффузионных чисел Релея (построенной по линеаризованным уравнениям при стационарных граничных условиях имеется область подкритической неустойчивости, которая изображена на фиг. 1 (заштрихованный угол ABC). Для остальных пар значений диффузионных чисел Релея ниже ABC в отсутствии модуляции, решения нелинейной задачи полностью подтверждают линейную теорию, т.е. при всех начальных условиях возмущения затухают.

При Rd_2'=-1 Rd_1'=1.9 (область подкритической неустойчивости), в отсутствии модуляции, для разных начальных условий имеются два стационарных течения (линии 1 и 2, фиг.2) и одно затухающее (линия 3, фиг. 2), причем течения 1 и 2 двух ячеистые и разнонаправленые.

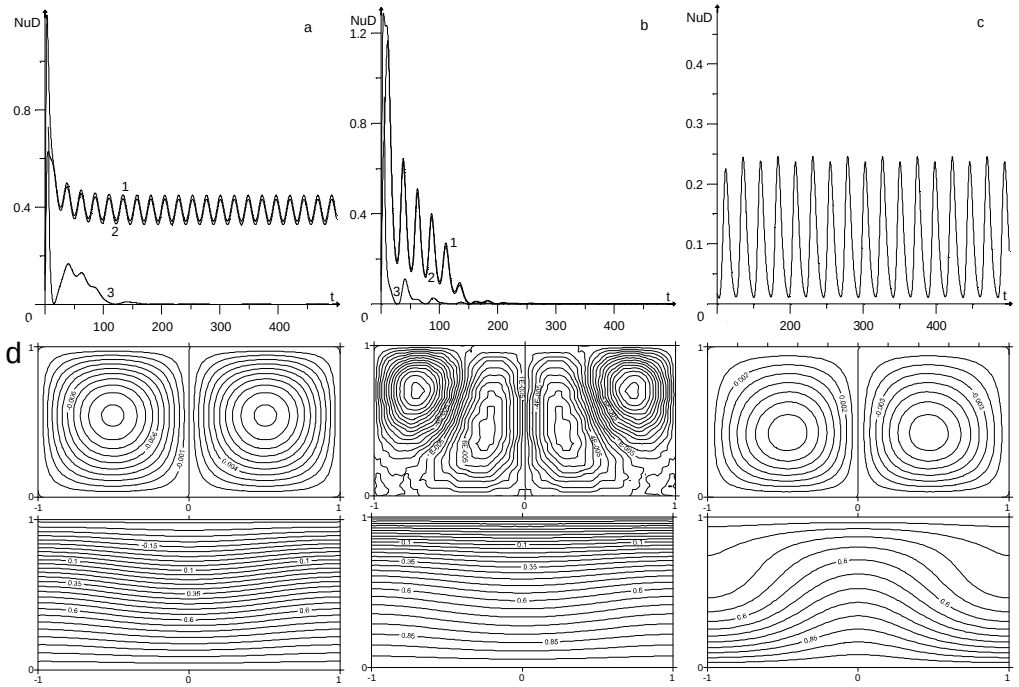


Фиг. 2. Зависимость усредненного диффузионного числа Нуссельта от времени (Rd_2'=-1 Rd_1'=1.9), справа показаны линии тока и изолинии концентрации примеси, соответствующие соответственно линиям (1), (2).

При модуляции градиента концентрации, для малых амплитуд, числа Нуссельта колеблются вокруг соответствующих стационарных решений (фиг. 3a), течения по-прежнему двух ячеистые и противоположно направленные, для амплитуд порядка 0.5 при любых начальных условиях возмущения затухают (фиг. 3b), при дальнейшем увеличении амплитуды для любых начальных условий имеется единственное решение (фиг. 3c), при этом с течением времени течения могут быть как двух ячеистыми, так и четырех ячеистыми, возможна и смена направлений движения (фиг. 3d).

Численное решение полных дифференциальных уравнений при модуляции градиента концентрации показало, что нейтральные кривые,

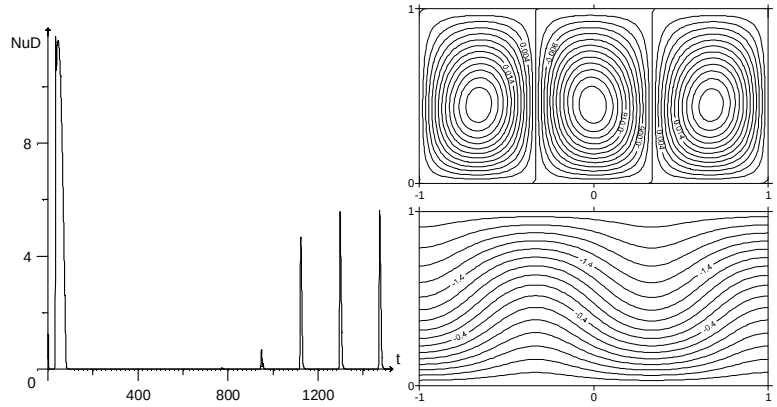
построенные для каждой пары диффузионных чисел Рэлея (по линеаризованным уравнениям), достаточно точно разделяют установившиеся и затухающие возмущения равновесия. Установившиеся возмущения как правило двух ячеистые, при увеличении амплитуды модуляции число ячеек увеличивается. Причем, при больших амплитудах направление движения и количество ячеек могут меняться с течением времени.



Фиг. 3. Зависимость усредненного диффузионного числа Нуссельта от времени при частоте модуляции градиента концентрации w=1 и амплитудах: a) r=0.1, b) r=0.5, c) r=1, при различных начальных условиях. (Rd_2'=-1 Rd_1'=1.9). d) Линии тока и изолинии концентрации при w=1, r=1 в различные моменты времени (Rd_2'=-1 Rd_1'=1.9).

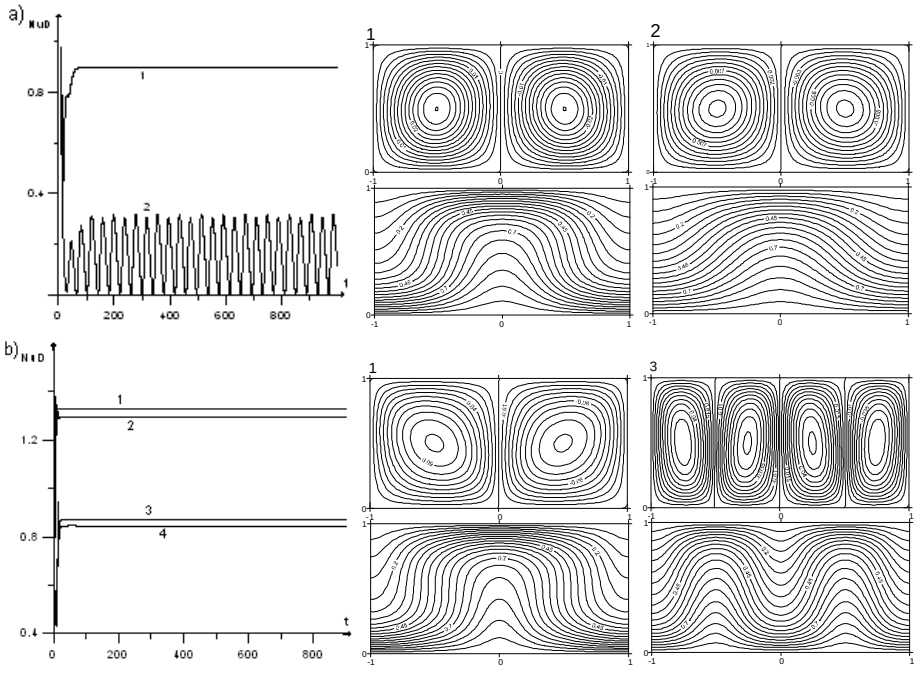
Однако выявлено, что, линейная теория в некоторых случаях завышает критическую амплитуду потери устойчивости, т. е. дает границу условной устойчивости (устойчиво относительно бесконечно малых возмущений, и не устойчиво относительно конечных). Эффект подкритической неустойчивости в условиях модуляции наиболее ярко выражен на оси Rd_2'=0 (бинарная изотермическая смесь). Но небольшая подкритичность имеется для некоторых частот и в области нейтральных кривых полуцелого типа. Например, по линейной теории, для точки Rd_2'=-3, Rd_1'=1 при частоте модуляции $1/w$=14 критическая амплитуда выше которой возмущения нарастают равна r=4.019. Расчеты по нелинейной системе уравнений, показали, что при r=3.95, через определенный промежуток времени возникает трех ячеистое движение (фиг. 4).

В надкритической области (над ломанной ABC , фиг.1), прилегающей к границе устойчивости при $Rd_2' < -2$, при постоянных граничных условиях имеется стационарное (1) и установившееся колебательное (2) движение (фиг.5a), соответствующие различным начальным условиям. Движения двух ячеистые сонаправленные. При возрастании Rd_1' движения только стационарные противоположно направленные.



Фиг.4. Зависимость усредненного диффузионного числа Нуссельта от времени, справа показаны линии тока и под ними изолинии концентрации примеси. Rd_2'=-3 Rd_1'=1 , $1/w$=14 , r=3.95.

При $Rd_2' > -2$ для различных начальных условий вблизи границы устойчивости имеется два двух ячеистых противоположно направленных стационарных решения. При движении вверх по оси Rd_1' получаем по две пары разнонаправленных движений, причем одна пара (1), (2) соответствует двух ячеистому движению, а вторая (3), (4) – четырех ячеистому (фиг. 5b).

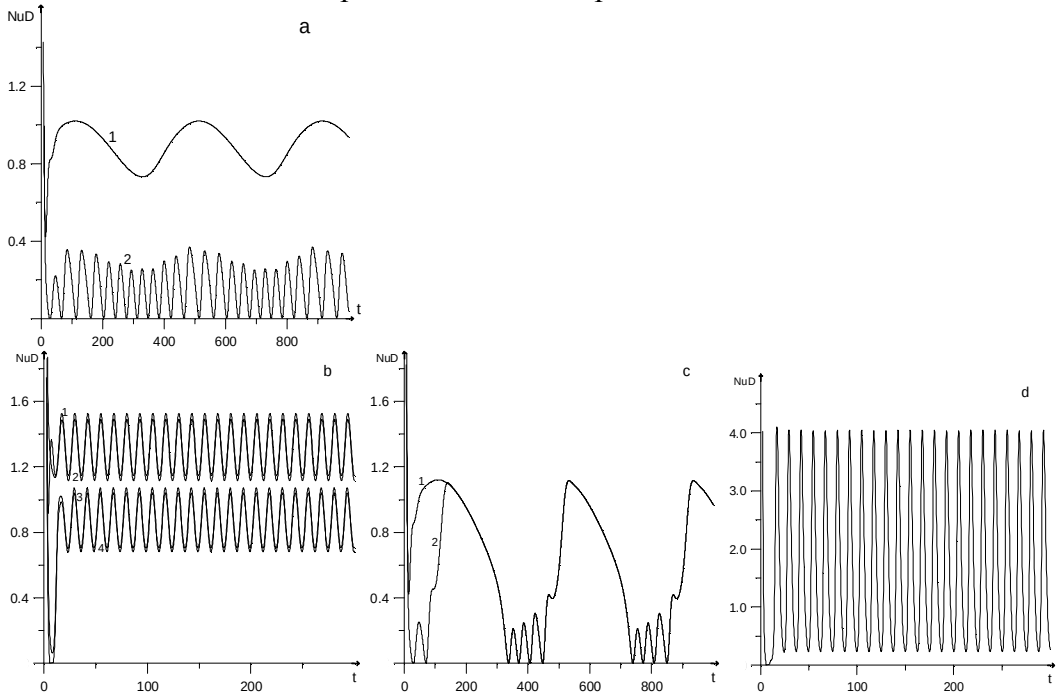


Фиг. 5. a) Зависимость усредненного диффузионного числа Нуссельта от времени при постоянных граничных условиях, (1) – стационарное движение, (2) - установившееся колебательное ($Rd_2' = -3,\ Rd_1' = 3.2$). Справа линии тока и под ними изолинии, соответственно для линий (1) и (2).

b) Зависимость диффузионного числа Нуссельта от времени при постоянных граничных условиях, (1,2) – стационарное двух ячеистое движение, (3,4) - стационарное четырех ячеистое ($Rd_2' = 2,\ Rd_1' = 1$). Справа линии тока и под ними изолинии, соответственно для линий (1) и (3). Для линий (2) и (4) течения противоположны соответственно (1) и (3).

Модуляция градиента концентрации приводит к тому, что для любых частот при малых амплитудах модуляции появляются колебания около стационарных или установившегося колебательного решений (фиг. 6a,b), число

ячеек при этом соответствует их числу при постоянных граничных условиях. С возрастанием амплитуды модуляции возмущения исходных движений нарастают, и в результате возникает одно установившееся решение (фиг.6c,d). При этом линии (1), (2) фиг. 6a, сливаясь, принимают вид зависимости на фиг. 6c, а линии (1)-(4) фиг. 6b переходят в одно установившееся решение (фиг. 6d). Количество конвективных ячеек сохраняется на всем временном диапазоне.



Фиг 6. Зависимость усредненного диффузионного числа Нуссельта от времени при модуляции граничных условий a) при $Rd_2^{'} = -3,\ Rd_1^{'} = 3.2$ с частотой *1/w*=10 и амплитудой r=0.05, (1) – вокруг стационарного режима, (2) - около установившегося колебательного; b) при $Rd_2^{'} = 2,\ Rd_1^{'} = 1$ с частотой *1/w*=1 и амплитудой r=0.1; c) при $Rd_2^{'} = -3,\ Rd_1^{'} = 3.2$ с частотой *1/w*=10 и амплитудой r=0.1; d) при $Rd_2^{'} = 2,\ Rd_1^{'} = 1$ с частотой *1/w*=1 и амплитудой r=1.

В случае достаточно больших амплитуд модуляции с течением времени может меняться число конвективных ячеек и происходить инверсия движений.

Заключение.

Численное исследование нелинейных режимов конвекции трехкомпонентной изотермической смеси на основе полных дифференциальных уравнений показало, что при стационарных граничных условиях имеет место эффект подкритической неустойчивости. То есть, на карте диффузионных чисел Релея в области устойчивости смеси имеется подобласть, где одновременно устойчивы два стационарных решения, отличающихся направлением циркуляции, и механическое равновесие. Также выявлено, что при модуляции градиента концентрации, линейная теория в некоторых случаях завышает критическую амплитуду потери устойчивости, т. е. дает границу условной устойчивости (устойчиво относительно бесконечно малых возмущений, и не устойчиво относительно конечных). Построены зависимости безразмерного потока вещества (концентрационное число Нуссельта) от времени при различных режимах конвекции.

Получено, что для каждой пары надкритических диффузионных чисел Релея в случае постоянных граничных условий существует несколько стационарных режимов, а в некоторых областях также и установившееся

колебательное движение, отличающихся либо количеством конвективных ячеек, либо направлением движения. Модуляция градиента концентрации приводит к тому, что диффузионное число Нуссельта при малых амплитудах модуляции колеблется около стационарных или установившегося колебательного решений. С увеличением амплитуды модуляции, возмущения установившихся движений нарастают, и в результате их слияния образуется единственное решение. При дальнейшем возрастании амплитуды модуляции может меняться число конвективных ячеек и происходить инверсия движений в различные моменты времени.

Литература:

1. *Булгакова Н.С.* Конвективная устойчивость трехкомпонентной изотермической смеси в пористом прямоугольнике при модуляции градиента одной из компонент.// Вестник ДНЦ. №38. 2010. С.13-20.
2. *Булгакова Н.С.* Численное исследование влияния переменного градиента температуры на конвективную устойчивость бинарной газовой смеси в пористом прямоугольнике// Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010. С. 354-360.
3. *Трубицын В.П., Николайчик В.В.* Тепловая конвекция в пористых средах. // Физика земли. 1991. №1. С.3-18.
4. *Косов В.Н., Жаврин Ю.* Экспериментальное исследование на диффузионную устойчивость некоторых изотермических трехкомпонентных газовых систем // Изв. АН КазССР. Сер. физ,-мат. 1990. №2. С.66- 69.
5. *Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И.* О диффузионной неустойчивости в изотермических трехкомпонентных газовых смесях //Теплофизика и аэромеханика, 2000, том 7, № I. С. 127-135.
6. *Клейн И.С., Полежаев В.И.* Конвективный теплообмен в проницаемых пористых средах: Препринт / ИПМ АН СССР. М., 1978. № 111. 67 с.

АНОМАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Шабанова М.Р.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: meil-sha@yandex.ru

Задача Стефана рассмотрена на основе нелокального уравнения теплопроводности в производных дробного порядка. Предлагается обобщенное условие Стефана в производных дробного порядка по времени и координате. Показано, что координата границы фазового перехода ϑ зависит от времени τ и параметров α,β $(0<\alpha\le 1,\ 1<\beta\le 2$ – показатели производных дробного порядка по времени и координате соответственно) и определяется выражением $\vartheta(\alpha,\beta,\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}$. Установлено, что в случае системы вода – лед в области значений параметров α,β, вблизи $\alpha=1,\beta=1$, значения функции $\vartheta(\alpha,\beta,\tau)$ аномально увеличиваются.

Статья посвящена обобщению известной задачи Стефана на основе нелокальных уравнений теплопроводности в производных дробного порядка. Постоянный и повышенный интерес к задаче Стефана связан с тем, что она, удачно сочетав математические и физические проблемы, охватывает широкий круг фундаментальных проблем как математики, так и физики [1,2]. Межфазная область - это особое состояние вещества, занимающее промежуточное положение между сосуществующими фазами, физическая природа которого до сих пор до конца не понята, особенно в условиях фазового перехода. В настоящее время как математические, так и физические аспекты задачи Стефана интенсивно развиваются.

Рассматривается прямая задача Стефана для системы вода- лед на основе уравнения теплопроводности в производных дробного порядка. Уравнения в задаче Стефана в производных дробного порядка имеют вид

$$\frac{\partial^{\alpha}T_1(\xi,\tau)}{\partial\tau^{\alpha}}-D_1\frac{\partial^{\beta}T_1(\xi,\tau)}{\partial\xi^{\beta}}-\frac{T_1(\xi,0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^{\alpha}}=0,\quad 0<\xi<\vartheta(\tau), \tag{1}$$

$$\frac{\partial^{\alpha}T_2(\xi,\tau)}{\partial\tau^{\alpha}}-D_2\frac{\partial^{\beta}T_2(\xi,\tau)}{\partial\xi^{\beta}}-\frac{T_2(\xi,0)}{\Gamma(1-\alpha)\tau^{\alpha}}=0,\quad \vartheta(\tau)<\xi<\infty, \tag{2}$$

где

$$\frac{\partial^{\alpha}\mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial\tau^{\alpha}}=\frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{\partial}{\partial\tau}\int_0^{\tau}\frac{\mathrm{T}(\xi,z)}{(\tau-z)^{\alpha}}dz\ , \tag{3}$$

$$\frac{\partial^{\beta}\mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial\xi^{\beta}}=\frac{1}{2\Gamma(2-\beta)\cos\left(\frac{\pi}{2}(2-\beta)\right)}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}\int_0^{\infty}\frac{\mathrm{T}(\xi',\tau)}{|\xi-\xi'|^{\beta-1}}d\xi'\ . \tag{4}$$

В (1,4) $0<\alpha\le 1,\ 1<\beta\le 2$ – показатели производных дробного порядка по времени и координате соответственно, $\vartheta(\tau)$ – координата границы раздела фаз. Производная Римана-Лиувилля (3) учитывает нелокальные эффекты по времени, производная Рисса (4) учитывает пространственные нелокальные эффекты, $D_{1(2)}=a_{1(2)}t_0/x_0^2$ – безразмерный коэффициент температуропроводности,

$a_{1(2)} = \lambda_{1(2)} / c_{1(2)_p}\rho_{1(2)}$ – коэффициент температуропроводности, $\tau = t/t_0, \xi = x/x_0$ – безразмерные время и координата, t_0, x_0 – характерные время и масштаб, Решение уравнения в производных дробного порядка в случае полупространства было получено и имеет вид [3,4]

$$T(\xi,\tau) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty dk \int_0^\infty d\xi' \psi(\xi')\sin(k\xi)\sin(k\xi')E_{\alpha,1}(-Dk^\beta\tau^\alpha) + \\ + \frac{2D}{\pi}\int_0^\infty dk \int_0^\tau d\tau' \frac{\sin(k\xi)}{k^{1-\beta}}\mu(\tau-\tau')\cdot\tau'^{\alpha-1}E_{\alpha,\alpha}(-Dk^\beta\tau'^\alpha). \quad (5)$$

Здесь $T(\xi,0) = \psi(\xi)$ - начальное условие, $T(0,\tau) = \mu(\tau)$ - граничное условие, $E_{\alpha,\nu}(-\zeta z^\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n \frac{\zeta^n z^{\alpha n}}{\Gamma(\alpha n+\nu)}$ - функция Миттаг-Леффлера [5]. В случае, когда $\psi(\xi) = T_0$ и $\mu(\tau) = \tilde{T}_0$ - константы, решение (5) принимает вид

$$T(\xi,\tau) = \tilde{T}_0 + \frac{2}{\pi}(T_0 - \tilde{T}_0)\int_0^\infty dk \frac{\sin(k\xi)}{k}E_{\alpha,1}(-Dk^\beta\tau^\alpha). \quad (6)$$

Краевые условия для системы уравнений (1,2) определяются соотношениями

$$T_1(0,\tau) = t_1, \quad (7)$$

$$T_2(\xi,0) = t_2, \quad (8)$$

$$T_1(\xi,\tau) = T_2(\xi,\tau) = t_3, \quad \text{при} \quad \xi = \vartheta(\tau), \quad (9)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial^\gamma T_1(\xi,\tau)}{\partial\xi^\gamma} - \lambda_2 \frac{\partial^\gamma T_2(\xi,\tau)}{\partial\xi^\gamma} = Q\frac{\partial^\mu\vartheta(\tau)}{\partial\tau^\mu} \text{ при } \xi = \vartheta(\tau), \vartheta(\tau=0) = 0, \quad (10)$$

где $\vartheta(\tau)$ - координата подвижной границы раздела фаз, Q - количество тепла, выделяемое или поглощаемое в процессе таяния льда или замерзания воды. Физический смысл условия Стефана (10) заключается в равенстве потоков тепловой энергии с учетом скрытой теплоты выделяемой или поглощаемой на границе между фазами в зависимости от направления движения фазовой границы.

Условие (10) обобщает известное условие Стефана $\frac{\lambda_1 t_1}{\sqrt{D_1}}\frac{\exp\left(-\frac{\sigma^2}{4D_1}\right)}{erf\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{D_1}}\right)} + \frac{\lambda_2 t_2}{\sqrt{D_2}}\frac{\exp\left(-\frac{\sigma^2}{4D_2}\right)}{1-erf\left(\frac{\sigma}{2\sqrt{D_2}}\right)} = -\frac{\sqrt{\pi}}{2}Q\sigma$ и совпадает с ним, когда $\gamma = 1$ и $\mu = 1$. В остальных случаях мы имеем нетривиальное обобщение условия Стефана. Решения задачи Стефана в производных дробного порядка имеют вид:

$$T_1(\xi,\tau) = t_1 + \frac{t_3 - t_1}{F_{\alpha,\beta}(D_1/\sigma^\beta)}\frac{2}{\pi}\int_0^\infty dz \frac{\sin z}{z}E_{\alpha,1}(-D_1\frac{\tau^\alpha}{\xi^\beta}z^\beta), \quad 0 < \xi < \vartheta(\tau),$$

$$T_2(\xi,\tau) = \frac{t_3 - t_2F_{\alpha,\beta}(D_2/\sigma^\beta)}{1-F_{\alpha,\beta}(D_2/\sigma^\beta)} + \frac{t_2 - t_3}{1-F_{\alpha,\beta}(D_2/\sigma^\beta)}\frac{2}{\pi}\int_0^\infty dz \frac{\sin(z)}{z}E_{\alpha,1}(-D_2\frac{\tau^\alpha}{\xi^\beta}z^\beta),$$

$\vartheta(\tau) < \xi < \infty$.

Здесь $F_{\alpha,\beta}(x)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}dz\frac{\sin(z)}{z}E_{\alpha,1}(-xz^{\beta})$.

Зависимость координаты межфазной границы от времени имеет вид

$$\vartheta(\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}\quad , \qquad (11)$$

где уравнение для определения σ дается выражением

$$\frac{(t_3-t_1)\lambda_1 K_{\alpha,\beta}(D_1/\sigma^{\beta})}{F_{\alpha,\beta}(D_1/\sigma^{\beta})}-\frac{(t_2-t_3)\lambda_2 K_{\alpha,\beta}(D_2/\sigma^{\beta})}{(1-F_{\alpha,\beta}(D_2/\sigma^{\beta}))}=-\frac{\Gamma(1+\alpha/\beta)}{\Gamma(1-\gamma\alpha/\beta)}Q\sigma^{1+\gamma}.$$

Здесь $K_{\alpha,\beta}(x)=\frac{2}{\pi cos\left(\frac{\pi}{2}(1-\gamma)\right)}\int_0^{\infty}\frac{dz}{z^{1-\gamma}}\left(\cos(z+\frac{\pi}{2}(1-\gamma))+U_{1-\gamma}(z,0)\right)E_{\alpha,1}(-xz^{\beta}),$

где $U_{\mu}(x,y)$ - функция Ломмеля от двух аргументов.

Принципиальное отличие закона $\vartheta(\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}$ от ранее известных заключается в том, что $\vartheta(\tau)$ зависит от двух параметров α и β. При α=1 и β=2 уравнение (11) совпадает с классическим уравнением [6]. В случае $0<\alpha\le 1$ и β=2 уравнение (11) совпадает с уравнением работы [7].

Для определения значения функции $\vartheta(\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}$ установим, как зависит $\sigma(\alpha,\beta)$ от параметров α, β для случая системы вода-лед.

Исходя из значений параметров температура льда $t_1=-5^0C$, воды $t_2=0^0C$, $t_3=0^0C$, $\rho_{льда}=917.4кг/м^3$, $\lambda_{льда}=2.24$Вт/м · К, $Q_{льда}=330кДж/$кг, $a_{льда}=1.2\cdot10^{-6}м^2/$с

уравнение для определения $\sigma(\alpha,\beta)$ принимает вид

$$\frac{K_{\alpha,\beta}(1.2/\sigma^{\beta})}{F_{\alpha,\beta}(1,2/\sigma^{\beta})}=27.03\frac{\Gamma(1+\alpha/\beta)}{\Gamma(1-\gamma\alpha/\beta)}\sigma^{1+\gamma}.$$

Таким образом, при учете эффектов памяти и пространственных корреляций имеет место обобщенный закон изменения координаты области фазового перехода определяемый соотношением (11). Величина σ оказывается зависящей от двух параметров: $\sigma=\sigma(\alpha,\beta)$. Это принципиально важно, поскольку приводит к нелинейной зависимости координаты межфазной границы от параметров нелокальности.

Численные значения $\sigma(\alpha,\beta)$ приведены в виде таблицы для нескольких значений α , β . В таблице по строке меняются значения $\alpha\in(0,1)$, по столбцу меняются значения $\beta\in(1,2)$ с шагом 0.05. Исходя из этих значений, определяя $\sigma(\alpha,\beta)$ для фиксированных значений $\alpha\in(0,1)$ и $\beta\in(1,2)$, можно определить зависимость координаты ϑ от α и β.

На рис.1а приведены результаты расчета зависимости $\vartheta(\tau)$ от значений α для некоторых фиксированных значений β. Для значения β=1.8 эта зависимость имеет монотонно возрастающий характер при уменьшении значения параметра α. Для значения β=1.05 эта зависимость становится немонотонной и имеет пороговый характер. На рисунке *1б* приведены результаты расчета зависимости $\vartheta(\tau)$ от значений β для некоторых фиксированных значений α. Как следует из рисунка, характер зависимости $\vartheta(\tau)$ от значений β определяется значением

параметра α. Для значения α=0.7 эта зависимость имеет монотонно убывающий характер при уменьшении значения параметра β. Для значений α=1 эта зависимость становится немонотонной и имеет пороговый характер. Общая зависимость $\vartheta(\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}$ от параметров α, β приводится на рис.2. Как видно, вблизи области значений α=1,β=1 значения функции $\vartheta(\tau)=\sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}$ аномально растут. Это связано с двумя факторами. Во-первых, в этой области зависимость $\vartheta(\tau)$ от времени имеет линейный характер $\vartheta(\tau)\approx\tau$, во-вторых, в данном случае системы вода-лед, значения параметра $\sigma(\alpha,\beta)$ в этой области увеличиваются.

Таблица. Численные значения $\sigma(\alpha,\beta)$.

$$\sigma(\alpha,\beta)=\begin{pmatrix}
2.272 & 2.277 & 2.282 & 2.286 & 2.29 & 2.294 & 2.297 & 2.3 & 2.303 & 2.306 & 2.309 & 2.311 & 2.314 & 2.316 & 2.318 & 2.32 & 2.322 & 2.324 & 2.326 & 2.327\\
2 & 2.016 & 2.03 & 2.044 & 2.056 & 2.068 & 2.079 & 2.089 & 2.098 & 2.107 & 2.116 & 2.124 & 2.131 & 2.138 & 2.145 & 2.151 & 2.157 & 2.163 & 2.169 & 2.174\\
1.719 & 1.744 & 1.768 & 1.789 & 1.809 & 1.828 & 1.846 & 1.863 & 1.879 & 1.893 & 1.907 & 1.921 & 1.933 & 1.945 & 1.956 & 1.967 & 1.977 & 1.987 & 1.997 & 2.005\\
1.455 & 1.487 & 1.517 & 1.545 & 1.572 & 1.597 & 1.62 & 1.642 & 1.663 & 1.683 & 1.702 & 1.719 & 1.736 & 1.752 & 1.768 & 1.782 & 1.796 & 1.81 & 1.823 & 1.835\\
1.217 & 1.254 & 1.289 & 1.321 & 1.352 & 1.381 & 1.409 & 1.435 & 1.46 & 1.484 & 1.506 & 1.528 & 1.548 & 1.568 & 1.586 & 1.604 & 1.621 & 1.638 & 1.653 & 1.669\\
1.009 & 1.048 & 1.085 & 1.121 & 1.154 & 1.186 & 1.217 & 1.246 & 1.273 & 1.3 & 1.325 & 1.349 & 1.372 & 1.394 & 1.416 & 1.436 & 1.456 & 1.474 & 1.493 & 1.51\\
0.8303 & 0.8699 & 0.9079 & 0.9442 & 0.9789 & 1.012 & 1.044 & 1.075 & 1.104 & 1.132 & 1.159 & 1.185 & 1.21 & 1.234 & 1.257 & 1.28 & 1.301 & 1.322 & 1.342 & 1.361\\
0.6786 & 0.7174 & 0.7548 & 0.7909 & 0.8257 & 0.8593 & 0.8917 & 0.9229 & 0.953 & 0.982 & 1.01 & 1.037 & 1.063 & 1.088 & 1.113 & 1.136 & 1.159 & 1.181 & 1.202 & 1.222\\
0.5515 & 0.5884 & 0.6243 & 0.6592 & 0.6931 & 0.7261 & 0.758 & 0.789 & 0.8191 & 0.8482 & 0.8764 & 0.9038 & 0.9303 & 0.956 & 0.9809 & 1.005 & 1.028 & 1.051 & 1.073 & 1.095\\
0.4459 & 0.4802 & 0.5139 & 0.547 & 0.5793 & 0.611 & 0.6419 & 0.672 & 0.7014 & 0.73 & 0.7579 & 0.7851 & 0.8115 & 0.8372 & 0.8622 & 0.8866 & 0.9103 & 0.9333 & 0.9558 & 0.9776\\
0.3589 & 0.3902 & 0.4213 & 0.4521 & 0.4824 & 0.5122 & 0.5416 & 0.5704 & 0.5987 & 0.6263 & 0.6534 & 0.6799 & 0.7058 & 0.7311 & 0.7558 & 0.78 & 0.8036 & 0.8266 & 0.849 & 0.871\\
0.2877 & 0.3159 & 0.3441 & 0.3723 & 0.4003 & 0.428 & 0.4555 & 0.4827 & 0.5094 & 0.5358 & 0.5617 & 0.5872 & 0.6123 & 0.6368 & 0.6609 & 0.6845 & 0.7077 & 0.7303 & 0.7525 & 0.7743\\
0.2297 & 0.2547 & 0.28 & 0.3055 & 0.331 & 0.3566 & 0.382 & 0.4072 & 0.4323 & 0.4571 & 0.4817 & 0.5059 & 0.5298 & 0.5534 & 0.5766 & 0.5994 & 0.6219 & 0.644 & 0.6656 & 0.6869\\
0.1828 & 0.2048 & 0.2272 & 0.25 & 0.273 & 0.2962 & 0.3194 & 0.3427 & 0.3659 & 0.389 & 0.412 & 0.4348 & 0.4575 & 0.4798 & 0.502 & 0.5238 & 0.5454 & 0.5667 & 0.5877 & 0.6083\\
0.1449 & 0.1641 & 0.1838 & 0.204 & 0.2245 & 0.2454 & 0.2665 & 0.2877 & 0.309 & 0.3304 & 0.3517 & 0.373 & 0.3942 & 0.4152 & 0.4362 & 0.4569 & 0.4775 & 0.4978 & 0.5179 & 0.5378\\
0.1146 & 0.1311 & 0.1482 & 0.166 & 0.1842 & 0.2028 & 0.2217 & 0.241 & 0.2604 & 0.2799 & 0.2996 & 0.3193 & 0.339 & 0.3587 & 0.3783 & 0.3978 & 0.4172 & 0.4365 & 0.4557 & 0.4747\\
0.09037 & 0.1045 & 0.1193 & 0.1347 & 0.1507 & 0.1672 & 0.1841 & 0.2014 & 0.2189 & 0.2367 & 0.2547 & 0.2728 & 0.291 & 0.3092 & 0.3275 & 0.3458 & 0.364 & 0.3822 & 0.4003 & 0.4184\\
0.07106 & 0.08302 & 0.09573 & 0.1091 & 0.1231 & 0.1376 & 0.1526 & 0.168 & 0.1838 & 0.1998 & 0.2161 & 0.2327 & 0.2494 & 0.2662 & 0.2831 & 0.3001 & 0.3171 & 0.3342 & 0.3512 & 0.3682\\
0.3057 & 0.3436 & 0.3838 & 0.08816 & 0.1003 & 0.113 & 0.1262 & 0.1399 & 0.1539 & 0.1684 & 0.1831 & 0.1981 & 0.2134 & 0.2288 & 0.2444 & 0.2601 & 0.2759 & 0.2918 & 0.3077 & 0.3236\\
0.289 & 0.293 & 0.3234 & 0.3595 & 0.08156 & 0.0926 & 0.1042 & 0.1162 & 0.1287 & 0.1416 & 0.1549 & 0.1684 & 0.1823 & 0.1964 & 0.2106 & 0.2251 & 0.2397 & 0.2544 & 0.2692 & 0.2841
\end{pmatrix} \quad (4.44)$$

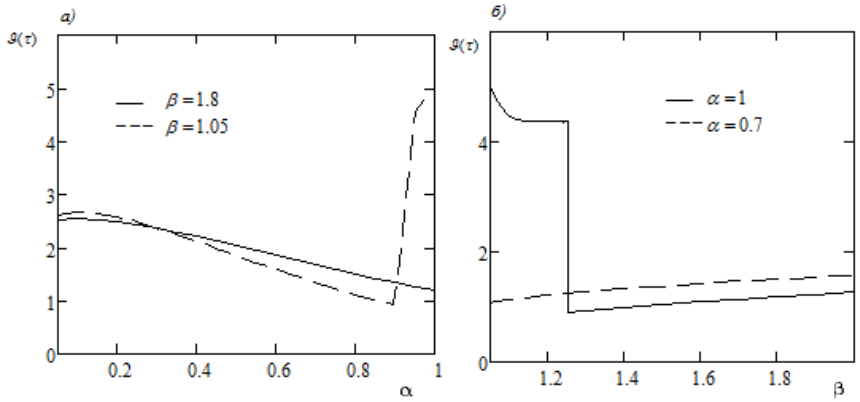


Рис.1. Зависимости безразмерной координаты межфазной границы:
а) от параметра α; б) от параметра β.

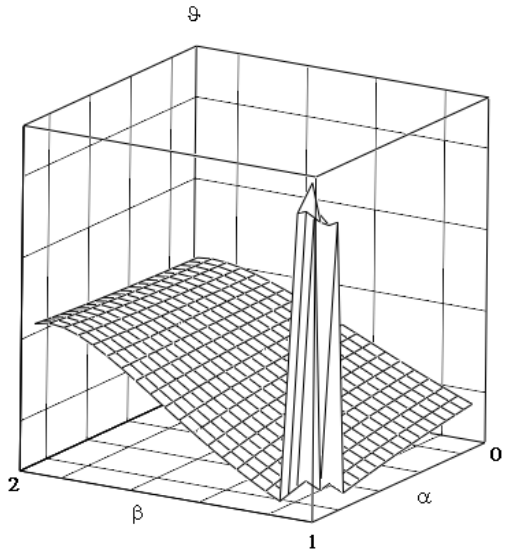


Рис.2. Зависимость безразмерной координаты межфазной границы $\vartheta(\tau) = \sigma(\alpha,\beta)\cdot\tau^{\alpha/\beta}\,\vartheta(\tau)$ от параметров α , β для значения $\tau = 20$.

Таким образом, нелокальные уравнения теплопроводности, благодаря наличию двух новых параметров α и β, которые представляют собой показатели производных дробного порядка по времени и координате, значительно расширяют область применимости задачи Стефана и позволяют создать адекватные количественные модели процессов переноса тепла с учетом фазовых переходов.

Литература:

1. *Данилюк И.И.* О задаче Стефана. // УМН.– 1985.–Т.40–№5(245).– С.133-185.
2. *Мейерманов А.М.* Задача Стефана. Новосибирск: Наука. – 1986. – 240 с.
3. *Алхасов А.Б., Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Уравнение теплопроводности в производных дробного порядка / / ИФЖ. – 2011. – Т.84. –№2. – С. 309–317.
4. *Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Особенности решений уравнения теплопереноса в производных дробного порядка.// ЖТФ. – 2011г.– Т.81.– №7.– С. 1–6.
5. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск: Наука и Техника, 1987. – 498 с.
6. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности.– М.: ВШ, 1967. – 600с.
7. *Liu Junyi, Xu Mingyu.* Some exact solutions to Stefan problems with fractional and Applications // Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2009. V.351. – P. 536-542.

ФРАКТАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ ВИРИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Магомедов Р.А., Мейланов Р.П.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а

Введение. В настоящее время интенсивно развивается неэкстенсивная (неаддитивная) статистическая физика и термодинамика [1-3]. Для многих физических систем условия выполнения гипотезы молекулярного хаоса не выполняется. К таким системам относятся системы с фрактальной структурой, для которых характерно наличие развитой межфазной границы с чем, собственно, и связано невыполнение принципа локальной равновесности и необходимость привлечения представлений геометрии дробной размерности, имеющие свойства самоподобия. Для систем с фрактальной структурой существенны эффекты памяти и пространственных корреляций, которые в конечном итоге связаны с тем, что столкновения частиц происходят с «памятью» что, в свою очередь приводит, к нарушению условий выполнения гипотезы молекулярного хаоса. Учет эффектов памяти и пространственных корреляций приводят к необходимости использования дифференциальных уравнений в производных дробного порядках[4-7].

В настоящей работе дается вывод уравнения состояния с учетом вириальных коэффициентов с применением дробного исчисления.

1. Общие соотношения.

Для вывода уравнения состояния используется выражение

$$P = -\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial^{\alpha} F}{\partial V^{\alpha}}\bigg|_{T}, \qquad (1)$$

где P - давление, V - объем, T - температура, F - потенциал Гельмгольца;

Производная дробного порядка имеет вид

$$\frac{\partial^{\alpha} F(V)}{\partial V^{\alpha}} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{\partial}{\partial V}\int_{0}^{V}\frac{F(v)}{(V-v)^{\alpha}}dv.$$

где $0 < \alpha \le 1$ - показатель производной дробного порядка.

Особенность систем с фрактальной структурой в том, что для физических величин таких систем наблюдается зависимости степенного характера. В частности связь между изменением внутренней энергии и объемом может быть $\Delta E \approx (\Delta V)^{\alpha}$, где α - размерность фрактала. Исключительная особенность термодинамического процесса для систем с фрактальной структурой и в том, что в ходе термодинамического процесса размерность фрактала α может меняться так, что α становится функцией термодинамических параметров $\alpha = \alpha(V,T)$. В результате для описания свойств системы, необходимо привлекать множество уравнений состояния. Подобным множеством уравнений состояния может выступить множество уравнений, задаваемое выражением (1). В этом случае экспериментально наблюдаемая зависимость $P_{эксп}(V,T)$ можно представить через множество уравнений состояния определяемых соотношением (1), в виде параметрического разложения (1.1), где параметром выступает показатель порядка производной α. Для определения подобного параметрического разложения используется уравнение

$$P_{эксп}(V,T) = P_{FR}(V,T,\alpha) \qquad (1.1)$$

Здесь $P_{FR}(V,T,\alpha)$ есть выражение, получаемое из (1) для заданной функции F. Рассматривая уравнение (1.1) при заданных значениях V, T как функцию относительно α определяем некоторую функцию $\alpha = \alpha(V,T)$. В результате получится уравнение состояния

$$P_{эксп}(V,T) = P_{FR}(V,T,\alpha(V,T)) \qquad (1.2)$$

которое можно назвать «мультифрактальным» уравнением состояния системы [8]. Заметим, что разложений типа (1.2) можно осуществить на основе различных «базисных» уравнений состояния, порождаемых выражением (1) для различных функций F. При этом имеем различные функции $\alpha = \alpha(V,T)$.

Полученная функция $\alpha = \alpha(V,T)$ содержит информацию о динамике изменения структуры системы и является новым термодинамическим параметром.

Для потенциала Гельмгольца имеем $F = -kT\ln Q$,где Q - статистическая сумма которая в общем случае дается выражением [9, 10]

$$Q = \frac{1}{(2\pi\hbar)^{3N}\,N!}\int....\int \exp(-\frac{H}{kT})d\vec{p}_1...d\vec{p}_N\,d\vec{r}_1...d\vec{r}_N \qquad (2)$$

Здесь N - число частиц в системе, $\vec{p}$ - импульс частицы, $\vec{r}$ - координата частицы.

$$H = \sum_{i=1}^{N}\frac{\vec{p}_i^{\,2}}{2m} + U(\vec{r}_1,...,\vec{r}_N) \qquad (3)$$

сумма кинетической и потенциальной энергий частиц. Подставляя (3) в (2) получим

$$Q = \frac{Z(N,V,T)}{N!\Lambda^{3N}} \qquad (4)$$

где $\Lambda = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mkT}}$ - тепловая длина частицы, $Z(N,V,T) = \int...\int \exp(-\frac{H}{kT})d\vec{r}_1...d\vec{r}_N$ конфигурационный интеграл [11].

Представим (4) в виде

$$Q = \frac{V^N}{N!\Lambda^{3N}}\left[1 + \frac{1}{V^N}\int...\int\left(\exp(-\frac{U}{kT}) - 1\right)d\vec{r}_1...d\vec{r}_N\right] \qquad (5)$$

Для потенциала Гельмгольца получим

$$F = -kT\ln Q = -kT\left[\ln\left(\frac{V^N}{N!\Lambda^{3N}}\right) + \ln\left(1 + \frac{1}{V^N}\int...\int\left(\exp(-\frac{U}{kT}) - 1\right)d\vec{r}_1...d\vec{r}_N\right)\right] \qquad (6)$$

Подставляя (6) в (1) получим следующее уравнения состояния

$$P = kT\,\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\,\frac{\partial}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(\frac{V^N}{N!\Lambda^{3N}}\right) + \ln\left(1 + \frac{1}{V^N}\int...\int\left(\exp(-\frac{U}{kT}) - 1\right)d\vec{r}_1...d\vec{r}_N\right)\right] \qquad (7)$$

В случае $U(\vec{r}_1,...,\vec{r}_n) = 0$ из (7) имеем

$$P = kT\,\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\,\frac{\partial}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(\frac{V^N}{N!\Lambda^{3N}}\right)\right] \qquad (8)$$

Выражение (8) приводит к ранее полученному фрактальному уравнению состояния [8]

$$P = -\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}} \cdot \frac{\partial^{\alpha}}{\partial V^{\alpha}} F =$$
$$= \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\} \quad (9)$$

В общем случае имеем уравнение состояния в виде

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\}+$$
$$+kT\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(1+\frac{1}{V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{U}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N\right)\right] \quad (10)$$

Дальнейшее рассмотрение зависит от вида потенциальной энергии $U(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_n)$

2. «Фрактальное» вириальное уравнение состояния.

В случае приближения парного взаимодействия, когда $U(\vec{r}_1,\ldots,\vec{r}_n)=\sum_{1\le i<j\le N}u(r_{ij})$ уравнение (10) принимает вид

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\}+$$
$$+kT\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(1+\frac{N(N-1)}{2V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N\right)\right] \quad (11)$$

Проведя в (11) интегрирование по координатам получим

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\}+$$
$$+kT\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(1+\frac{N(N-1)}{2V^2}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1 d\vec{r}_2\right)\right]$$

Введем переменную *A(T)*

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\}+$$
$$+kT\frac{\Gamma(2-\alpha)}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial^{\alpha}}{\partial V^{\alpha}}\left[\ln\left(1+\frac{A(T)}{V}\right)\right] \quad (12)$$

где $A(T)=\frac{N(N-1)}{2}\int\left(\exp(-\frac{u(r)}{kT})-1\right)dr$

Вычисляя производную дробного порядка во втором слагаемом в (12) получим

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\}+$$
$$+\frac{kT}{V^{1-\alpha}}\frac{\partial}{\partial V}\left\{V^{1-\alpha}\left[\ln(1+\frac{A(T)}{V})-\psi(1)+(1+\frac{V}{A(T)})^{1-\alpha}\sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n\frac{(1-\alpha)_n}{n!}(\frac{V}{A(T)})^n\psi(2-\alpha+n)\right]\right\} \quad (13)$$

Далее из (13) получим, с учетом соотношений

$$A(T)=\frac{N(N-1)}{2}\int\left(\exp(-\frac{u(r)}{kT})-1\right)dr=-N^2B(T),$$

где $B(T)=\frac{1}{2}\int_0^{\infty}\left(1-\exp(-\frac{u(r)}{kT})\right)dr$ - второй вириальный коэффициент, получим

$$P=\frac{NkT}{V}\left\{1+\frac{NB(T)}{V(1-N^2B(T)/V)}+\left(1-\frac{V}{N^2B(T)}\right)^{1-\alpha}\sum_n^{\infty}\frac{(1-\alpha)_n}{n!}n\left(\frac{V}{N^2B(T)}\right)^n\psi(2-\alpha+n)+\right.$$

$$+(1-\alpha)\cdot\left(\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)+\psi(1)-\psi(2-\alpha)+\frac{1}{N}\ln\left(1-\frac{N^2B(T)}{V}\right)-\frac{\psi(1)}{N}+\right. \quad (14)$$

$$\left.\left.+\frac{1}{N}\cdot\frac{1-2V/(N^2B(T))}{(1-V/(N^2B(T))^{\alpha}}\sum_n^{\infty}\frac{(1-\alpha)_n}{n!}\left(\frac{V}{N^2B(T)}\right)^n\psi(2-\alpha+n)\right)\right\}$$

В случае $\frac{A(T)}{V}<<1$, когда $\ln(1+\frac{A(T)}{V})\approx\frac{A(T)}{V}$, и пренебрегая малым вкладом от членов содержащих суммы, получим

$$P=\frac{NkT}{V}\left\{1+\frac{NB(T)}{V}+(1-\alpha)\cdot\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{mkT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)-\frac{NB(T)}{V}+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\} \quad (14.1)$$

Уравнение (14) при $\alpha=1$ совпадает с обычным вириальным уравнением состояния и представляет собой «фрактальное» уравнение состояния.

3. «Фрактальное» вириальное уравнение состояния для двухкомпонентной смеси.

Выражение (3) для двухкомпонентной смеси может быть записано в виде:

$$H=\sum_{i=1}^{N_1}\frac{\vec{p}_i^{\,2}}{2m_1}+\sum_{j=1}^{N_2}\frac{\vec{p}_j^{\,2}}{2m_2}+\sum_{i=1}^{N_1}u_{11}(r_i)+\sum_{j=1}^{N_2}u_{22}(r_j)+\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}u_{12}(r_{ij}) \quad (15)$$

где N_1, N_2 - число частиц каждой компоненты в системе, $\vec{p}_i$, $\vec{p}_j$ - импульсы частиц, соответственно, $\vec{r}_i$, $\vec{r}_j$ - координаты частиц.

То есть имеем три вида взаимодействия частиц: 1) взаимодействие частиц первой компоненты смеси между собой, 2) взаимодействие частиц второй компоненты смеси, 3) взаимодействие частиц первой и второй компонент смеси.

Тогда статистическая сумма для двухкомпонентной смеси имеет вид

$$Q=\frac{1}{N!}\frac{1}{\Lambda_1^{3N_1}\cdot\Lambda_2^{3N_2}}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{11}+u_{22}+u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N=$$

$$=\frac{V^N}{N!\cdot\Lambda_1^{3N_1}\cdot\Lambda_2^{3N_2}}\frac{1}{V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{11}+u_{22}+u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N \quad (16)$$

где $\Lambda_1=\sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{m_1kT}}$, $\Lambda_2=\sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{m_2kT}}$ - тепловые длины частиц 1-ой и 2-ой компонент смеси.

Далее преобразуем (16)

$$Q = \frac{V^{N_1}\cdot V^{N_2}\cdot N_1!\,N_2!}{N!\Lambda_1^{3N_1}\cdot\Lambda_2^{3N_2}\cdot N_1!\,N_2!}\frac{1}{V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{11}+u_{22}+u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N =$$
$$= \frac{V^{N_1}}{N_1!\,\Lambda_1^{3N_1}}\frac{V^{N_2}}{N_2!\Lambda_2^{3N_2}}\frac{N_1!\,N_2!}{N!}\left[1+\frac{1}{V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{11}+u_{22}+u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N\right] \quad (17)$$

Произведение $\frac{V^{N_1}}{N_1!\,\Lambda_1^{3N_1}}\frac{V^{N_2}}{N_2!\Lambda_2^{3N_2}}$ в выражении (17) можно преобразовать

$$\frac{V^{N_1}}{N_1!\,\Lambda_1^{3N_1}}\frac{V^{N_2}}{N_2!\Lambda_2^{3N_2}} = \frac{V^N}{N!(\Lambda_1^{N_1/N}\Lambda_2^{N_2/N})^{3N}} = \frac{V^N}{N!(\Lambda_1^x\Lambda_2^{(1-x)})^{3N}},$$

где

$$\Lambda_1^x\Lambda_2^{(1-x)} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{kT}}^x\left(\frac{1}{\sqrt{m_1}}\right)^x\sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{kT}}^{1-x}\left(\frac{1}{\sqrt{m_2}}\right)^{1-x} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{kT}}\frac{1}{m_1^{x/2}}\frac{1}{m_2^{(1-x)/2}} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{kTm_1^x m_2^{1-x}}}$$

$x=N_1/N$; $1-x=N_2/N$

Для потенциала Гельмгольца получим

$$F = -kT\left[\ln\frac{V^{N_1}}{N_1!\,\Lambda_1^{3N_1}} + \ln\frac{V^{N_2}}{N_2!\Lambda_2^{3N_2}} + \ln\frac{N_1!\,N_2!}{N!} + \right.$$
$$\left. + \ln\left[1+\frac{1}{V^N}\int\ldots\int\left(\exp(-\frac{u_{11}+u_{22}+u_{12}}{kT})-1\right)d\vec{r}_1\ldots d\vec{r}_N\right]\right] \quad (18)$$

Далее аналогично выше приведенным вычислениям для одноатомного газа, получим выражение для потенциала Гельмгольца для двухкомпонентной смеси:

$$F = -kT\left[\ln\frac{V^{N_1}}{N_1!\,\Lambda_1^{3N_1}} + \ln\frac{V^{N_2}}{N_2!\Lambda_2^{3N_2}} + \ln\frac{N_1!\,N_2!}{N!}\right] - kT\ln\left[1+\frac{A_1+A_2+A_3}{V}\right] \quad (19)$$

где $A_1 = \frac{N_1(N_1-1)}{2}\int\left(\exp(-\frac{u_{11}(r)}{kT})-1\right)dr$, , $A_2 = \frac{N_2(N_2-1)}{2}\int\left(\exp(-\frac{u_{22}(r)}{kT})-1\right)dr$, ,

$A_3 = \frac{N_1N_2)}{2}\int\left(\exp(-\frac{u_{12}(r)}{kT})-1\right)dr$

Используя соотношения из [12] для интегрирования и формулу Стирлинга

$$\ln N! = N\ln N - N = N(\ln N - \ln e) = N\ln\frac{N}{e}$$

для преобразования логарифмов из (19) для двухкомпонентной смеси получим

$$P = \frac{NkT}{V}\left\{1+\frac{N_1}{N}\frac{N_1B_1}{V}+\frac{N_2}{N}\frac{N_2B_2}{V}+\frac{N_1+N_2}{N}\frac{B_3}{V}+\right.$$
$$\left.+(1-\alpha)\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{m_1^x m_2^{1-x}kT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)-\frac{N_1}{N}\frac{N_1B_1}{V}-\frac{N_2}{N}\frac{N_2B_2}{V}-\frac{N_1+N_2}{N}\frac{B_3}{V}+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\} \quad (20),$$

где B_1, B_2, B_3 – вириальные коэффициенты.

Т.к. выше были введены соотношения для N_1, N_2 и N - общего числа частиц в системе, то (20) можно представить в виде

$$P=\frac{NkT}{V}\left\{1+x\frac{N_1B_1}{V}+(1-x)\frac{N_2B_2}{V}+\sqrt{x(1-x)}\frac{\sqrt{N_1N_2}B_3}{V}+\right.$$
$$\left.+(1-\alpha)\left[\ln\left(\frac{eV}{N}\left[\frac{m_1^{x}m_2^{1-x}kT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\right)-x\frac{N_1B_1}{V}-(1-x)\frac{N_2B_2}{V}-\sqrt{x(1-x)}\frac{\sqrt{N_1N_2}B_3}{V}+\psi(1)-\psi(2-\alpha)\right]\right\} \quad (21)$$

4. Заключение. Уравнения (14) и (21) могут быть использованы, как однопараметрические уравнения состояния (т. е. как функции от $\alpha=\alpha(V,T)$), в качестве альтернативного подхода для описания *P-, V-,T-* характеристик веществ (в том числе и смесей).

Литература:

1. Nonextensive Statistical Mechanics and its Applications/ Ed. by S. Abe and Y. Ohamoto. Series lecture Notes in Physics. Berlin, New York, Heidelderg: Springer-Verlag, 2001.277 p.
2. *Зарипов Р.Г.* Самоорганизация и необратимость в неэкстенсивных системах. Издательство «Фэн». Казань. 2002. 250 с
3. Nonadditive Entropy and Nonextensive Statistical Mechanics/ Ed. By M. Sugiyama. Continuum Mechanics and Thermodynamics. Vol.16. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. p. 221-304.
4. *Oldham K.B., Spanier J.* The fractional calculus. New York .1974. 234 p.
5. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые приложения. Минск. Наука и техника. 1987. 688 с.
6. *Нахушев А.М.* Дробное исчисление и его применение. М.: Физматлит.2003. 272 с.
7. *Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J.* Theory and applications of fractional differential equations. Elsevier/ North–Holland, Amsterdam, 2006.
8. *Мейланов Р.П., Магомедов Р.А., Рамазанова А.Э.* Метод дифференциальных уравнений дробного порядка в равновесной термодинамике// Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. 2008. Т.10. № 1. С. 35-39.
9. *Т.Хилл.* Статистическая механика. М.:ИЛ.1960. 486 с.
10. *Керзон Хуанг.* Статистическая механика. М.: Мир. 1966. 520 с.
11. *Л.Д.Ландау, Е.М. Лифшиц.* Статистическая физики. М.: Наука. 1976. 583 с.
12. *Прудников А. П., Брычков Ю.А., Маричев О.И.* Интегралы и ряды. М.: Наука. 1981, с. 490

К ХАРАКТЕРИСТИКЕ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Азизов Г.А.

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: gsgms@mail.ru*

Гидродинамические и термодинамические процессы, происходящие при движении двухфазных систем, описываются уравнениями [1]:

неразрывности $$\frac{d(\upsilon F\rho)}{dl}=0,\qquad (1)$$

баланса количества движения $$-F\frac{dp}{dl}=Fg\rho\cos\alpha+\Pi\tau+m\frac{d\upsilon}{dl},\qquad (2)$$

энергии $$\frac{dQ}{dl}-\frac{dA}{dl}=m\frac{d}{dl}\left(J+\frac{\upsilon^2}{2}+gl\cos\alpha\right),\qquad (3)$$

где υ – скорость смеси (одной из фаз), F – площадь канала (трубы), Π – смоченный периметр канала (трубы), τ – напряжение трения на стенке (границе раздела), α – угол отклонения трубы от вертикали, ρ – плотность смеси (одной из фаз), Q – количество подводимой теплоты, A – механическая работа, J – энтальпия смеси (или одной из фаз), m – массовый расход смеси (или одной из фаз), l – расстояние в направлении движения, p – давление.

Существует большое число моделей газожидкостного потока. Рассмотрим две основные модели, которые отличаются как по физической сущности, так и методами аналитической интерпретации: модель гомогенного течения и модель раздельного течения. Другие модели и методы анализа движения двухфазной смеси служат для обоснования введения и расчета эмпирических постоянных и поправочных коэффициентов в соотношения, используемые в указанных двух моделях для повышения их точности. В некоторых случаях с их помощью можно получить аналитические зависимости для коэффициента трения и параметров двухфазности [2].

Модель гомогенного течения является простой, полностью описывается законами и уравнениями гидродинамики однофазного потока. В модели двухфазная смесь рассматривается как однородная среда с усредненными свойствами. Плотность смеси определяется без учета относительной скорости фаз. Считается, что система находится в термодинамическом равновесии, структура потока, явления на границе раздела фаз не рассматриваются. Система уравнений (1–3) дополняется уравнением состояния смеси. За плотность принимается расходная плотность смеси:

$$\rho_{ср}=\rho_{ж}(1-\beta)+\rho_{г}\beta,\qquad (4)$$

где (β – расходное газосодержание смеси,

$$\beta=\frac{q_г}{q_г+q_ж},\qquad (5)$$

$q_г(q_ж)$ – объемный расход газа (жидкости) при данных термодинамических условиях;

скорость смеси:

$$\upsilon_c=\frac{q_г+q_ж}{F},\qquad (6)$$

напряжение трения

$$\tau = \frac{\lambda_c \rho_{cp} \upsilon_c^2}{8}, \qquad (7)$$

λ_c – коэффициент гидродинамического сопротивления при движении газожидкостной смеси, определяемый по диаграмме Никурадзе или по одной из апроксимирующих формул в функции числа Рейнольдса смеси:

$$\mathrm{Re}_c = \frac{\upsilon_c D \rho_{cp}}{\mu}, \qquad (8)$$

где μ – вязкость смеси (чаще всего за μ принимается вязкость непрерывной фазы), D – диаметр трубы.

Использование модели раздельного течения связано с некоторыми трудностями, так как включения дискретной фазы различны по размерам и форме и случайным образом распределены в потоке. Все характеристики фаз и потока в модели рассматриваются отдельно для жидкости и газа. Для каждой фазы записываются уравнения неразрывности, движения и энергии (1–3). Эти уравнения решаются совместно с уравнениями состояния фаз и уравнениями взаимодействия фаз между собой и со стенками трубы. В случаях, когда фазы имеют четкую границу раздела (развитая пробковая и кольцевая формы течения [3]), модель позволяет описать газожидкостной поток на основе аналитических методов механики однофазной жидкости при минимуме используемых эмпирических соотношений и допущений. В моделях раздельного течения могут учитываться или не учитываться взаимодействие и тепломассообмен между фазами и другие явления.

Рассмотрим модели потока, более адекватно отражающие физическую картину движения двухфазной смеси. В этих моделях можно свести аналитическое описание движения к простым соотношениям гомогенной модели путем введения дополнительных коэффициентов и множителей.

При разработке методик расчета промысловых газожидкостных подъемников наиболее широкое распространение получила модель относительного движения. Двухфазная смесь рассматривается как псевдооднородная среда с усредненными во времени и пространстве свойствами. Плотность и скорость смеси определяются с учетом относительной скорости фаз υ_0, которая является функцией их свойств и параметров потока. Движение смеси описывается системой уравнений для однофазного потока (1–3). За плотность принимается истинная плотность смеси

$$\rho_c = \rho_{ж}(1-\varphi) + \rho_{г}\varphi, \qquad (9)$$

где φ – истинное газосодержание смеси:

$$\varphi = \frac{F_г}{F}, \qquad (10)$$

$F_г$ – среднее значение площади сечения трубы, занятой газом.

Скорость смеси определяется по формуле (6) и является средневзвешенной по площади средней скоростью фаз:

$$\upsilon_c = \upsilon_{ж}(1-\varphi) + \upsilon_{г}\varphi, \qquad (11)$$

где $\upsilon_{ж}(\upsilon_{г})$ – истинная скорость жидкости (газа).

На основе обработки экспериментальных данных определяется выражение для φ. Вместо φ могут быть выбраны и другие истинные

кинематические параметры: относительная скорость ($\upsilon_0=\upsilon_г-\upsilon_ж$), скорость газа, коэффициент скорости $\upsilon_г/\upsilon_ж$, коэффициент Арманда φ/β и т.д.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ_c может определяться в функции числа Re_c, которое определяется различными способами, или по формуле

$$\lambda_c = \psi\lambda_ф, \tag{12}$$

где ψ – параметр двухфазности, являющийся функцией характеристик потока и свойств фаз, $\lambda_ф$ – коэффициент гидравлического сопротивления одной из фаз, определяемый по числу Рейнольдса для этой фазы.

Разновидностью модели относительного движения является модель потока дрейфа. В этой модели движение фаз рассматривается не относительно стенки трубы, а относительно воображаемого сечения в потоке, которое движется со скоростью смеси. За скорость дрейфа фазы принимается разность между скоростью фазы и скоростью смеси. Приведенной скоростью дрейфа $\upsilon_{гдп}$ является скорость дрейфа, приведенная ко всей площади трубы:

$$\upsilon_{гдп} = \varphi(\upsilon_г - \upsilon_c) = -(1-\varphi)(\upsilon_ж - \upsilon_c) = -\upsilon_{ждп}. \tag{13}$$

Скорости дрейфа $\upsilon_{гд}$ и $\upsilon_{жд}$ имеют противоположное направление, а величина их определяется относительным содержанием фаз и скоростью смеси. А приведенные скорости дрейфа фаз равны по величине и противоположны по направлению (13). Принимая во внимание равенство (11) можно показать справедливость формулы (13).

На основании эксперимента можно установить зависимость приведенной скорости дрейфа от расходных характеристик потока и свойств фаз. Следовательно, истинное газосодержание, плотность смеси и инерционные потери, можно выразить через их значения для гомогенного потока путем введения поправочных коэффициентов и дополнительных членов, зависящих только от $\upsilon_{гдп}/\upsilon_{жп}$, $\upsilon_{гдп}/\upsilon_{гп}$ или $\upsilon_{гдп}/\upsilon_c$, т.е.:

$$\varphi = \frac{\upsilon_{гп}}{\upsilon_c}\left(1-\frac{\upsilon_{гдп}}{\upsilon_{гп}}\right), \tag{14}$$

$$\rho_c = \frac{\upsilon_{жп}\rho_ж + \upsilon_{гп}\rho_г}{\upsilon_c} + (\rho_ж - \rho_г)\frac{\upsilon_{гдп}}{\upsilon_c}, \tag{15}$$

где $\upsilon_{гп}(\upsilon_{жп})$ – приведенная скорость газа (жидкости):

$$\upsilon_{гп} = \frac{q_г}{F} = \upsilon_г\varphi;\ \upsilon_{жп} = \frac{q_ж}{F} = \upsilon_ж(1-\varphi).$$

На использовании профилей скорости и концентрации по сечению трубы основана модель переменной плотности, предложенная Бэнковым [4]. Поток представляется локально гомогенным. Относительное перемещение фаз отсутствует. Профили скорости и газосодержания задаются степенным законом:

$$\frac{\upsilon}{\upsilon_ц} = \left(\frac{y}{r}\right)^{1/m}, \tag{16}$$

$$\frac{\varphi}{\varphi_ц} = \left(\frac{y}{r}\right)^{1/n}, \tag{17}$$

где $\upsilon_ц$ и $\varphi_ц$ – значения параметров на оси трубы, y – расстояние от стенки, $г$ – радиус трубы.

Определяя по (17) выражение для среднего по сечению трубы значения φ, а по (16) – для приведенных скоростей фаз, при совместном решении получим

$$\varphi = K\frac{\upsilon_{гп}}{\upsilon_{гп}+\upsilon_{жп}}, \qquad (18)$$

где

$$K = \frac{2(m+n+mn)(m+n+2mn)}{(n+1)(2n+1)(m+1)(2m+1)}. \qquad (19)$$

Значение K меняется от 0,5 до 1 при изменении *m* от 2 до 7, а *n* – от 0,1 до 5.

Следовательно, причиной уменьшения истинного газосодержания по сравнению с расходным в восходящем газожидкостном потоке является не только наличие относительной скорости фаз, но и изменение скорости и газосодержания по сечению трубы.

Применение одной из моделей относительного движения или модели переменной плотности не может привести к созданию методики расчета газожидкостного подъемника, достаточно точной в широком диапазоне изменения параметров движения и свойств фаз. Для этого нужно совместное использование различных моделей, в котором бы учитывалось и влияние относительной скорости и профилей скоростей и концентраций.

Зубер и Финдлей предложили использовать в моделях относительного движения параметр распределения K_0 [5]. За параметры движения смеси по сечению трубы в системе расчетных уравнений, при учете изменений этих параметров, в системе расчетных уравнений должны приниматься их средние значения, определенные по формуле

$$\bar{x} = \frac{\int x dF}{F}. \qquad (20)$$

При обработке экспериментальных данных и на практике это не всегда удобно. Для получения средних значений параметра нужно знать его профиль распределения. Средняя истинная скорость газа является средней величиной отношения приведенной скорости газа к газосодержанию, определяемой по (20):

$$\bar{\upsilon}_г = \overline{\upsilon_{гп}/\varphi}. \qquad (21)$$

На практике расчета движения газожидкостных смесей за истинную среднюю скорость газа принимают отношение средней приведенной его скорости к среднему газосодержанию:

$$\bar{\upsilon}_г = \bar{\upsilon}_{гп}/\bar{\varphi}. \qquad (22)$$

Скорость газа по (22) рассчитывать гораздо удобнее, так как $\bar{\upsilon}_{гп} = q_г/F$, а $\bar{\varphi}$ определяют экспериментально мгновенной отсечкой части газожидкостного потока на участке трубы или каким-то иным способом. Но скорость газа, определенная по (22) отличается от средней истинной скорости газа (21), так как отношение средних величин не равно среднему частному. Чтобы получить значение $\bar{\upsilon}_г$, нужно $\upsilon_г$ умножить на поправочный коэффициент, в данном случае он равен $\left(\overline{\upsilon_{гп}/\varphi}\right)\cdot\bar{\varphi}/\bar{\upsilon}_{гп}$.

Зубером и Финдлеем в качестве такого коэффициента введен параметр распределения

$$K_0 = \frac{\overline{\varphi\cdot\upsilon_c}}{\bar{\varphi}\cdot\bar{\upsilon}_c}, \qquad (23)$$

который был впервые использован в модели потока дрейфа.

Приведенная скорость дрейфа определяется равенством (13)

$$\upsilon_{гдп} = \upsilon_{гп} - \varphi\upsilon_c . \quad (24)$$

Произведя в (24) почленное осреднение по сечению канала, имеем

$$\overline{\upsilon}_{гдп} = \overline{\upsilon}_{гп} - \overline{\varphi\upsilon}_c , \quad (25)$$

а с учетом (23) получим

$$\frac{\overline{\upsilon}_{гп}}{\overline{\varphi}} = K_0\overline{\upsilon}_c + \frac{\overline{\upsilon}_{гдп}}{\overline{\varphi}}, \quad (26)$$

откуда среднее значение φ равно

$$\overline{\varphi} = \frac{1}{K_0}\beta - \frac{\overline{\upsilon}_{гдп}}{K_0\overline{\upsilon}_c} . \quad (27)$$

Следовательно, за счет разности в скоростях фаз, учитываемой вычитаемым в (27) и учета распределения скоростей по сечению потока – множитель $1/K_0$ в уменьшаемом уравнения (27) газосодержание в двумерной модели потока дрейфа меньше, чем в гомогенной модели. При отсутствии относительной скорости фаз уравнение (27) становится идентичным уравнению (18), а множитель $1/K_0$ соответствует параметру Бэнкова K в модели переменной плотности [4] или параметру Арманда [6].

Двумерные модели относительного движения представляют еще квазиодномерное описание течения, так как различие локальных скоростей фаз допускается только в основном направлении движения. Считается, что движение поперек канала отсутствует, либо оно учитывается параметрами типа «коэффициента турбулентной диффузии». Профили скорости и концентрации используются также и в моделях раздельного течения для повышения их точности. Иногда для коэффициента трения и параметра двухфазности они дают возможность получить аналитические зависимости.

Большинство методик, применяемых при расчетах промысловых газожидкостных подъемников, разработаны на основе одномерной модели относительного движения, которая не позволяет определить общий механизм движения смеси. Эти методики не могут быть использованы в широком диапазоне параметров движения смеси. Достоверные результаты могут быть получены в условиях, близких к условиям проведения экспериментов.

Литература:

1. *Сахаров В.А., Мохов М.А.* Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. – М.: Нефть и газ, 2004. – 192 с.
2. *Чисхолм Д.* Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках. - М.: Недра, 1986. - 204 с.
3. *Азизов Г.А.* Анализ режимов течения высокотермальных вод в колонне скважины // Известия вузов Северокавказского региона: Технические науки. № 1 (153). Ростов-на-Дону, 2010. – С. 92-98.
4. *Bankoff S.G., Trans ASME J.* Heat Transfer, ser. – С. 82, 265, 1960.
5. *Зубер Н., Финдлей.* Труды амер. общ-ва инж.-мех. Серия С: Теплопередача, № 4, 29, 1965. – С. 25-32.
6. *Арманд А.А.* Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубам // Известия ВТИ, № 1, 1946.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Азизов А.А., Джаватов Д.К.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: azizov_amir@mail.ru

Проведено исследование динамики изменения удельных капитальных затрат для геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) с горизонтальными стволами в зависимости от температуры закачиваемого теплоносителя $T_{зу}(t)$ на примере месторождения термальных вод г. Кизляр. Получено выражение, позволяющее определить оптимальные параметры ГЦС. Проведены расчеты параметров энергетической установки при заданном дебите и различных значениях $T_{зу}(t)$.

Использование горизонтальных скважин является приоритетным направлением при получении геотермального тепла. Создание дополнительных горизонтальных каналов в пласте способствует увеличению поверхности фильтрации и зоны дренирования. Такое вскрытие продуктивного позволяет в десятки раз увеличить полезную протяженность ствола в пласте и многократно повысить производительность скважины.

В практических вопросах использования геотермального тепла большое значение имеет температура добываемой термальной воды, т.к. от значения этого параметра геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) зависит как вид потребителя геотермального тепла, так и эффективность его использования. Поэтому при исследовании эксплуатации ГЦС в течение достаточно длительного периода времени, очень важно знать зависимость температуры добываемой термальной воды (далее ТВ) от значения дебита ГЦС.

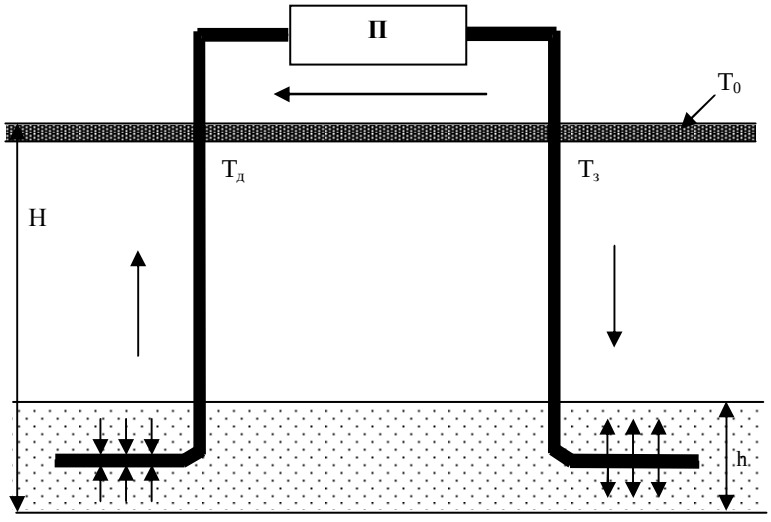


Рис. 1. Принципиальная схема ГЦС с горизонтальными стволами

За счет тепла, поступающего из пород окружающих нагнетательную скважину, при закачке отработанная ТВ будет постепенно нагреваться. Динамика изменения температуры закачиваемой ТВ на глубине Н скважины от температуры закачиваемой ТВ на устье, при различных режимах работы геотермальной скважины, описывается уравнением, полученным на основе уравнения теплопередачи [3]:

$$\frac{dT_З}{dt} = \frac{\alpha_П}{q(t)} \cdot (T_0 + H \cdot Г - T_{ЗУ}), \quad (1)$$

где $T_З$ – температура закачиваемой ТВ на глубине (Н) скважины, $\alpha_П$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу пород, T_0 – температура пород на глубине нейтрального слоя, H – глубина скважины, $Г$ – геотермический градиент температуры, $T_{ЗУ}$ – температура закачиваемой ТВ на устье скважины, t – время, q – объемный дебит скважины.

Изменение температуры добываемой ТВ со временем описывается формулой [1]:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{q(t)}{V_К} \cdot (T_{ПЛ}(t) - T_З(t)), \quad (2)$$

где $T_{ПЛ}$ – температура пластовой воды, $V_К$ – объем подземного котла.

Полученная система уравнений (1) и (2) описывает тепловой режим ГЦС.

Таким образом, решив эти уравнения, получаем:

$$T_З(t) = (T_0 + H \cdot Г) + (T_{ЗУ} - T_0 - H \cdot Г) \cdot e^{-\frac{\alpha_П \cdot t}{q}}, \quad (3)$$

$$T(t) = T_З + (T_{ПЛ} - T_З) \cdot e^{-\frac{q \cdot t}{V_К}}, \quad (4)$$

Будем считать, что количество тепла $Q_П$, потребляемое потребителем в единицу времени постоянным, то есть:

$$Q_П = C \cdot \rho \cdot q \cdot (T(t) - T_{ЗУ}(t)) = const, \quad (5)$$

где C, ρ и q – плотность, теплоёмкость термальной воды и объёмный дебит скважины, $T(t)$ – температура термальной воды поступающая к потребителю, $T_{ЗУ}(t)$ – температура термальной воды, поступающей в закачиваемую скважину от потребителя.

На практике может возникнуть проблема определения оптимального объема тепла, потребляемого потребителем ($Q_П$) в течении достаточно длительного периода времени (например в течении 30 лет). Используя описанную выше модель решим задачу в которой требуется определить для заданного дебита (q), какой должна быть потребность в тепле потребителя ($Q_П$), с учетом того что система функционирует примерно 30 лет. Для решения этой задачи зададим следующее условие: температура закачиваемого теплоносителя на устье скважины ($T_{ЗУ}$) спустя 30 лет не должна быть ниже задаваемого значения, например 30 °С. Зная $T_{ЗУ}$(t=30 лет) мы можем определить значение температуры ТВ поступающей к потребителю T(t=30 лет) воспользовавшись формулами (3) и (4). После чего, определив T(t=30 лет) и зная $T_{ЗУ}$(t=30 лет) мы можем определить оптимальное количество потребляемого тепла $Q_П$ использовав формулу (5).

Подставив выражение (5) в систему уравнений (3) и (4), получим аналитическое выражение $Q_П$(q), позволяющее определить значение дебита (q), при котором потребности потребителя ($Q_П$) будут максимальными. В результате получаем:

$$Q_П = C \cdot \rho \cdot q \cdot (((T_0 + H \cdot Г) + (T_{ЗУ} - (T_0 + H \cdot Г)) \cdot e^{\frac{-\alpha_П \cdot t}{q}}) \cdot (1 - e^{\frac{-q \cdot t}{V_К}}) + T_{ПЛ} \cdot e^{\frac{-q \cdot t}{V_К}} - T_{ЗУ}(t)), \quad (6)$$

Вычислив производную по дебиту и прировняв её к нулю, получим следующее уравнение:

$$Q_{П}^{'}(q)=C\cdot\rho\cdot(((T_0+H\cdot Г)+(T_{ЗУ}-(T_0+H\cdot Г))\cdot e^{\frac{-\alpha_{П}\cdot t}{q}})\cdot$$

$$\cdot(1-e^{\frac{-q\cdot t}{V_K}})+T_{ПЛ}\cdot e^{\frac{-q\cdot t}{V_K}}-T_{ЗУ}(t))+C\cdot\rho\cdot q\cdot(((T_{ЗУ}-(T_0+H\cdot Г))\cdot\frac{\alpha_{П}}{q^2}\cdot e^{\frac{-\alpha_{П}\cdot t}{q}})\cdot \quad , \quad (7)$$

$$\cdot(1-e^{\frac{-q\cdot t}{V_K}})+((T_0+H\cdot Г)+(T_{ЗУ}-(T_0+H\cdot Г))\cdot e^{\frac{-\alpha_{П}\cdot t}{q}})\cdot\frac{t}{V_K}\cdot e^{\frac{-q\cdot t}{V_K}}-T_{ПЛ}\cdot\frac{t}{V_K}\cdot e^{\frac{-q\cdot t}{V_K}}))=0$$

Решив полученное уравнение, определим искомое значение дебита (q), максимизирующее $Q_П$.

С учетом эффекта термолифта, проявляющегося при работе скважины, и гидравлических потерь давления по стволу, дебит горизонтальной скважины определяется по формуле [2]:

$$G = \frac{2\pi kh\,\rho(\Delta P + \Delta\rho Hg - \Delta P_{ТР})}{\mu B_0(\ln\frac{4R}{a}+\frac{\beta h}{a}\ln\frac{\beta h}{\pi d})}, \quad (8)$$

где G – массовый дебит горизонтальной скважины, кг/с; κ – горизонтальная проницаемость пласта, м^2; h – мощность продуктивного пласта, м; ρ – плотность термальной воды, кг/м^3; ΔP – перепад давления между давлениями на границе кругового контура питания и на стенке скважины, Па; μ - вязкость флюида, Па·с; B_0 – пластовый объемный фактор флюида; R – радиус кругового контура питания, м; a – длина горизонтальной части скважины, м; $\beta=\sqrt{\kappa/\kappa_в}$; $\kappa_в$ – вертикальная проницаемость пласта, м^2; d – диаметр скважины, м; $\Delta\rho=\rho(T_{СТ})-\rho(T_Д)$; $\rho(T_{СТ})$ – средняя плотность воды в стволе простаивающей скважины, кг/м^3; $\rho(T_Д)$ – плотность воды в стволе работающей скважины, кг/м^3; Н – глубина скважины, м; $\Delta P_{ТР}$ – гидравлические потери давления на стволе скважины, Па.

Для ГЦС с горизонтальными стволами формула (8) будет выглядеть следующим образом [1]:

$$G = \frac{2\pi kh\,\rho(\Delta P + \Delta\rho Hg - \Delta P_{П})}{\mu B_0(\ln\frac{4R}{a}+\frac{\beta h}{a}\ln\frac{\beta h}{\pi d})}, \quad (9)$$

где $\Delta\rho=\rho_н-\rho_д$; $\Delta P_П=\Delta P_{ТР}+\Delta P_Ф$;

Упростим выражение (9) допустив что $\rho_н=\rho_д$:

$$G = \frac{2\pi kh\,\rho(\Delta P - \Delta P_{П})}{\mu B_0(\ln\frac{4R}{a}+\frac{\beta h}{a}\ln\frac{\beta h}{\pi d})}, \quad (10)$$

Гидравлические потери давления $\Delta P_{ТР}$ складываются из потерь в самих скважинах и наземном трубопроводе $L_С$, соединяющем скважины. Предположим что диаметры наземного трубопровода и скважин одинаковы, в результате получим:

$$\Delta P_{ТР} = \frac{8\lambda G^2}{\pi^2 d^5\rho}(2H + L_С) + \frac{2\lambda G^2}{\pi^2 d^5\rho}(a_1 + a_2), \quad (11)$$

Фильтрационные потери давления в пласте определяются по формуле [4]:

$$\Delta P_Ф = -\frac{G\mu}{\pi\kappa a_2\rho}\ln\frac{d}{2L}, \quad (12)$$

где L – расстояние между скважинами, м; μ - вязкость закачиваемой воды, Па·с; a_1 и a_2 – длины горизонтальных стволов в добычной и нагнетательной скважинах, м.

Подставляя (11) и (12) в (10), проделав ряд преобразований и решив полученное уравнение определим дебит циркуляционной системы с горизонтальными скважинами:

$$G = \frac{F_2 - \sqrt{F_2^{\,2} - 4F_3 m_1}}{2F_3}, \qquad (13)$$

где $F_3(a_1, a_2, d) = -\frac{16\kappa h\lambda}{\mu B_0 \pi d^5}(2H + L_C) - \frac{4\kappa h\lambda}{\mu B_0 \pi d^5}(a_1 + a_2)$;;

$$F_2(a_1, a_2, d) = \ln\frac{4R}{a_1} + \frac{\beta h}{a_1}\ln\frac{\beta h}{\pi d} - \frac{2h}{a_2 B_0}\ln\frac{d}{2L}$$

$$m_1 = \frac{2\pi\kappa h\rho\Delta P}{\mu B_0}$$

Полученное выражение (13) позволяет определить значение дебита при заданных длинах горизонтальных стволов (a_1, a_2) и диметре скважин (d).

На практике при эксплуатации ГЦС, неизбежно существуют энергетические затраты. Это обусловлено тем, что часть получаемой тепловой энергии расходуется на закачку обратно в пласт отработанного теплоносителя. Эти энергии определяются следующими выражениями [4]:

$$W_{ПОЛ} = GC(T - T_{зу}), \qquad (14)$$

$$W_{НАГ} = G(\Delta P_H / \rho_H), \qquad (15)$$

где *Wпол* – полная энергия отбираемая потребителем (Qп), *Wнаг* – энергия затрачиваемая на закачку, *G* - массовый дебит скважины, кг/с; С – удельная теплоемкость термальной воды, Дж/кг•^{0}С; Т – температура добываемой термальной воды, ^{0}К; $T_{зу}$ – температура нагнетаемой в пласт воды, ^{0}К; $\Delta P_н$ – давление нагнетания, Па.

$$\Delta P_H = \Delta P_{TP} + \Delta P_{\Phi} - \Delta\rho g H$$

Следовательно полезная тепловая энергия будет равна:

$$W_П = W_{ПОЛ} - W_{НАГ} = G[C(T - T_{зу}) - (\Delta P_H / \rho_H)], \qquad (16)$$

Очевидно, что затраты энергии на закачку зависят от дебита, который в свою очередь зависит от диаметра скважины и протяженности горизонтального ствола в пласте.

С учетом поставленной выше задачи подставим (6) в (11) и получим следующее выражение:

$$W_П = G[C(((T_0 + HГ) + (T_{ЗУ} - (T_0 + H\cdot Г))\cdot e^{\frac{-\alpha_П\cdot t}{q}})\cdot (1 - e^{\frac{-q\cdot t}{V_К}}) + T_{ПЛ}\cdot e^{\frac{-q\cdot t}{V_К}} - T_{ЗУ}(t)) - (\Delta P_H / \rho_H)], \qquad (17)$$

Совместное решение уравнений (17) и (13) позволяет определить значение полезной тепловой энергии при заданных параметрах a_1, a_2, d и $T_{ЗУ}(t)$.

Вследствие увеличения протяженности скважин за счет удлинения ствола в продуктивном пласте, роста накладываемых на технологию проводки скважин ограничений, а также усложнения буровых и геофизических работ стоимость и продолжительность бурения горизонтальных скважин выше, чем у обычных скважин. Однако ввиду более значительного увеличения производительности скважин, бурение горизонтальных скважин экономически выгодно с точки зрения конечной цели строительства скважин. Экономическая эффективность при

горизонтальном вскрытии продуктивных пластов достигается за счет получения заданного уровня добычи при значительно меньшем числе скважин [1].

Выражение, описывающее удельные капитальные затраты в буровые работы, имеет следующий вид [1]:

$$F = \frac{10^{3,5d-0,5}(2(1-\alpha)S(H)+\alpha(S(H+a_1)+S(H+a_2)))}{G(N_m-\frac{\Delta P}{\rho_н})+G^2\frac{F_1 m_6}{\rho_н}}, \qquad (18)$$

где $S(x)=A_1x^2+A_2x$; A_1, A_2 – постоянные коэффициенты; α – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости горизонтального участка скважины ($\alpha=1,3-1,6$); $G(N_m-\frac{\Delta P}{\rho_н})+G^2\frac{F_1 m_6}{\rho_н}$ - значение полезной мощности ГеоЭС; $m_6=\frac{\mu B_0}{2\pi\kappa h\rho}$

Таблица 1. Результаты расчетов оптимальных параметров ГЦС для месторождения Кизляр при различных значениях $T_{зу}(t)$.

Тзу, °С	**d, м**	**a_1, м**	**a_2, м**	**G, кг/с**	**F, отн.ед./КВт**	**Wп, Вт**
($\kappa>\kappa_в$) $\kappa=5,4\cdot10^{-13}$; $\kappa_в=5,4\cdot10^{-14}$;						
30	0,1	73,8	81,3	19,2	1,84	737525
	0,15	25,8	51,8	22,6	2,52	758729
	0,2	21,5	49,6	22,9	3,73	760777
	0,25	20,0	48,6	22,9	5,57	761260
	0,3	19,1	47,8	23,0	8,33	761435
	0,35	18,4	47,2	23,0	12,45	761524
($\kappa>\kappa_в$) $\kappa=5,4\cdot10^{-13}$; $\kappa_в=1,08\cdot10^{-13}$;						
30	0,1	58,6	78,9	19,4	1,82	738442
	0,15	17,9	50,0	22,7	2,51	758510
	0,2	14,7	48,1	22,9	3,72	760581
	0,25	13,6	47,2	23,0	5,56	761075
	0,3	12,9	46,5	23,0	8,30	761257
	0,35	12,4	46,0	23,0	12,42	761351
($\kappa>\kappa_в$) $\kappa=5,4\cdot10^{-13}$; $\kappa_в=5,4\cdot10^{-14}$;						
40	0,1	66,2	78,0	19,0	3,27	552363
	0,15	23,0	55,1	22,2	4,46	569691
	0,2	19,3	53,4	22,5	6,62	571696
	0,25	18,0	52,4	22,6	9,87	572170
	0,3	17,2	51,7	22,6	14,75	572342
	0,35	16,5	51,1	22,6	22,05	572429
($\kappa>\kappa_в$) $\kappa=5,4\cdot10^{-13}$; $\kappa_в=1,08\cdot10^{-13}$;						
40	0,1	51,9	75,6	19,2	3,24	552890
	0,15	15,7	53,6	22,3	4,45	569548
	0,2	13,1	52,2	22,5	6,60	571574
	0,25	12,1	51,4	22,6	9,85	572056
	0,3	11,5	50,7	22,6	14,71	572232
	0,35	11,0	50,2	22,6	22,00	572323

Подставив в знаменатель выражения (18) вместо значения полезной мощности выражение (17), получим:

$$F = \frac{10^{3,5d-0,5}(2(1-\alpha)S(H)+\alpha(S(H+a_1)+S(H+a_2)))}{G[c(((T_0+H\Gamma)+(T_{3У}-(T_0+H\cdot\Gamma))\cdot e^{\frac{-\alpha_П\cdot t}{q}})\cdot (1-e^{\frac{-q\cdot t}{V_К}})+T_{ПЛ}\cdot e^{\frac{-q\cdot t}{V_К}}-T_{3У}(t))-(\Delta P_H/\rho_H)]}, \quad (19)$$

Минимизируя полученный функционал (19) в программной среде EXCEL, и воспользовавшись методом поиска решения, получим оптимальные значения a_1 и a_2 для месторождения Кизляр ($T_{ПЛ}$ = 111 ^oC, H = 2890 *м*, h = 26 *м*, $k=0{,}54\cdot10^{-12}$ $м^2$, $\Delta P=10^6$ *Па*) при заданных параметрах d и $T_{3У}$(t).

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением вертикальной проницаемости происходит уменьшение длин горизонтальных стволов a_1 и a_2. Дальнейшее увеличение диаметра скважины также приводит к уменьшению длин горизонтальных стволов, однако величина удельных капитальных затрат увеличивается. Это связанно с тем, что увеличение диаметра приводит к возрастанию затрат на строительство скважины. Также увеличение диаметра скважины влияет на такой параметр как полезная тепловая мощность, которая в свою очередь возрастает. Обусловлено это ростом дебита, так как увеличения диаметра приводят к росту пропускной способности скважины. Дальнейшее увеличение $T_{3У}$(t), как видно из таблицы 1, приводит к уменьшению всех параметров ГЦС. Также из таблицы 1 видно, что оптимальные длины горизонтальных стволов в нагнетательных скважинах больше чем в добычных скважинах. Связано это с уменьшением фильтрационных потерь давления в контуре ГЦС, которое вызвано увеличением зоны дренирования. Уменьшение потерь давления приводит к увеличению полезной мощности и снижению удельных капитальных затрат.

В заключении можно сказать, что использование ГЦС с горизонтальными скважинами является перспективным направлением использования геотермальной энергии, позволяющем получить экологически чистую и конкурентоспособную энергию.

Литература

1. *Джаватов Д.К.* Математическое моделирование геотермальных систем и проблемы повышения их эффективности. – Махачкала: Ин-т проблем геотермии ДНЦ РАН, 2007. – 248 с.
2. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.:Физматлит, 2008. – 376 с.
3. *Кумсков В.Т., Маханько М.Г.* Основы теплотехники. – М.:1962, 232 с.
4. Перспективы строительства ГеоТЭС на базе среднепотенциальных термальных вод // А.Б. Алхасов, Х.Г. Магомедбеков // Геотермия. Геотермальная энергетика: Сб. науч. тр., отв. редактор К. М. Магомедов. Махачкала, 1994, с. 17-35.

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ ПО ДАННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ

Павлова В.Ю.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Среди всех геотермальных месторождений Камчатки Мутновское изучено наиболее полно. Хотя здесь пробурено около сотни скважин, отбор керна происходил секционно (не более 1% от длины ствола), к тому же он отбирался в единичных скважинах. Высокие температуры не позволили проводить стандартные геофизические исследования в скважинах на всю их глубину, а интерпретация результатов была качественной, а не количественной, и к тому же направлена на выявление проницаемых зон в резервуаре. Кровля геотермального резервуара и вышележащие толщи пород особо не интересовала исследователей, т.к. значимые продуктивные зоны расположены лишь в резервуаре. Хотя проводились многочисленные геофизические исследования (магнитная и гравиметрическая съемка в масштабах 1:25000, аэрогеофизические исследования, сейсморазведка методом МОВЗ, магнитотеллурическое зондирование и т.д.), однако, детальная комплексная и количественная интерпретация геолого-геофизических данных для этого месторождения выполнена не была. Существенный прорыв в изучении месторождения произошел после повторения в последние годы работ по исследованию электрических полей на месторождении (Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И. и др.). Эти результаты позволили впервые построить трехмерную модель месторождения, однако разрешающая способность метода не дает возможности получить детальную характеристику строения кровли резервуара. Между тем рельеф и строения кровли существенно зависит от наличия или отсутствия зон дробления и тектонических разрывов, наличия зон перетока, рельефа поверхности и резервуара и т.д. Поэтому изучение строения кровли является одной из важнейших задач геологии геотермальных полей при разработке моделей геотермальных месторождений.

Актуальность темы определяется тем, что разработка геофизической модели кровли геотермального резервуара Мутновского месторождения парогидротерм позволит:

- уточнить геометрию и пространственное положение проницаемых зон и разрывных зон в приповерхностной части месторождения;
- определить соотношение поверхностных зон разгрузки термальных вод со строением более глубинных частей месторождения;
- выявить зоны фациальной изменчивости в трехмерном строении приповерхностной части месторождения;
- составить геолого-геофизическую модель кровли геотермального резервуара.

Научная новизна темы: построение геолого-геофизических моделей любого геотермального месторождения является одной из важнейших задач геологии геотермальных полей и геотермии.

Практическая значимость избранной темы: понимание строения кровли геотермального резервуара позволяет более эффективно осуществлять эксплуатацию содержащегося в нем теплоносителя.

УРАВНЕНИЕ КРИВОЙ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ В СМЕСЯХ ВОДА-АЛИФАТИЧЕСКИЙ СПИРТ

Базаев Э.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: emilbazaev@mail.ru

По экспериментальным значениям параметров фазовых переходов жидкость-газ и газ-жидкость в смесях вода-алифатический спирт (метанол, этанол, н-пропанол) рассчитана температурная зависимость плотности жидкой и газообразной фаз вдоль кривой равновесия (сосуществования жидкой и паровой фаз). Для описания зависимости плотности от температуры использованы скейлинговые уравнения. Установлено, что эти уравнения описывают экспериментальные значения плотности водных растворов алифатических спиртов на кривой сосуществования и в критической области с погрешностью 2-3 % при значении критического показателя β_0=0.365±0.002 и значениях коэффициента (амплитуды) B_0=(1.2–2.4)±0.01 в зависимости от концентрации спирта и числа атомов углерода.

Ключевые слова: кривая сосуществования, фазовые переходы, критические параметры, приведенные параметры, параметр порядка, критические показатели, амплитуда, скейлинговые уравнения

Алифатические спирты (метанол, этанол, н-пропанол) растворяются в воде при нормальных условиях в любых пропорциях, образуя гомогенные растворы. Экспериментальное исследование фазовых переходов в этих растворах показывает, что кривая сосуществования их во многих отношениях подобна кривой сосуществования индивидуального вещества [1,2]. На основании этого экспериментально подтвержденного факта термодинамического подобия кривых сосуществования индивидуальных веществ и растворов можно сделать важный вывод о том, что математические подходы для описания критического состояния однокомпонентной жидкости [3-7] могут быть применимы и к гомогенным двухкомпонентным жидким системам.

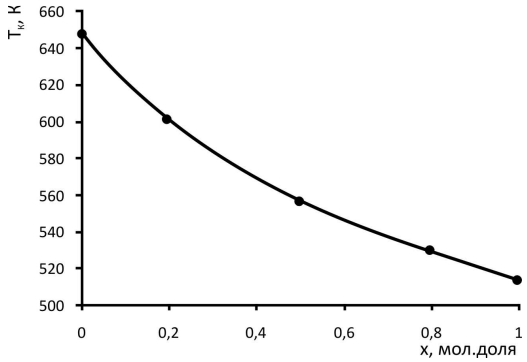


Рис.1. Зависимость критических значений температуры водных растворов этанола от состава (x–мольная доля спирта)

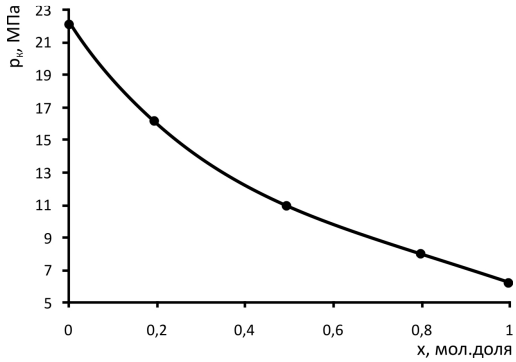


Рис.2. Зависимость критических значений давления водных растворов этанола от состава (x–мольная доля спирта)

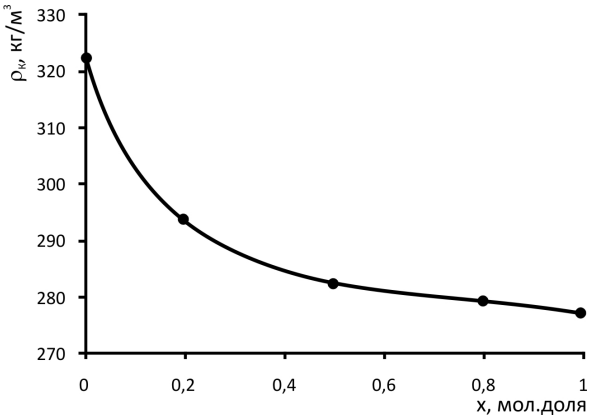


Рис.3. Зависимость критических значений плотности водных растворов этанола от состава (х–мольная доля спирта)

На рис.1-3 приведен характер зависимости критических значений температуры, давления и плотности водных растворов этанола от состава (х–мольная доля спирта). Аналогичный характер зависимости у других алифатических спиртов.

Как известно [3], температурную зависимость плотности жидкостей вдоль кривой сосуществования фаз в окрестности их критических точек описывают степенные функции с нецелочисленными показателями степени – критическими показателями:

$$\omega = B_i\,\tau^{\beta_i} \qquad (1)$$

здесь: $\tau = {(T_к - T)}/{T_к}$, – приведенное отклонение температуры от критического значения $T_к$; – приведенное отклонение плотности (жидкой $\rho_ж$ и паровой $\rho_п$ фаз соответственно) от критического значения $\rho_к$ (параметр порядка); $\beta_i = \beta_0, \beta_1, \beta_2, \ldots$ – критические показатели; $B_i = B_0, B_1, B_2, \ldots$ – коэффициенты (амплитуды).

Существует множество вариантов уравнения (1), отличающиеся выражениями для ω и числом членов разложения в его правой части, но с близкими значениями β_0 (0.3–0.5) для всех жидких систем [4-9]. Для определения величин β_i и B_i по уравнению (1) нужны надежные экспериментальные данные о критических параметрах веществ, в первую очередь о критической температуре, и температурной зависимости их плотности вдоль кривой существования в широкой области и вблизи критических точек.

Величины критических показателей, определенные разными экспериментальными методами и теоретическими моделями, немного отличаются между собой [4-9] и от результатов, предсказываемых флуктационной теорией фазовых переходов ФТФП [10].

В данной работе проверена концепция универсальности критических явлений на основе возможности описания зависимости плотности жидкой и газообразной фаз водных растворов алифатических спиртов вдоль кривой сосуществования в широкой температурной области и вблизи их критических точек степенными законами (скейлинговыми уравнениями) вида (1) по нашим экспериментальным значениям параметров фазовых переходов жидкость-газ и газ-жидкость [1,2].

Для описания экспериментальных данных вдоль кривой сосуществования в интервале температур 424,15–601,15 К и симметричной ее части (τ=0–0,01) нами использованы уравнения, предложенные авторами работы [4]:

$$\rho_{ж,г} = \rho_к\left(1 \pm B_0\tau^{\beta_0} + B_1\tau^{\beta_1} \pm B_2\tau^{\beta_2} + \cdots\right) \qquad (2)$$

$${(\rho_ж - \rho_г)}/{2\rho_к} = B_0\tau^{\beta_0} + B_2\tau^{\beta_2} + B_4\tau^{\beta_4} + \cdots. \qquad (3)$$

здесь: β_0 – определяет форму кривой сосуществования при приближении к критической температуре; β_i – учитывают отклонения формы кривой сосуществования от симметрии; B_i – коэффициенты (амплитуды).

При обработке экспериментальных данных по уравнениям (2,3) величину β_i меняли в интервале 0.3–0.5, а параметр B_i использовался как подгоночный. Предварительно уравнения (2,3) были проверены по воде. Они описывают адекватно экспериментальные данные воды при β_0=0,365 и B_0=2.653 с погрешностью менее 0.5%.

Погрешность расчета для растворов доходит до 2-3%, а для некоторых точек доходит до 5%. Видимо, это связанно с большой погрешностью определения критических параметров растворов, которая в свою очередь зависит от чистоты спиртов. Результаты расчета для растворов приведены в таблице 2 и представлены на рис. 4,5.

Таблица 2. Значения критических показателей и амплитуд уравнений (4) и (5) для растворов вода-алифатический спирт.

x, м.д. спирта	β_0±0,001	B_0±0,005	β_1	B_1	β_2	B_2
Вода-метанол 0.5	0,365	2,51	0,876	0,717	0,166	-0,251
Вода-метанол 0.8	0,365	2,47	0,876	0,706	0,166	-0,247
Вода-этанол 0.2	0,365	2,55	0,876	0,729	0,166	-0,255
Вода-этанол 0.5	0,365	2,50	0,876	0,714	0,166	-0,250
Вода-этанол 0.8	0,365	2,60	0,876	0,743	0,166	-0,260
Вода-пропанол 0.2	0,365	2,65	0,876	0,757	0,166	-0,265
Вода-пропанол 0.5	0,365	2,73	0,876	0,780	0,166	-0,273
Вода-пропанол 0.8	0,365	2,75	0,876	0,786	0,166	-0,275

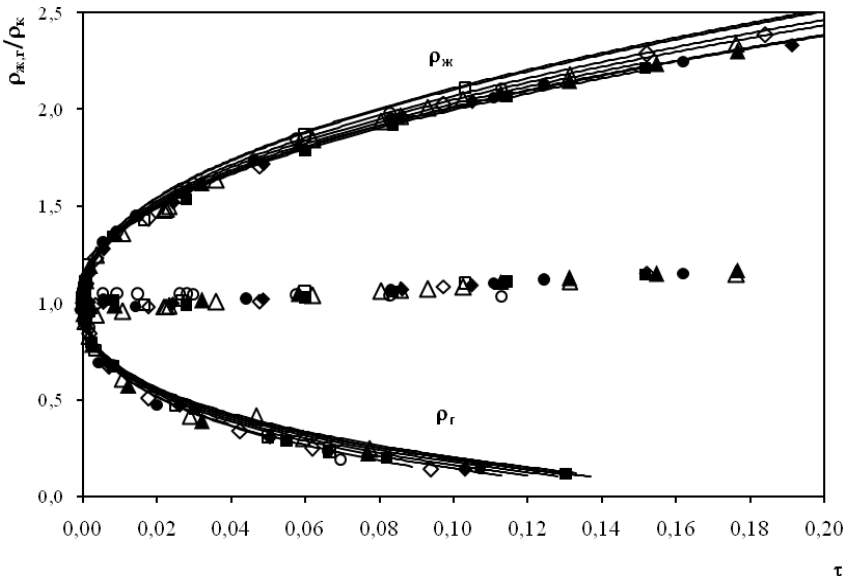


Рис.4. Температурные зависимости диаметра кривой сосуществования и плотности $\rho_{ж,г}/\rho_к$ растворов состава (мол.доли спирта): ◊–0,5, ♦–0,8 (метанола); □–0,2, Δ–0,5, ○–0,8 (этанола); ■–0,2, ▲–0,5, ●–0,8 (н-пропанола).

Зависимость приведенной плотности (параметра порядка) от приведенного отклонения давления при подходе к критической точке сверху вдоль критической изотермы описывает уравнение

$$\omega = A\pi^{1/\delta_0} \qquad (4)$$

при значении критического показателя δ_0=4±0,1 и значениях амплитуды A=0,7–0,9 в зависимости от числа атомов углерода и состава раствора.

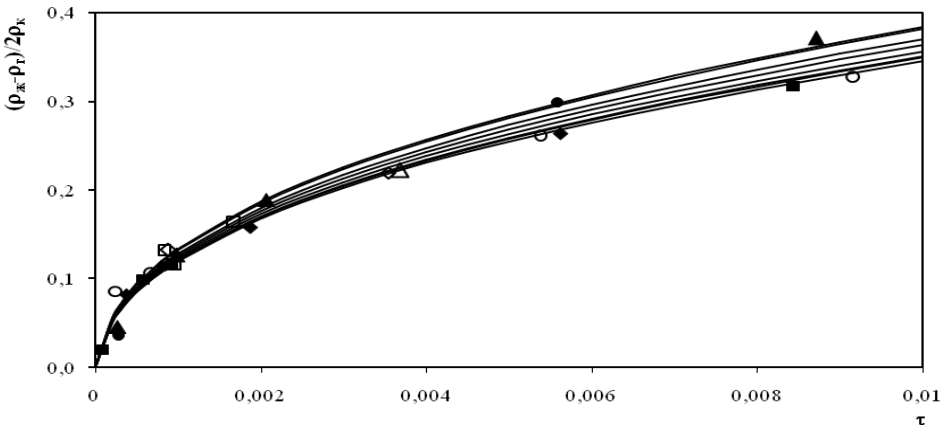


Рис.5. Температурные зависимости плотности $(\rho_ж - \rho_г)/2\rho_к$ растворов состава (мол.доли спирта): ◊–0,5, ♦–0,8 (метанола); □–0,2, Δ–0,5, ○–0,8 (этанола); ■–0,2, ▲–0,5, ●–0,8 (н-пропанола).

По найденным значениям β_0 и δ_0 можно рассчитать величины и остальных критических показателей для водных растворов алифатических спиртов по известным соотношениям между ними [9]:

$$\beta = 3\nu - \frac{\nu}{\xi} \qquad \gamma = \frac{2\nu}{\xi} - 3\nu$$
$$\delta = \frac{1}{3\xi - 1} \qquad \eta = 5 - \frac{2}{\xi} \qquad (5)$$
$$\alpha_t = 2 - 3\nu \qquad \alpha_\mu = {}^{2\xi}/_{\nu} - 3\xi \,.$$

Используя эти выражения и зная β и δ мы получили следующие значения остальных критических показателей:

$$\beta = 0.365 \qquad \gamma = \frac{2\nu}{\xi} - 3\nu = 1.095$$
$$\delta = 4.00 \qquad \eta = 5 - \frac{2}{\xi} = 0.2 \qquad (6)$$
$$\xi = \frac{1+\delta}{3\delta} = 0.42 \qquad \alpha_\mu = {}^{2\xi}/_{\nu} - 3\xi = 0.12$$
$$\nu = \frac{\beta\xi}{3\xi - 1} = 0.61 \qquad \alpha_t = 2 - 3\nu = 0.175$$

В табл. 3 приведено сравнение величин критических показателей, рассчитанных в данной работе, с литературными данными.

Таблица 3.

Источники	β	δ	ξ	ν	γ	η	α_μ	α_t
Данная работа	0.365	4.00	0.42	0.61	1.095	0.2	0.12	0.175
[4-6]	0.351							
[7]	0.32-0.33	4.8						
[8]	0.338	4.64	0.405	0.636	1.23	0.06	0.06	0.09
[9]	0.34-0.35	4.5						
[10]	0.325							

На основании экспериментально полученных значений критических показателей степенных зависимостей термодинамических свойств водных растворов алифатических спиртов вдоль кривой сосуществования фаз и в широкой окрестности критических точек можно заключить, что они удовлетворяют известным фундаментальным соотношениям ФТФП (5).

Литература:

1. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.* Экспериментальное исследование критического состояния водных растворов алифатических спиртов // ТВТ, Т.47. 2009. №2. С.215.
2. *Базаев Э.А., Базаев А.Р.* Значение критического показателя β скейлингового уравнения для систем вода–алифатический спирт // Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2010 г., С.132.
3. *Стенли Г.* Фазовые переходы и критические явления.–М. Мир.1973.419с.
4. *Шиманский Ю.И., Шиманская Е.Т.* Расширенное масштабное уравнение для параметра порядка бензола в области фазового равновесия жидкость-пар // ЖФХ, Т.70. 1996. №3. С.443.
5. *Шиманская Е.Т., Олейникова А.В., Шиманский Ю.И.* Форма кривой сосуществования вблизи критической точки неона и дейтерводорода // Физика низких температур, Т.16. 1990. №11. С.1377-1382.
6. *Шиманская Е.Т., Шиманский Ю.И., Олейникова А.В.* О критическом индексе β кривой сосуществования азота // ЖФХ, 1992. Т.66. №4. С.1054-1061.
7. *Анисимов М.А.* Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. –М.: Наука. 1987. -271 с.
8. *Alekhin A.D.* Critical indices for systems of different space dimensionality // Journal of Molecular Liquids. 2005. V.120. H.43-45.
9. *Новиков И.И.* О возможности построения единого уравнения состояния системы жидкость-газ на основе закономерностей теории критических явлений // Докл. АН СССР, Т.335. 1994. №3. С.308.
10. *Поташинский А.З., Покровский В.Л.* Флуктуационная теория фазовых переходов –М.: Наука, 2-е изд., перераб. 1982. -382 с.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА

Джапаров Т.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: Timur507@mail.ru

Исследовано термическое разложение алифатических спиртов (метанола, этанола, 1-пропанола и 1-бутанола) в статическом режиме методом пьезометра постоянного объема по росту давления в системе при постоянной температуре опыта в интервале температур 573.15 – 673.15 К. Оценена величина скорости термического разложения молекул спиртов по росту давления в единицу времени ($\Delta P/\Delta\tau$) в зависимости от температуры и давления в системе. Определен порядок реакции термического разложения для этилового спирта, вычислены оценочные значения кинетических параметров.

На современном этапе развития науки и техники двигатель внутреннего сгорания (ДВС) остается основным типом привода для большинства мобильных и стационарных установок. Но все более увеличивающийся парк ДВС требует и возрастания добычи и производства топлива. Поэтому необходимо изыскивать новые альтернативные топлива. Среди них большую значимость получили алифатические спирты. Высокие антидетонационные свойства алифатических спиртов в сочетании с возможностью их производства из не нефтяного сырья позволяют рассматривать этот продукт в качестве перспективного высокооктанового компонента автомобильных бензинов.[1]

В связи с этим изучение процесса термического разложения алифатических спиртов (метанола, этанола, 1-пропанола и 1-бутанола) является актуальной задачей. В литературе имеется ряд работ, связанных с исследованием кинетики термического разложения, а также приводятся возможные механизмы деструкции молекул спиртов, но практически все они выполнены в динамическом режиме на струевых установках и охватывают высокий диапазон температур (выше 700 К). [2-5].

Нами исследовано термическое разложение алифатических спиртов (метанола, этанола, 1-пропанола и 1-бутанола) в статическом режиме методом пьезометра постоянного объема по росту давления в системе при постоянной температуре опыта в интервале температур 573.15 – 673.15 К. Оценена величина скорости термического разложения молекул спиртов по росту давления в единицу времени ($\Delta P/\Delta\tau$) [6,7] в зависимости от температуры и давления. Определен порядок реакции термического разложения этилового спирта, вычислены оценочные значения кинетических параметров. Описание установки и методика проведения эксперимента приводятся в работе.[8]

В таблице 1 приводятся значения роста давления метанола и этанола в зависимости от времени для трех температур при постоянном количестве пробы (8 мл), а на рисунках 1 и 2 - графическая иллюстрация данных зависимостей.

В таблице 2 приведены значения скоростей термического разложения метилового и этилового спиртов как изменение давление по времени ($\Delta P/\Delta\tau$ – Па/сек) в зависимости от объема спирта и температуры опыта, на рисунках 3 и 4 - их графическая иллюстрация.

Таблица1. значения роста давления метанола и этанола в зависимости от времени для температур T= 603,15 К; 623,15 К; 643,15 К. V = const. (8 мл)

Время τ, мин	метанол		
	Температура, К		
	603,15	623,15	643,15
0	21,085	24,893	28,925
60	21,295	25,373	30,150
120	21,505	25,853	31,375
180	21,715	26,333	32,600
240	21,925	26,813	33,825
300	22,135	27,293	35,050
Время τ, мин	этанол		
0	16,682	19,487	22,350
60	16,797	19,787	23,120
120	16,912	20,087	23,890
180	17,027	20,387	24,660
240	17,142	20,687	25,430
300	17,257	20,987	26,200

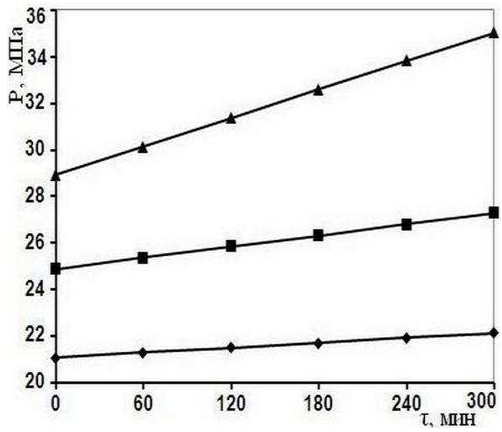


Рис.1. Зависимость роста давления метанола от времени для различных температур: 1- 643,15 К; 2 – 623,15 К; 3 -603,15 К.

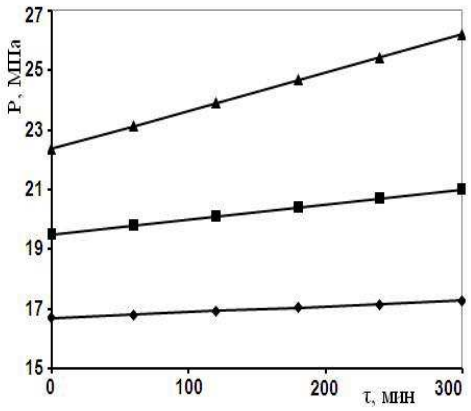


Рис.2. Зависимость роста давления этанола от времени для различных температур: 1- 643,15 К; 2 – 623,15 К; 3 - 603,15 К

Таблица 2. Значения скоростей термического разложения метилового и этилового спиртов как изменение давление по времени (ΔP/Δτ – Па/сек) в зависимости от объема спирта и температуры опыта.

Объем спирта, мл	Метанол				
	Температура, К				
	563,15	583,15	603,15	623,15	653,15
4	6,11	14,17	35,28	80,56	208,33
8	10,28	25,83	58,33	133,33	344,44
12	18,05	43,06	100,00	223,61	586,11
15	25,83	61,11	144,44	320,84	836,12
Объем спирта, мл	Этанол				
	Температура, К				
	563,15	583,15	603,15	623,15	653,15
4	3,05	7,78	19,44	50,00	130,56
8	4,72	12,50	31,94	83,33	213,89
12	7,22	20,83	51,86	133,33	347,22
15	10,00	30,56	72,22	191,67	488,89

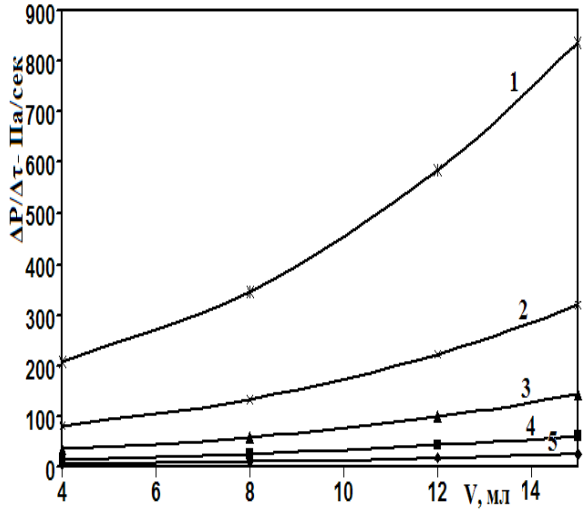


Рис.3. Зависимость скорости термического разложения молекул метанола от объема пробы для различных температур: 1- 643,15 К, 2 – 623,15 К, 3 – 603,15 К, 4 – 583,15 К, 5 – 563,15 К.

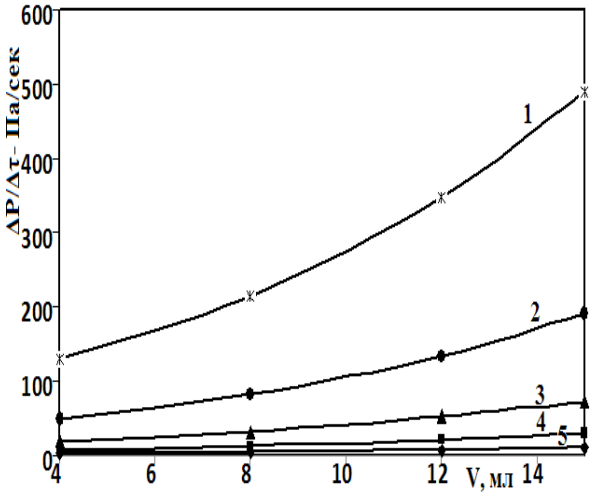


Рис.4. Зависимость скорости термического разложения молекул этанола от объема пробы для различных температур: 1- 643,15 К, 2 – 623,15 К, 3 – 603,15 К, 4 – 583,15 К, 5 – 563,15 К.

Таблица 3 и рис 5 иллюстрируют зависимость значений скоростей термического разложения спиртов (ΔP/Δτ – Па/сек) от температуры.

Темпер-ра, К	метанол	этанол	1-пропанол	1-бутанол
563,15	10,28	4,72	2,22	1,39
583,15	25,83	12,78	5,83	3,89
603,15	58,33	31,94	15,56	8,33
623,15	133,33	83,33	44,44	23,61
643,15	344,45	213,89	108,33	55,83

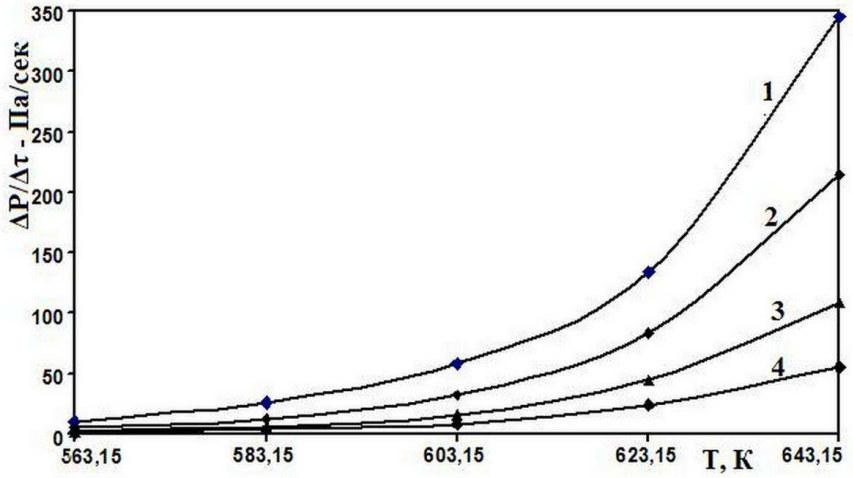


Рис 5.Зависимость значений скоростей термического разложения спиртов (ΔP/Δτ – Па/сек) от температуры. 1 – метанол, 2 – этанол, 3 – 1-пропанол, 4 – 1-бутанол.

Для определения порядка реакции термического разложения этилового спирта использовался способ подстановки, который состоит в том, что в интегральное кинетическое уравнение констант скоростей реакций первого, второго или третьего порядка подставляют опытные данные для концентрации реагирующих веществ, полученные в разные моменты времени протекания реакции.[9,10] Так как реакции разложения в основном относятся к реакциям

первого порядка, [11-13] мы воспользовались кинетическим уравнением константы скорости первого порядка.

$$k = \frac{1}{\tau}\ln\frac{c_0}{c_0 - x}.$$

Где k – константа скорости, C_0 – начальная концентрация вещества, C_0 - x – концентрация вещества в момент времени τ. Так как у нас в качестве изменяющегося параметра стоит давление, а не концентрация то мы имеем следующую формулу $k = \frac{1}{\tau}\ln\frac{p_0}{p_0 - x}$, где P_0 начальное давление вещества, P_0 - x –общее давление системы в момент времени τ.

Исходя из литературных данных основными продуктами термического разложения этилового спирта являются ацетальдегид (CH_3CHO) и водород (H_2) [14-16], а значит процесс термического распада молекулы этанола можно изобразить следующим образом.

$$CH_3CH_2OH = CH_3CHO + H_2$$

При τ = 0 общее давление будет зависеть только от молекул этанола, при τ>0 общее давление будет складываться из суммы оставшихся молекул этанола и новых, образовавшихся в результате реакции молекул ацетальдегида и водорода.

Пусть x – давление каждого из продуктов в момент времени τ, а P_0 – x – давление этанола в момент времени τ. Тогда общее давление системы будет равно.

$P = P_0 - x + x + x = P_0 + x$. Откуда $x = P - P_0$; $P_0 - x = 2P_0 + P$. Окончательно имеем следующую формулу. $k = \frac{1}{\tau}\ln\frac{p_0}{2p_0 + p}$

Используя значения роста давления по времени для температуры T=603,15 К, приведенных в таблице 1, найдем константу скорости.

$$k_1 = \frac{1}{60}\ln\frac{16.682}{2*16.682 + 16.797} = 1.15*10^{-4}\ мин^{-1}$$

В таблице 4 приведены значения k при различных значениях τ для разных температур.

Таблица 4. Значения k при различных значениях τ для разных температур

Время τ, мин	k (T= 603,12 K), мин$^{-1}$	k (T= 623,12 K), мин$^{-1}$	k (T= 643,12 K) мин$^{-1}$
60	1,15*10 $^{-4}$	2,67*10 $^{-4}$	5,87*10 $^{-4}$
120	1,16*10 $^{-4}$	2,68*10 $^{-4}$	6,02*10 $^{-4}$
180	1,16*10 $^{-4}$	2,67*10 $^{-4}$	6,03*10 $^{-4}$
240	1,16*10 $^{-4}$	2,67*10 $^{-4}$	6,10*10 $^{-4}$
300	1,17*10 $^{-4}$	2,67*10 $^{-4}$	6,33*10 $^{-4}$

Таким образом, среднее значение константы скорости для T= 603,15 К $k_{ср1}$= 1.16*10^{-4}, для T= 623,15 К $k_{ср2}$= 2.67*10^{-4}, для T= 643,15 К $k_{ср3}$= 6.07*10^{-4} . Постоянство константы скорости для одной температуры, подтверждает первый порядок реакции термического разложения этилового спирта. Зная константы

скорости для двух температур можно найти энергию активации данной реакции по формуле Аррениуса.

$$k = A * e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad \Rightarrow \quad E_a = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1}$$

По данной формуле было вычислено среднее значение энергии активации для реакции разложения этилового спирта, которое равно $E_{1,2}$ = 130,25 КДж/моль , $E_{2,3}$ = 136,82 КДж/моль, $E_{1,3}$ = 133,43 КДж/моль

$E_{ср} = E_{1,2} + E_{2,3} + E_{1,3}$

$E_{ср}$ = 133,5 КДж/моль

На рисунке 6 показана зависимость роста давления по времени термического разложения (кинетическая кривая) этилового спирта объемом 8 мл при температуре 673,15 К в течение 32 часов.

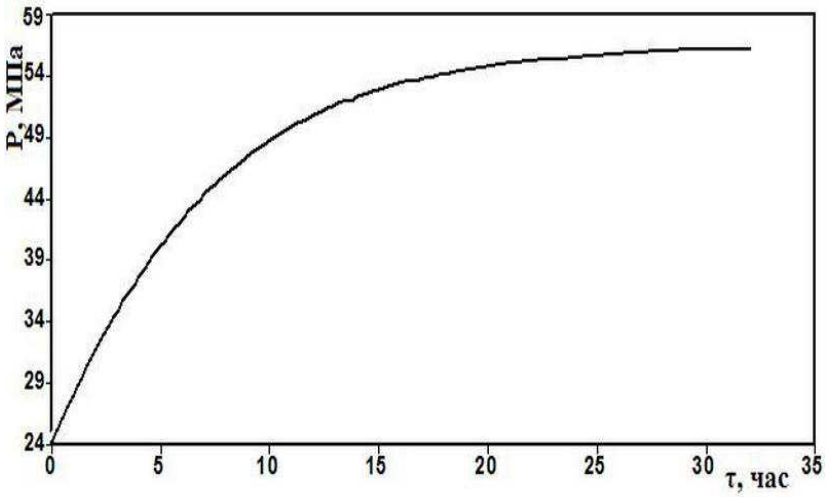


Рис.6. Зависимость роста давления по времени термического разложения (кинетическая кривая) этилового спирта объемом 8 мл при температуре 673,15 К

Выводы.

1. Скорость термического разложения алифатических спиртов увеличивается с ростом температуры.
2. Скорость термического разложения алифатических спиртов увеличивается с ростом объема (массы) спирта.
3. Скорость термического разложения алифатических спиртов уменьшается в гомологическом ряду от метанола к 1-бутанолу.
4. Реакция термического разложения этилового спирта относится к реакциям первого порядка.

Работа выполнена под научным руководством д.т.н. Базаева А.Р.

Литература:

1. *Д.Д. Матиевский, СП. Кулманаков.* Примение смесевых спиртовых топлив в дизелях автотракторного типа // http://aomai.secna.ru:8080/Books/Files/Vestn_2000_02/11/11.htm.
2. *D. Aronowitz. D. W. Naegeli. I.* Glassman Kinetics of the pyrolysis of methanol. J. Phys. Chem. 1977. V 81. № 25. P.2555

3. *Juan Li. Andrei Kazakov. Frederick L. Dryer.* Ethanol pyrolysis experiments in a variable pressure flow reactor. International Journal of Chemical Kinetics. 2001. V 33. № 12. P.859
4. *Juan Li. Andrei Kazakov. and Frederick L. Dryer.* Experimental and Numerical Studies of Ethanol Decomposition Reactions. J. Phys. Chem. A. 2004. V 108. № 38. p 7671
5. *Ku-We Lu, Hiroyuki Matsui*, Ching-Liang Huang, P. Raghunath, Niann-Shiah Wang* and M. C. Lin.* Shock Tube Study on the Thermal Decomposition of CH3OH. . Phys. Chem. A, 2010, 114 (17), p 5493/
6. *Waring C.E., Fekete A.J.* The kinetics of the thermal decomposition of 1,1,1-trifluoroacetone. J. Phys. Chem. V.74. №5. 1970. p.1007
7. *G. C. Straty. A.M.F. Palavra and T.J. Bruno.* PVT properties of methanol at temperatures to 300 ^{0}C //Int. Journal of Thermophysics.– 1986.– №5.– P.1077
8. *Т.А. Джаппаров, А.Р. Базаев.* Исследование скорости термического разложения алифатических спиртов. Вестник Дагестанского технического университета. № 1 (16). 2010. С.34.
9. *Н.М. Эмануэль, Д.Г.Кнорре.* Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. С. 463.
10. Сборник задач по химической кинетике / Н.А. Колпакова, С.В. Романенко, В.А. Колпаков. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 280 с.
11. *Ю.М. Жоров.* Кинетика промышленных органических реакций. М., 1989. С.384.
12. *WD Johnson.* Thermal decomposition of alcohols. I. 2-Methylbutan-2-ol (t-Pentyl alcohol). Australian Journal of Chemistry. V 27. № 5. p 1047.
13. *JL Garnett, WD Johnson and JE Sherwood.* Thermal decomposition of alcohols. III. 1-Methylcyclohexanol. Australian Journal of Chemistry . V 29.№3. p 589 .
14. *M.D. Vine and C.J. Wormald.* The enthalpy of ethanol. J. Chem. Thermodynamics. 1989. V 21. p 1151.
15. *J. Park, Z. F. Xu, and M. C. Lin.* Thermal decomposition of ethanol. II. A computational study of the kinetics and mechanism for the H+C2H5OH reaction. J. Chem. Phys. 2003. V 118., p 9990 .
16. *J.A. Barnard and W.D. Hughes.* The pyrolysis of ethanol Trans. Faraday Soc. 1960. V 56. p 55.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ АЛИФАТИЧЕСКИХ СПИРТОВ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ p,ρ,T,x – ЗАВИСИМОСТЯМ.

Карабекова Б.К.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: badji@mail.ru

Исследована возможность описания термодинамических свойств водных растворов алифатических спиртов (метанола, этанола, н-пропанола) в газообразном и сверхкритическом состояниях рядом уравнений состояния. Установлено, что из 14 исследованных уравнений с наименьшей погрешностью (до 2.8 %) описывает экспериментальные p,ρ,T,x – зависимости (x– мольная доля спирта) уравнение состояния в виде разложения фактора сжимаемости $Z = p/RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\rho_m^i / T^j$ в ряды по степеням плотности и температуры. Это уравнение использовано для определения термодинамических свойств смесей вода–спирт в сверхкритическом состоянии.

Величины термодинамических свойств определяются частными производными от давления по плотности при постоянной температуре, и по температуре при постоянной плотности. Это требует наличие точного термического уравнения состояния. Как известно, не существует единого уравнения состояния (УС) [1-2], которое описывало бы термодинамические свойства индивидуальных веществ и тем более растворов (смесей) во всей области параметров состояния. Получение такого уравнения является актуальной задачей статистической термодинамики. Локальные уравнения состояния веществ можно получить путем проведения p, ρ, T – измерений в соответствующем диапазоне параметров.

В данной работе исследована возможность описания экспериментальных данных о p,ρ,T,x – зависимостях (x– мольная доля) сверхкритических смесей вода–спирт (метанол, этанол, н-пропанол) [3,4] рядом уравнений состояния. Установлено, что из 14 исследованных уравнений [1-2,5] с наименьшей погрешностью (до 2.8 %) описывает экспериментальные p,ρ,T,x – зависимости сверхкритических смесей вода-спирт уравнение состояния в виде разложения фактора сжимаемости $Z = pV_m / RT = p/RT\rho_m$ в ряды по степеням плотности и температуры[5]:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\rho_m^i / T^j \qquad (1)$$

Уравнение (1) можно переписать в приведенных параметрах:

$$Z = p/RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i / \tau^j \quad \text{или} \quad p = RT\rho_m \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega^i / \tau^j\right), \qquad (2)$$

где $\omega = \rho/\rho_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$ – приведенная плотность и приведенная температура соответственно.

Коэффициенты уравнения (2) определенны нами усовершенствованным методом наименьших квадратов (МНК) предложенным авторами работы [6,7].

Согласно МНК, квадратичный функционал

$$S(\overline{A}) = \sum_{l=1}^{k}\left[z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega_l^i / \tau_l^j \right]^2, \qquad (3)$$

должен иметь минимальное значение. Из условия минимума функционала следует:

$$\frac{\partial S(\overline{A})}{\partial a_{fh}} = -2\sum_{l=1}^{k}\left[z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega_l^i / \tau_l^j \right]\cdot \omega_l^f / \tau_l^h = 0, \qquad (4)$$

где $f = 1..m,\ h = 1..n_f$.

Тогда получим систему $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)$ уравнений с $\sum_{i=1}^{m}(1+n_i)$ неизвестными:

$$\sum_{l=1}^{k}\left[z_l - 1 - \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\omega_l^i / \tau_l^j \right]\cdot \omega_l^f / \tau_l^h = 0. \qquad (5)$$

После преобразования (5) получаем:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{n_i} a_{ij}\sum_{l=1}^{k}\omega_l^{i+f} / \tau_l^{j+h} = \sum_{l=1}^{k}(z_l - 1)\omega_l^f / \tau_l^h, \qquad (6)$$

где $f = 1..m,\ h = 1..n_f$,

или же в матричном виде:

$$A \cdot L = M, \qquad (7)$$

где $A = \{a_{ij}\}$, $L = \left\{\sum_{l=1}^{k}\omega_l^{i+f} / \tau_l^{j+h}\right\}$ и $M = \left\{\sum_{l=1}^{k}(z_l - 1)\omega_l^f / \tau_l^h\right\}$.

Из (10) получаем:

$$A = L^{-1} \cdot M. \qquad (8)$$

В таблице 1 приведены максимальные относительные отклонения значений давления $\delta p = (p_{рас} - p_{эк})\cdot 100 / p_{эк}$, рассчитанных по уравнению (2), от экспериментальных.

Рис. 1 иллюстрирует зависимость относительных отклонений давления от плотности и температуры для системы вода-этанол состава 0.5 мол. доли.

Таблица 1.

Система	x, мол.доля	V_m, $см^3$/моль	T, K	δp, %
вода-метанол	0	30-1000	653.15-673.15	0.3
	0.2	52-90	613.15-623.15	0.5
	0.5	50-345	573.15-623.15	2.2
	0.8	50-335	543.15-623.15	2
	1	50-1000	513.15-619.15	0.6
вода-этанол	0.2	43-350	603.15-673.15	1
	0.5	55-577	563.15-673.15	2.7
	0.8	69-760	533.15-673.15	2.8
	1	107-500	523.15-643.15	3.7
вода–н-пропанол	0.2	42-750	603.15-623.15	0.8
	0.5	63-617	563.15-623.15	1
	0.8	81-1268	543.15-623.15	2.3
	1	120-600	537.15-623.15	1.2

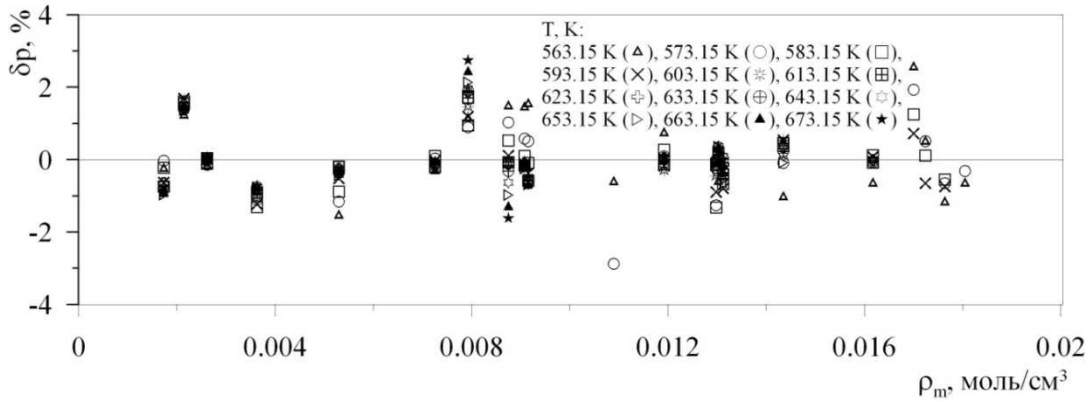


Рис.1 Относительное отклонение расчетных величин давления от экспериментальных для системы вода-этанол состава 0.5 мол. доли.

Основными термодинамическими свойствами являются:

Изотермические изменения теплоемкостей C_p и C_v, определяется формулами [8]:

$$C_v - C_{v0} = -\int_{\rho_0}^{\rho} T\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_\rho \frac{d\rho}{\rho^2};\quad C_p - C_{po} = C_v - C_{vo} + T\frac{(\partial p/\partial T)_\rho^2}{\rho^2(\partial p/\partial\rho)_T} - T\frac{(\partial p_o/\partial T)_{\rho o}^2}{\rho_o^2(\partial p_o/\partial\rho)_T}$$

На рис. 2 и 3 приведены изотермы зависимости изменений изохорной и изобарной теплоемкостей от плотности смеси вода–этанол состава x=0.5. Как видно, величина C_v увеличивается с ростом плотности и уменьшается с ростом температуры. В окрестности критической точки C_v претерпевает максимальное конечное изменение (увеличение). В отличие от C_v, величина изобарной теплоемкости C_p имеет максимумы в околокритической области, которые сглаживаются с ростом температуры.

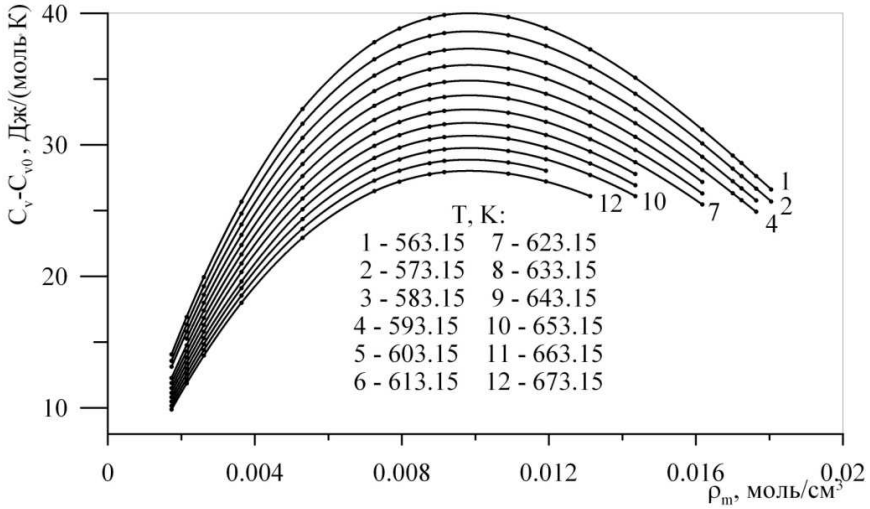


Рис.2. Изотермы зависимости изменения изохорной теплоемкости от плотности смеси вода–этанол состава x=0.5.

Величина изменения энергии Гельмгольца рассчитывается по формуле $F - F_0 = \int_0^{\rho} \frac{(p - RT\rho)}{\rho^2} d\rho + RT\ln\frac{\rho}{\rho_0}$ [8]. С ростом ρ_m и T ее значение увеличивается (рис.4.).

Величина изменения свободной энергии Гиббса определяется по формуле $S - S_0 = -\int_0^{\rho}\left[\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho - R\rho\right]\frac{d\rho}{\rho^2} - R\ln\frac{\rho}{\rho_0}$ [8]. Рис.5 показывает, что она

монотонно возрастает с ростом ρ_m и температуры.

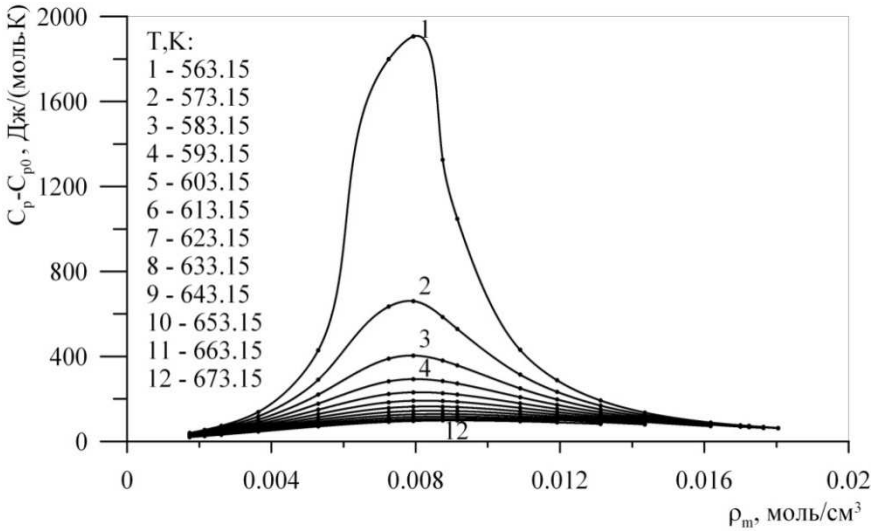


Рис.3. Изотермы зависимости изменения изобарной теплоемкости от р смеси вода–этанол состава x=0.5.

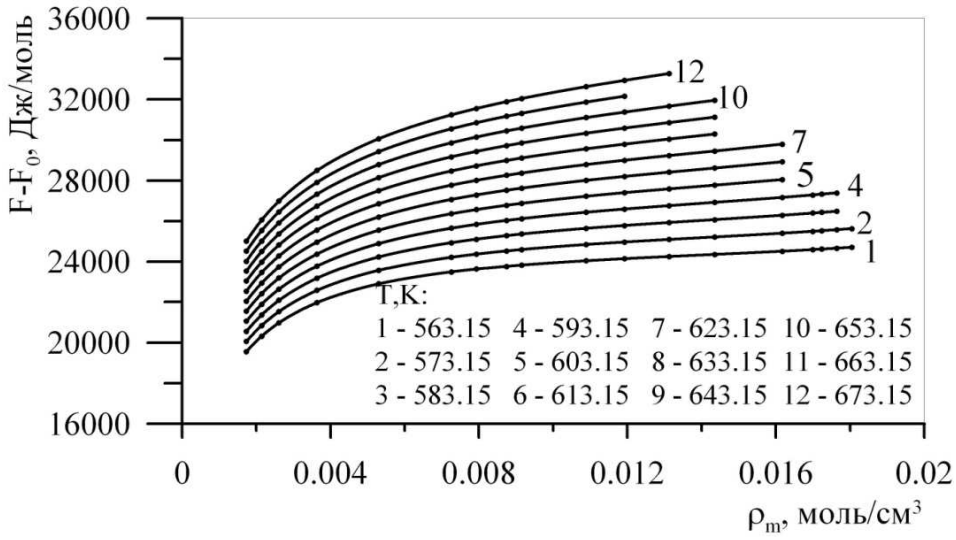


Рис.4. Изотермы зависимости изменения F от. ρ_m для системы вода-этанол состава x=0.5.

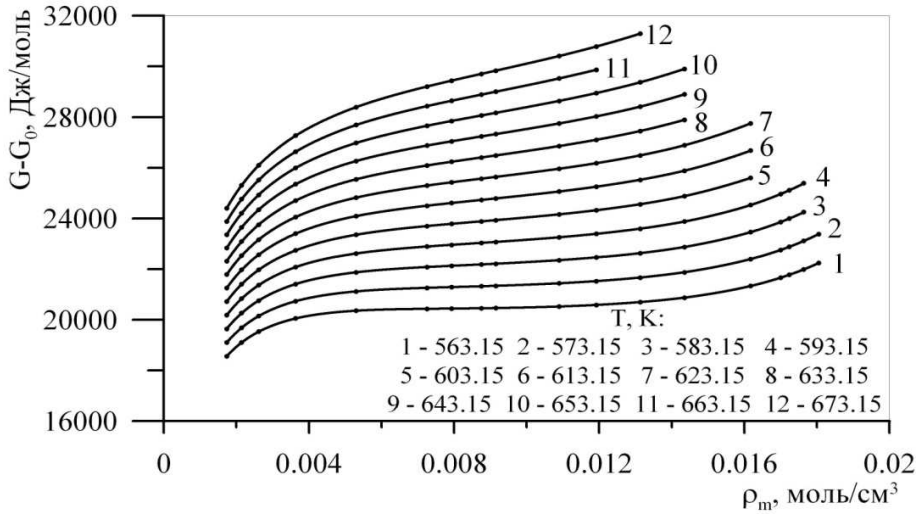


Рис.5 Изотермы зависимости изменения G от. ρ_m для системы вода-этанол состава x=0.5.

Величина изменение энтропии рассчитывается по формуле $S - S_0 = -\int_0^{\rho}\left[\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\rho} - R\rho\right]\frac{d\rho}{\rho^2} - R\ln\frac{\rho}{\rho_0}$ [8]. Как видно из рис.6 величина S уменьшается с ростом ρ_m и практически не зависит от температуры.

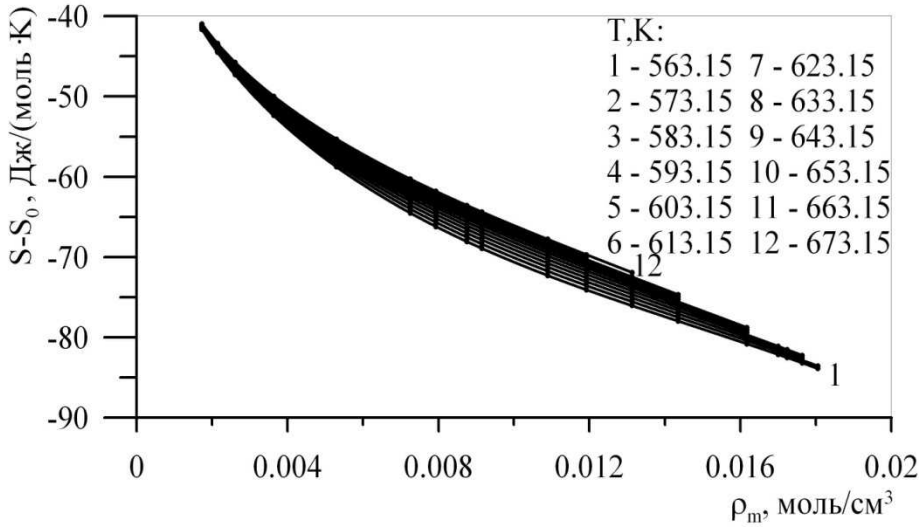


Рис.6. Изотермы зависимости изменения S от. ρ_m для системы вода-этанол состава x=0.5.

Величина изменения внутренней энергии описывается формулой $U - U_0 = F - F_0 + T(S - S_0)$ [8]. Величина U уменьшается с ростом ρ_m и незначительно зависит от температуры (рис.7).

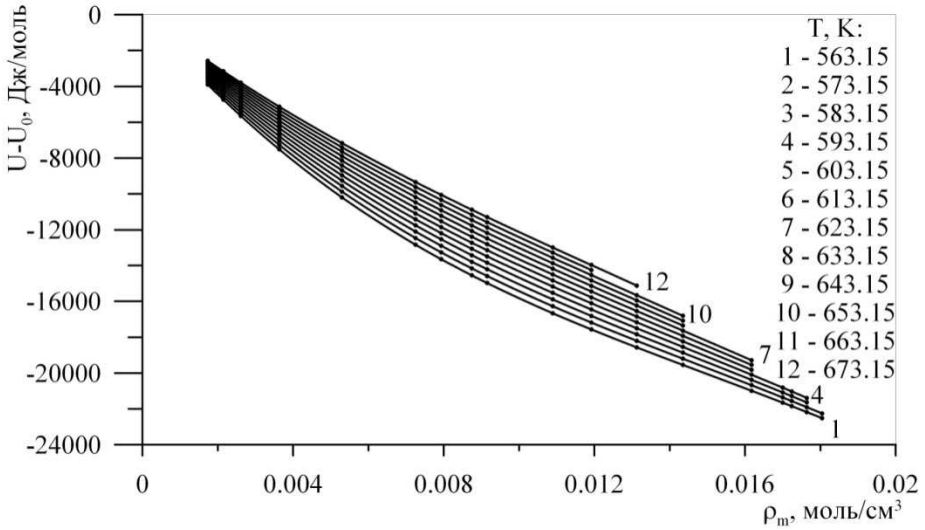


Рис.7. Изотермы зависимости изменения U от. ρ_m для системы вода-этанол состава x=0.5.

Величина изменения энтальпии $H - H_0 = F - F_0 + T(S - S_0) + RT(Z - 1)$ уменьшается с ростом ρ_m и T (рис.8).

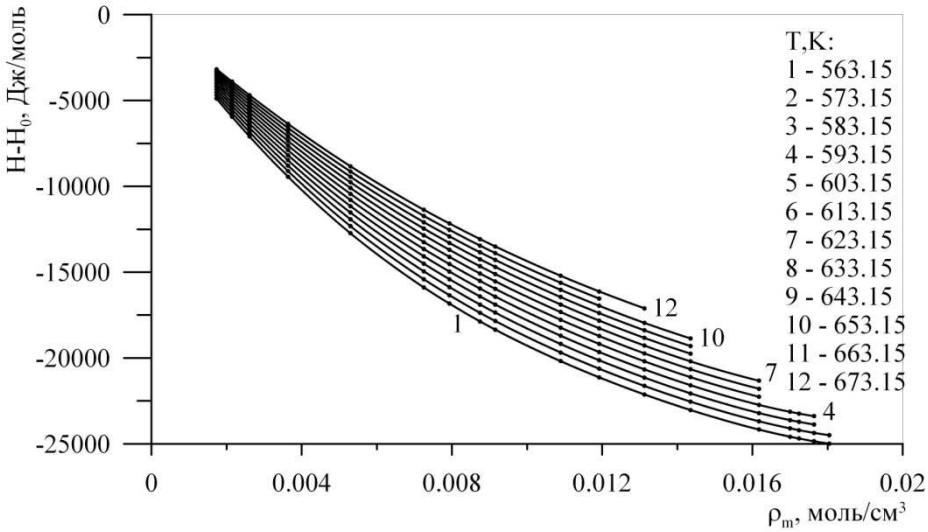


Рис.8. Изотермы зависимости изменения H от. ρ_m для системы вода-этанол состава x=0.5.

Работа выполнена под научным руководством д.т.н. Базаева А. Р.

Литература:

1. *Каплун А.Б., Мешалкин А.Б.* О термодинамическом обосновании формы единого уравнения состояния жидкости и газа // ТВТ. Т41. 2003. №3. – С. 378-380.
2. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч.1. М.: Мир. 1989. 304 с.
3. *Новиков И.И.* Уравнения состояния газов и жидкостей. М.: Наука. 1975. 264с.
4. *Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдурашидова А.А.* Экспериментальное исследование критического состояния водных растворов алифатических спиртов // ТВТ. 2009. Т.47. №2. С. 215-220.
5. *Базаев А.Р., Базаев Э.А.*. Термодинамические свойства бинарных смесей технологически важных веществ в околокритическом и сверхкритическом состоянии // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2010. Т.5. №3. С. 15-30.
6. *Сычев В.В., Вассерман А.А., и др.* Термодинамические свойства азота. М.: Изд-во стандартов, 1977. 352 с.
7. *Вукалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.* Методы построения уравнения состояния веществ по экспериментальным термодинамическим данным с применением электронно-вычислительных цифровых машин // ТВТ. 1967. Т.5. №2.
8. *Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. под. ред. Б.И.Соколова. Л.: Химия, 1982. 592 с.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ПАРАМЕТРАХ СОСТОЯНИЯ

Магомедов М.М-Ш

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а

Вязкость минерализованных вод изучена недостаточно при высоких давлениях. Крайне ограничен материал о динамической вязкости водно-солевых систем при давлениях выше 40 МПа. Отсутствует справочный материал о динамической вязкости водно-солевых систем при давлениях 40–100 МПа.

Экспериментальные исследования теплофизических свойств (теплопроводность, вязкость) жидкостей проводятся в устойчивой однофазной области. Для некоторых жидкостей приводятся данные на линии насыщения, которые получены расчётным путём. Анализ экспериментальных работ по динамической вязкости водных растворов солей при высоких давлениях, температурах и концентрациях показал, что имеются экспериментальные данные вблизи линии насыщения при давлениях 3, 5, 7, 10 МПа в интервалах температур 333–473 К, но нет расчётных данных на линии насыщения.

Установлено в работе [1] равенство одноимённых отношений теплофизических величин вблизи линии насыщения для воды и водных растворов солей при одинаковых параметрах – в условиях при 0,1 ≤ P ≤ 10 МПа, 333 ≤ T ≤ 473 К и 0 ≤ c ≤ 25 масс. %

$$\frac{\lambda(P\le 10,T)}{\lambda(Ps,T)}=\frac{\eta(P\le 10,T)}{\eta(Ps,T)}=\frac{\lambda(P\le 10,T,c\le 25)}{\lambda(Ps,T,c\le 25)}=\frac{\eta(P\le 10,T,c\le 25)}{\eta(Ps,T,c\le 25)} \qquad (1)$$

Численные значения одноимённых отношений теплофизических величин вблизи линии насыщения при одинаковых параметрах можно принять как равные (разброс составляет менее 0,4 %) – по теплопроводности для интервалов температур 274–473 К, а для вязкости для интервалов температур 333–473 К.

Таблица 1. Отношения одноимённых теплофизических величин вблизи линии насыщения

T К	$\frac{\lambda(P=10,T)}{\lambda(Ps,T)}$	$\frac{\eta(P=10,T)}{\eta(Ps,T)}$	$\frac{\lambda(P=10,T,c=20\%)}{\lambda(Ps,T,c=20\%)}$	$\frac{\eta(P=10,T,c=20\%)}{\eta(Ps,T,c=20\%)}$
273,15	1,007	0,987	1,007	0,987
293,15	1,008	0,996	1,008	0,996
313,15	1,008	1,001	1,008	1,001
333,15	1,008	1,005	1,008	1,005
353,15	1,008	1,007	1,008	1,007
373,15	1,009	1,009	1,009	1,009
393,15	1,009	1,011	1,009	1,011
413,15	1,010	1,012	1,010	1,012
433,15	1,011	1,013	1,011	1,013
453,15	1,012	1,014	1,012	1,015
473,15	1,013	1,015	1,013	1,016
523,15	1,012	1,016		
573,15	1,007	1,007		

Примечания:

1) В расчётах использованы данные по теплопроводности воды из [1];

2) Данные динамической вязкости воды вблизи линии насыщения и при P=10 МПа использованы – [4].

3) Данные теплопроводности системы NaCl + H2O вблизи линии насыщения и при P=10 МПа – [5].

4) Данные динамической вязкости системы KF + H2O вблизи линии насыщения и при P=10 МПа – [6].

Равенством (1) можно пользоваться при наличии достоверных данных о динамической вязкости водных растворов солей на изобарах $0{,}1 \le P \le 10$ МПа при температурах $333 \le T \le 473$ К и концентрациях $0 \le c \le 25$ масс. %, но с ростом давления и температуры и концентрации – равенство нарушается. Равенство позволяет получить значение вязкости водных растворов солей вблизи линии насыщения – при наличии экспериментальных данных вязкости при давлениях до10 МПа.

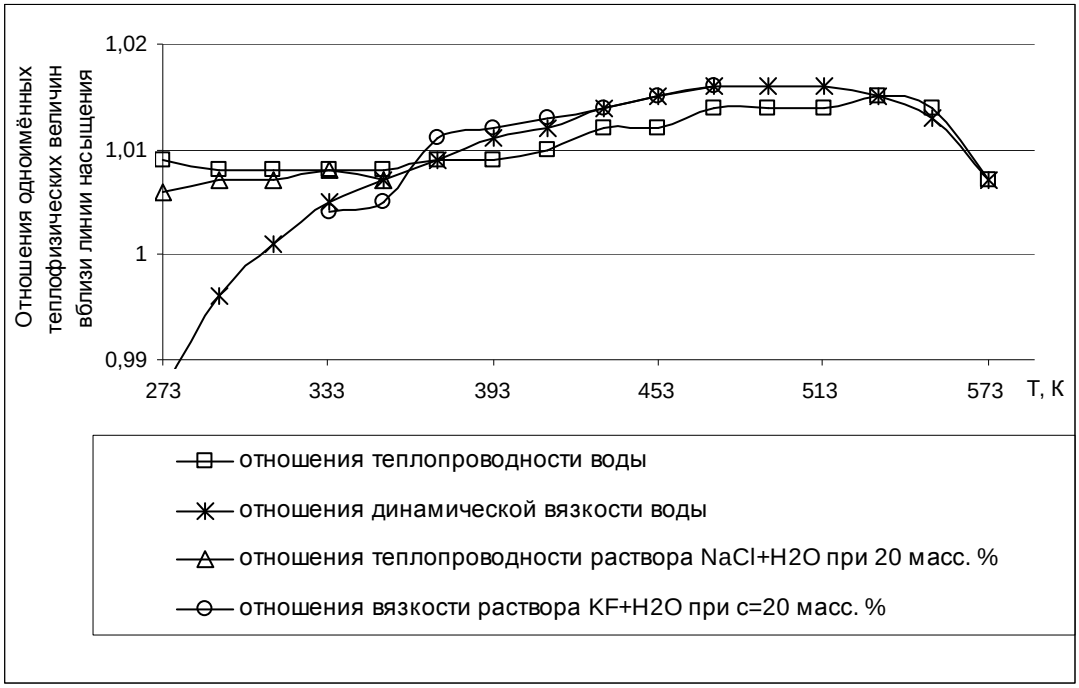


Рис. 1. Отношения одноимённых теплофизических величин – теплопроводности и вязкости воды и водных растворов солей.

Табл. 2. Значения отношений– $\frac{\lambda(P,T)}{\lambda(P_s,T)}$, $\frac{\eta(P,T)}{\eta(P_s,T)}$, $\frac{\lambda(P,T,c)}{\lambda(Ps,T,c)}$ и $\frac{\eta(P,T,c)}{\eta(P_s,T,c)}$ при различных параметрах состояния.

P МПа	$\frac{\lambda(P,T)}{\lambda(P_s,T)}$, [3]		$\frac{\eta(P,T)}{\eta(P_s,T)}$, [4]		$\frac{\lambda(P,T,c)}{\lambda(Ps,T,c)}$,[28]		$\frac{\eta(P,T,c)}{\eta(P_s,T,c)}$,[6]	
	T, К							
	333	473	333	473	333	473	333	473
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
10	1.008	1.012	1.008	1.014	1.006	1.011	1.006	1.014
20	1.015	1.024	1.012	1.134	1.008	1.021	1.013	1.028
40	1.027	1.050	1.025	1.067	1.018	1.043	1.026	1.054
60	1.041	1.075	1.039	1.100	1.028	1.057	1.036	1.075
100	1.067	1.116	1.067	1.160	1.043	1.087	1.058	1.120

На основе анализа данных плотности [6], вязкости [5] чистой воды и экспериментальных данных о динамической вязкости водных растворов солей

различных авторов [7–28] представлена новая обобщенная формула, с помощью которой можно получить значения вязкости (мкПа . с) водных растворов солей в интервалах температур 333–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 масс. % – при наличии данных вязкости вблизи линии насыщения. Формула имеет вид

$$\eta(P,T,c)=\eta(P_s,T,c)\left[\left(1{,}700\frac{\rho^{B}(P,T)}{\rho^{B}(P_s,T)}-0{,}7000\right)-2{,}500\times10^{-8}PTc\right]+1{,}600\times10^{-4}\frac{P^{Э}T^{Э}}{P_1T_1}, \qquad (2)$$

а для чистой воды (с = 0) формула (10) примет вид

$$\eta(P,T)=\eta(P_s,T)\left(1{,}700\,\frac{\rho(P,T)}{\rho(P_s,T)}-0{,}7000\right)+1{,}600\times10^{-4}\,\frac{PT}{P_1T_1}, \qquad (3)$$

где $\eta_{(P,T,c)}$ – коэффициент динамической вязкости раствора (мкПа . с) при давлении Р (МПа), температуре Т (К) и концентрации с (масс.) %, $c=\sum_{i=1}c_i\le 25$ масс. %, где сi –концентрация i-й системы; $\eta_{(P_s,T,c)}$ – вязкость раствора вблизи линии насыщения при Ps, Т и с, здесь Ps – давление на линии насыщения, которое в зависимости от температуры 333–473 К может быть таким $0{,}1\le P_s\le 2{,}0$ МПа.; $\rho_{(P,T)}$, $\eta_{(P,T)}$ –плотность и вязкость чистой воды при Р и Т; $\rho_{(P_s,T)}$, $\eta_{(P_s,T)}$ – плотность и вязкость воды вблизи линии насыщения при Ps и Т; Р1= 1 МПа; Т1 = 1 К; Верхние индексы в формулах означают: в– вода, э – электролит.

Таблица 3. Динамическая вязкость воды по формуле (3)

P	Динамическая вязкость воды, (мкПа · с) при *T*, К						
МПа	333,15	348,15	373,15	398,15	423,15	448,15	473,15
P_s	465,0	377,9	281,8	221,0	182,5	156,1	134,3
20	473,1	384,7	287,5	226,6	187,6	161,0	139,4
40	480,1	391,4	293,2	231,0	192,3	165,9	144,3
60	487,7	397,4	298,4	235,9	196,8	170,4	148,9
80	495,3	403,8	303,5	240,5	201,2	174,9	153,3
100	501,0	409,6	308,6	245,1	205,5	178,9	157,5
120		415,6	313,2	249,4	209,6	183,1	161,5
140		421,2	318,1	253,5	213,5	186,9	165,4
160		426,5	322,7	257,5	217,4	190,7	169,2
180		431,7	326,9	261,7	221,3	194,1	172,7
200		437,0	331,2	265,3	224,8	197,9	176,4
220		442,0	335,5	269,3	228,4	201,6	180,0
240		447,2	339,8	273,0	231,9	205,0	183,4
260		452,1	343,8	276,7	235,5	208,3	186,6
280		456,6	347,8	280,1	238,9	211,6	189,9
300		461,5	351,8	283,6	242,2	214,8	193,0
320		466,4	355,8	287,4	245,4	217,9	196,1
340		470,9	359,3	290,7	248,4	221,1	199,1
360		475,3	363,0	293,8	251,8	224,4	202,3
380		479,8	366,8	297,1	254,9	227,2	205,1
400		484,1	370,5	300,4	258,0	230,5	208,2

Примечания:

1) Расчётные значения динамической вязкости чистой воды по формуле (3) согласуются с промышленным стандартом 1999 г. [4] в интервалах температур 348–473 К и давлений 0,1–100 МПа в пределах 1 %, а в интервалах температур 348–473 К и давлений 100–300 МПа [5] в пределах 2%;

2) Значения вязкости при P › от 300 до 400 МПа – прогноз.

По обобщенной формуле (2) получены значения динамической вязкости различных водно-солевых систем в интервалах температур 333–473 К, давлений 0,1–100 МПа и концентраций 0–25 масс. %. Отклонение расчётных значений вязкости водно-солевых систем по формуле (2) от экспериментальных данных различных авторов [7–28] составило менее 1,5 %.

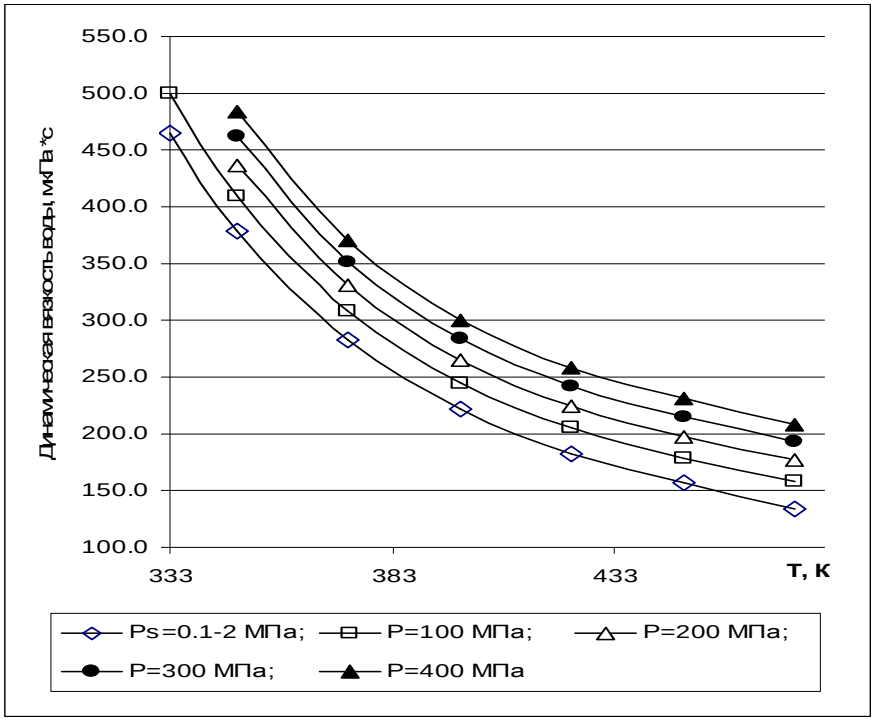


Рис. 2. Изобары динамической вязкости воды по формуле (3) при давлениях 0.1 – 100 МПа и температурах 333 – 473 К.

Таблица 4. Вязкость системы Ca(NO3)2 +H2O и H2O по формулам (2, 3).

T	*P*, МПа; Концентрация вещества, масс. %						
К	2	20	40	60	80	100	%
348.15	421.5	428.6	435.4	442.1	448.4	454.4	5 %
473.15	151.2	156.4	161.4	165.9	170.2	174.4	5 %
348.15	594.5	603.0	611.0	619.0	625.7	632.6	20 %
473.15	220.1	226.0	232.1	237.1	242.0	246.7	20 %
348.15	377.9	384.7	391.4	397.7	403.8	409.8	вода
473.15	134.4	139.4	144.3	148.9	153.3	157.5	вода

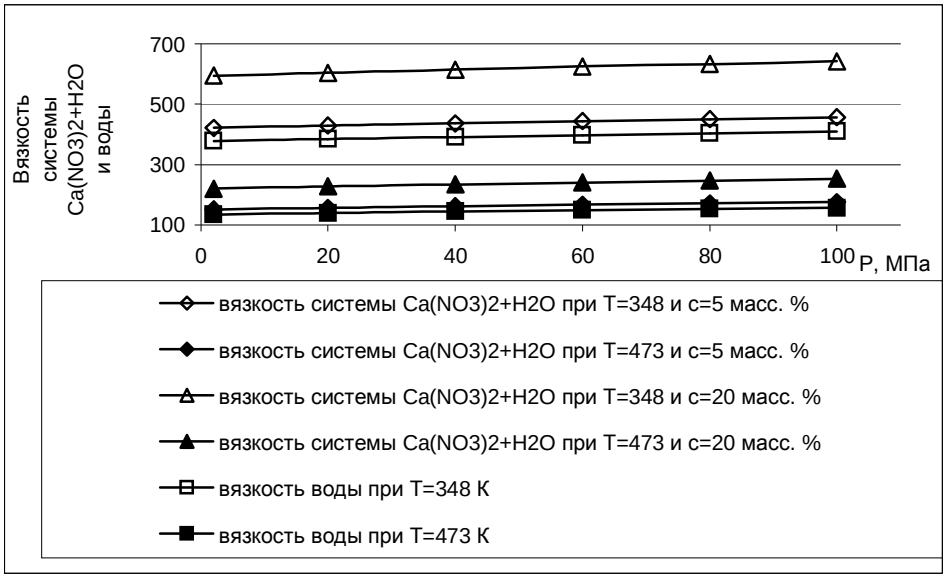


Рис. 3. Изотермы вязкости системы $Ca(NO_3)_2 + H_2O$ и H_2O.

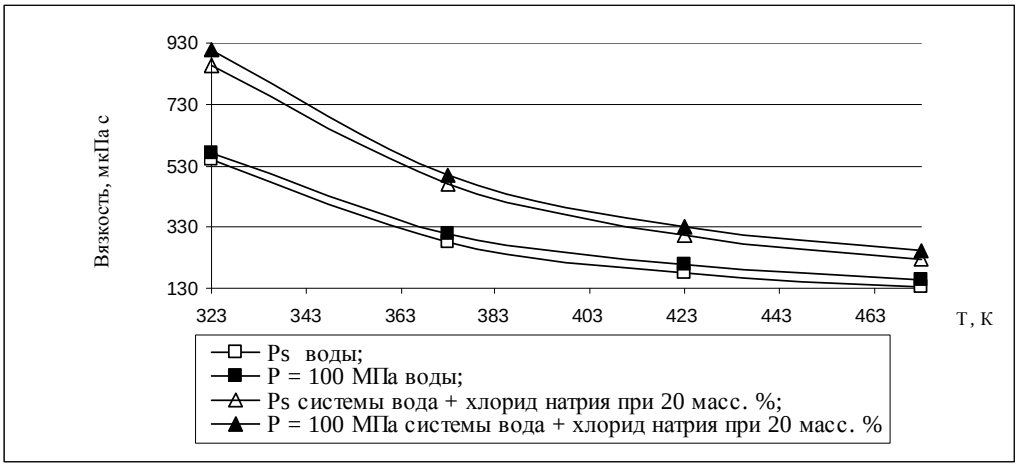


Рис. 4. Изобары вязкости системы H_2O+NaCl и воды по формулам (2) и (3).

Литература:

1. *Магомедов У. Б., Алхасов А.Б.* Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких температурах, давлениях и концентрациях // Инженерно–физический журнал. 2007. Том. **80,** № 6. С. 145–150.
2. *Magomedov U. B., Alkhasov A. B.* Journal Engineering Physics and Thermophysics. 2007. Vol. **80**, No. 6. Translated from Enginerno-Fizicheskii Zhurnal. Vol. 80, No. 6, pp. 145–150. November–December, 2007.
3. Международные таблицы и уравнения для теплопроводности воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1980. № 4. С. 70–74.
4. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Государственной Службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.
5. *Ахундов Т.С., Гусейнов А. Г., Ишханов Ю.Б., Ахундов Р.Т.* Вязкость водных растворов хлористого натрия // Изв. вузов. Нефть и газ. 1990. № 7. С. 65 –68.
6. *Гусейнов А. Г.***,** *Искендеров А. И.***,** *Таиров А.Д., Ахундов Р.Т.* Вязкость водных растворов фтористых натрия и калия // Изв. вузов. Нефть и газ. 1990. № 11.С. 63–65.

7. ВНИЦ МВ. Свойства материалов и веществ. Вода и водяной пар. Таблицы стандартных справочных данных. М.: Изд-во МЭИ. 1999. Вып. 1. 140 с.
8. Скелетная таблица удельного объема и энтальпии воды и водяного пара. Справочный материал // Теплоэнергетика. 1987. № 3. С.71– 77.
9. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of Electrolyte Solutions at Aqueous at High Temperatures and High Pressures. Viscosity B-coefficient. Sodium Iodide // Journal of Chemical Engineering Data. 2006. **51,** No. 5. Pp. 1645–1659.
10. *Abdulagatov I.M., Azizov N.D.* Viscosity of aqueous calcium chloride solutions at high temperatures and high pressures // Fluid Phase Equilibria. 2006. **240**. 204–219.
11. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of aqueous $Ni(NO_3)_2$ solutions at temperatures from (297 to 475) K and at pressures up to 30 MPa and concentration between (0.050 and 2.246) mol kg^{-1} // Journal of Chemical Thermodynamics. 2006. **38.** 179–189.
12. *Azizov N.D.* Bulk Properties of the Aqueous Solutions of Barium Chloride // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2003. **76,** No. 2. Pp. 450–455.
13. *Abdulagatov I.M., Azizov N.D.* Viscosity of aqueous LiI solutions at 293–523 K and 0.1–40 MPa // Thermochim. Asta. 2005. **439.** 8–20.
14. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of the aqueous Ca $(NO_3)_2$ solutions at temperatures 298 to 573 K and at pressures up to 40 MPa // J. Chem. Eng. Data. 2004. **49.** 1444–1450.
15. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Experimental viscosity B-coefficients of aqueous LiCl solutions. Jornal of Molecular Liquids. 2006.**126.** 75–88.
16. *Akmedova-Azizova L. A.* Thermal Conductivity and Viscosity of Aqueous $Mg(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$ and $Ba(NO_3)_2$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2006. **54**. 510–517, American Chemical Society.
17. *Abdulagatov I.M., Akmedova-Azizova L.A. and Azizov N.D.* Thermal Conductivity of Aqueous $Sr(NO_3)_2$ and $LiNO_3$ solutions at High Temperatures and High Pressures // J. Chem. Eng. Data. 2004. **49.** 688–703, American Chemical Society.
18. *Abdulagatov I.M., Zeinalova A.B. and Azizov N.D.* Viscosity of aqueous Na_2SO_4 solutions at temperatures from (298 to 573) K and at pressures up to 40 MPa // Fluid Phase Equilibria. 2005. **227**. 57–70.
19. *Зейналова А. Б., Искендеров А. И., Таиров А. Д., Ахундов Т. С.* Динамическая вязкость азотнокислого кальция // Изв. вузов. Нефть и газ. 1991. № 1. С. 53–54.
20. *Abdulagatov I. M. and Azizov N. D.* Viscosity for Aqueous Li_2SO_4 Solutions at Temperatures from 298 to 575 K and Pressures up to 30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 2003. Vol. **48**, No. 6. Pp. 1549–1556.
21. *Зейналова А. Б., Искендеров А. И., Ахундов Р. Т.* Динамическая вязкость водных растворов азотнокислого магния // Изв. вузов. Нефть и газ. 1990. № 11. С. 43–44.
22. *Ахундов Т.С., Искендеров А. И., Гусейнов А. Г.* Экспериментальное исследование динамической вязкости тройной системы $NaF+NaCl+H_2O$ при различных температурах и давлениях // Изв. вузов. Нефть и газ. 1991. № 8. С. 59–61.
23. *Ахундов Т.С., Зейналова А.Б., Таиров А. Д., Искендеров А.И.* Динамическая вязкость водных растворов азотнокислого стронция // Изв. вузов. Нефть и газ. 1991. № 2. С. 78–81.

24. *Kestin J., Khalifa H. E., Abe Y. et al.* Effect of Pressure on the Viscosity of Aqueous NaCl Solutions in the Temperature Range 20–150 ^{0}C // J. Chem. Eng. Data. 1978. Vol. **23**, No. 4. P. 328–336.
25. *Grimes C. E., Kestin J., and Khalifa H. E.* Viscosity of Aqueous KCl Solutions in the Temperature Range 25–150 ^{0}C and the Pressure Range 0–30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1979. Vol. **24**, No. 2. P. 121–126.
26. *Correla R. J. and Kestin J.* Viscosity and Density of Aqueous Na_2CO_3 and K_2CO_3 Solutions in the Temperature Range 20–90 ^{0}C and the Pressure Range 0–30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1980. Vol. **25**, No. 3. P. 201–206.
27. *Correla R. J. and Kestin J.* Viscosity and Density of Aqueous Na_2SO_4 and K_2SO_4 Solutions in the Temperature Range 20–90 ^{0}C and the Pressure Range 0–30 MPa // J. Chem. Eng. Data. 1981. Vol. **26**, No. 1. P. 43– 47.
28. *Элдаров В.С.* Теплопроводность водных растворов натриевых солей // Журнал физической химии. 1986. Т. **60**, № 3. С. 603–605.
29. *Магомедов У. Б., Магомедов М. М-Ш.* Динамическая вязкость обычной и тяжелой воды при высоких параметрах состояния / Научная конференция – Проблемы физики полупроводников и теплофизики. Baki * Elm, 2007 // Fizika. 2007. Cild XIII, № 1–2. С. 44–47.
30. *Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.* Вязкость высокоминерализованных вод при высоких температурах, давлениях и концентрациях / Материалы научно-практической конф. – Геология и нефтегазоностность Юга России. Выпуск № 52. Изд-во ООО «ДИНЭМ» Института геологии ДНЦ РАН. Махачкала, Россия. 2008. С. 185–189.
31. *Магомедов У.Б., Магомедов М. М-Ш.* Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких давлениях, температурах и концентрациях // Естественные и технические науки. 2009. № 4(42). С. 23–26.
32. *Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.* Вязкость воды и водных растворов солей // Естественные и технические науки. 2009. № 6(44). С. 59–63.
33. *Магомедов У.Б., Магомедов М.М-Ш.* Динамическая вязкость водных растворов неорганических веществ при высоких давлениях, температурах и концентрациях / Материалы научно-практической конференции – Ресурсы подземных вод Юга России и меры по их рациональному использованию, охране и воспроизводству. Труды Института геологии ДНЦ РАН. Выпуск № 55. 2009. С. 175–178.
34. *Алхасов А.Б., Магомедов М. М-Ш., Магомедов У.Б.* Динамическая вязкость водных растворов солей при высоких параметрах состояния // Естественные и технические науки. 2010. № 2(46). С. 104–107.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ НА МЕЖФАЗНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ

Максудова А.Г., Дадаев Д.Х.

Дагестанский государственный педагогический университет; Россия, г. Махачкала, пр. Гамидова, 17;
e-mail: dadaeff@mail.ru

До сих пор у исследователей нет ясного представления о влиянии различных факторов на межфазные явления и процессы контактного плавления (КП), в частности, нет достаточного экспериментального материала о влиянии малых примесей на КП в системах с химическим взаимодействием компонентов [1].

Теория поверхностных явлений дает метод, позволяющий предсказывать характер влияния примесей на поверхностные свойства рассматриваемой системы. Этот метод связан с расчетом обобщенных моментов атомов примеси и основного материала по теории Семенченко В.К [2]. Величину $m=eZ/r$ (1) зависящую от свойств окружающих ее молекул и от свойств самой молекулы, называют обобщенным моментом. Здесь e - заряд электрона, eZ - заряд иона, r-эффективный радиус иона.

Использование обобщенного момента позволяет расположить все ионы различных металлов в ряд, каждый последующий член которого является в энергетическом отношении более слабым, чем предыдущий.

Для химических элементов, представляющих для нас интерес, нами найдены эффективные ионные радиусы и вычислены их обобщенные моменты (табл.1).

Таблица 1. Эффективные радиусы и обобщенные моменты химических элементов

Химические элементы	Ионный радиус, Å	Обобщенный момент
Zn	2^+ - 0.83	$1{,}57\cdot10^{-2}$
Cd	2^+ - 0.99	$9{,}7\cdot10^{-2}$
In	3^+ - 0.92	$15{,}65\cdot10^{-2}$
Bi	5^+ - 0.74 3^+ - 1.2 3^- - 2.13	$32{,}43\cdot10^{-2}$ $12\cdot10^{-2}$ $6{,}76\cdot10^{-2}$
Pb	4^+ - 0.76 2^+ - 1.26	$25{,}26\cdot10^{-2}$ $7{,}62\cdot10^{-2}$
Te	6^+ - 0.56 4^+ - 0.89 2^- - 2.11	$51{,}43\cdot10^{-2}$ $21{,}57\cdot10^{-2}$ $4{,}55\cdot10^{-2}$
Sb	5^+ - 0.62 3^+ - 0.90 3^- - 2.08	$38{,}71\cdot10^{-2}$ $16\cdot10^{-2}$ $6{,}92\cdot10^{-2}$
Ga	3^+ - 0.62	$23{,}23\cdot10^{-2}$
Si	4^+ - 0.39	$49{,}23\cdot10^{-2}$
Al	3^+ - 0,57	$25{,}26\cdot10^{-2}$

Чтобы было удобнее, обобщенные моменты мы вычислим не в СИ, а в СГСЕ, поэтому $|e| = 4{,}8\cdot10^{-10}$ сгсе, 1 Å=10^{-8}см.

Из таблицы мы составили ряд, каждый последующий член которого является в энергетическом отношении более слабым, чем предыдущий. В данном ряду приведены значения $m \cdot 10^{-2}$.

$Te^{6+}{}_{51,43} > Si^{4+}{}_{49,23} > Sb^{5+}{}_{38,71} > Bi^{5+}{}_{32,43} > Al^{3+}{}_{25,26} > Pb^{4+}{}_{25,26} > Ga^{3+}{}_{23,23} > Te^{4+}{}_{21,57} > Sb^{3+}{}_{16} > In^{3+}{}_{15,65} > Bi^{3+}{}_{12} > Cd^{2+}{}_{9,7} > Pb^{2+}{}_{7,62} > Sb^{3-}{}_{6,92} > Bi^{3-}{}_{6,76} > Te^{2-}{}_{4,55} > Zn^{2+}{}_{1,57}$

Все элементы, стоящие справа от элемента-растворителя, являются поверхностно-активными, а слева поверхностно-инактивными. Поверхностно-активными являются более слабые молекулы, повышающие потенциальную энергию системы, т.е. уменьшающие ее абсолютное значение. По представлению Семенченко вероятность образования зародыша кристалла, содержащего молекулы поверхностно-активной добавки, будет меньше вероятности образования «чистого зародыша». Следовательно, поверхностно-активные добавки будут уменьшать число неравновесных зародышей, что и является причиной переохлаждения. Если обобщенные моменты атомов растворителя и атомов примеси близки по значению, то эта примесь не должна вызывать переохлаждения, т.к. она не может быть ни поверхностно-активной, ни инактивной, она является нейтральной.

Исходя из вышесказанного, мы нашли возможные пары ионов примесей и растворителя, которые вызывают переохлаждения в системе. Эти пары мы берем из ряда обобщенных моментов по следующим принципам. Некоторые элементы имеют несколько состояний ионизации. Выбирая пары ионов примеси и растворителя, мы подбирали химические элементы так, чтобы они были расположены ближе друг к другу в ряду, но при этом возникала сложность. Иногда ион примеси располагается между ионами растворителя, т.е. и справа и слева от него находятся ионы растворителя, и возникает вопрос, какой же выбрать. Мы подбирали ион того растворителя, относительно которого ион примеси являлся поверхностно-активным. Но эта сложность навела нас на мысль о том, что имея экспериментальные данные и ряд обобщенных моментов, в некоторых случаях можно предсказать состояние ионизации. Т.е. когда ион примеси расположен между ионами растворителя, и эта примесь вызывает в ходе эксперимента переохлаждение, то, значит, растворитель будет иметь знак того иона, который располагается левее в ряду.

Выбрав пары ионов, мы учитывали тот фактор, является ли данная примесь поверхностно-активной к данному растворителю, расположена ли она справа от иона растворителя; если да, то эта примесь должна вызывать переохлаждение при КП.

Рассмотрим наличие этого факта в системах, в которых экспериментально исследовано влияние примесей на процессы контактного плавления. Примеси составляли 1 весовой процент от веса растворителя.

В системе Bi-Te примеси In, Cd, Zn, Pb, введенные в Bi, способствовали протеканию КП с чистым Te при температурах 245, 165, 248, 245^0C, т. е. понижают температуру КП от 18 до 101 ^{0}C ниже наинизшей эвтектической температуры (266 ^{0}C).

При кристаллизации полученных жидких прослоек в рассматриваемой системе наблюдается переохлаждение жидкой фазы на 23, 17 и 145 ^{0}C.

В системе Bi-Te примеси In, Pb, Si, введенные в Te, способствуют протеканию КП с чистым Bi при температурах 269, 270^0, 271 ^{0} т. е. повышают температуру КП на 3 и 4 ^{0}C относительно наинизшей эвтектической температуры

(266 ^{0}C). При кристаллизации полученных жидких прослоек наблюдается переохлаждение жидкости на 6, 10, 11^0 [3].

Из расчета обобщенных моментов атомов примесей и атомов растворителей видно, что примесь Pb, введенная в Bi и Te дают по две пары ионов: (Bi^{5+},Pb^{4+}), (Bi^{3+}, Pb^{2+}) и (Te^{6+}, Pb^{4+}), (Te^{4+}, Pb^{2+}). Мы предполагаем, что наиболее вероятными здесь являются пары с меньшими ионными зарядами ((Bi^{3+}, Pb^{2+}) и (Te^{4+},Pb^{2+})), т.к. у этих пар поверхностная активность меньше, следовательно, уменьшается число зародышей, что замедляет процесс кристаллизации. Это и является основной причиной переохлаждения.

В системе In-Pb примесь Bi, введенная в In, снижает температуру КП до 150^{0}C, $T_{крист}$ = 146^{0}C, наблюдается переохлаждение 8 градусов. При введении примеси Sb в In протекание КП не наблюдается [3].

В данной системе примесь Bi в Pb дает две возможные пары (Pb^{4+},Bi^{3+}) и (Pb^{2+},Bi^{3-}). Мы предполагаем, что наиболее вероятной является пара с меньшими ионными зарядами (Pb^{2+},Bi^{3-}).

В системе Sb-Te примеси In и Bi, введенные в Sb не вызывают переохлаждения. Это видно из ряда обобщенных моментов, их значения практически одинаковы для этих элементов:

а) для Bi и Sb имеем m_{Bi}=6,76 и m_{Sb}=6,92;

б) для In и Sb имеем m_{In}=15,65 и m_{Sb}=16.

По гипотезе Семенченко переохлаждение в этих парах не должно наблюдаться, что подтверждается экспериментом.

В системе Sb-Te примеси Pb, Zn, In, Bi и Cd, введенные в образец Te, способствуют протеканию КП с чистым Sb при температурах 410, 412, 412, 408 и 409 ^{0}C соответственно, т. е. понижают температуру КП от 12 до 16 ^{0}C ниже наинизшей эвтектической температуры [4].

Примеси Pb и Bi и в Sb и в Te дают по две пары: ((Sb^{5+},Pb^{4+}), (Sb^{3+},Pb^{2+})), ((Sb^{5+},Bi^{5+}), (Sb^{3+},Bi^{3+})) и ((Te^{6+},Pb^{4+}), (Te^{4+},Pb^{2+})), ((Te^{6+},Pb^{4+}), (Te^{4+},Pb^{3-})). По нашей теории наиболее вероятными являются пары с меньшими ионными зарядами.

Возможными причинами влияния легирующих элементов на параметры КП могут быть изменение поверхностных свойств компонентов в зависимости от характера распределения примесей и их эволюции в процессе термообработки, понижение поверхностной энергии. Примеси поверхностно активных компонентов, адсорбируясь на границах зерен, могут существенно влиять на фазовое состояние и свойства легированного поликристалла.

Таблица 2.

Примеси	Растворители				
	Bi	Te	Sb	In	Pb
Pb	(Bi^{5+},Pb^{4+}) (Bi^{3+},Pb^{2+})	(Te^{6+},Pb^{4+}) (Te^{4+},Pb^{2+})	(Sb^{5+},Pb^{4+}) (Sb^{3+},Pb^{2+})	-	-
Zn	(Bi^{3-},Zn^{2+})	(Te^{2-},Zn^{2+})	(Sb^{3-},Zn^{2+})	-	-
In	(Bi^{5+},In^{4+})	(Te^{4+},In^{3+})	0^0	-	-
Cd	(Bi^{3+},Cd^{2+})	(Te^{4+},Cd^{2+})	(Sb^{3+},Cd^{2+})	-	-
Si	-	(Te^{6+},Si^{4+})	-	-	-
Bi	-	(Te^{6+},Bi^{5+}) (Te^{4+},Bi^{3-})	0^0	(In^{3+},Bi^{3+})	(Pb^{4+},Bi^{3+}) (Pb^{2+},Bi^{3-})
Sb	-	-	-	-	-

Изучив экспериментальные данные по влиянию различных легирующих элементов на процессы КП, мы пришли к выводу, что теоретический расчет обобщенных моментов атомов примесей и атомов растворителей позволяет предсказать возможное наличие переохлаждения в системе двух веществ при КП.

В таблице 2 дается разработка пар примесей и растворителей, дающих переохлаждение в системах.

Литература:

1. *Залкин В.М.* Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. - М.:Металлургия, 1987.- 152 с.
2. *Семенченко В.К.* Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.:Гостехиздат, 1957.- 491 с.
3. *Нажмудинов А.М.* Влияние постоянного электрического тока и примесей на процессы контактного плавления в системах висмут-теллур и индий- свинец : Дисс. Канд. физ.- мат. наук., Махачкала, 2004.- 154 с.
4. *Дадаев Д.Х.* Особенности контактного плавления в системах сурьма-теллур и свинец-теллур: Дисс. канд. Физ.-мат. наук., Махачкала 2009.- 163 с.

АККУМУЛЯТОРЫ ТЕПЛА С ФАЗОПЕРЕХОДНО-ТЕПЛОЕМКОСТНЫМИ ТЕПЛОНАКОПИТЕЛЯМИ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Ильясов Д.М.[1], Дибиров Я.А.[2]

[1] МОУ лицей №8, Махачкала, Россия; 367015, Махачкала, ул. Аскерханова 12а.
[2] Филиал объединенного института высоких температур РАН, Махачкала, Россия; 367030, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75, e-mail: jakhya@yandex.ru

Актуальность. Шагнув в третье тысячелетие, человечество и ныне продолжает искать пути решения энергетических проблем, ибо энергетика является главным сектором экономики современного общества, определяющим уровень развития любой страны.

Одним из приоритетов современной мировой энергетической политики является развитие энергосберегающих и экологически чистых технологий, основанных на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), основанных на неисчерпаемых источниках энергии планетарного и космического характера и обеспечение сохранности экосистемы планеты.

В настоящее время мировое потребление энергии превысило 500 ЭДж/год (Э (экса) – кратная единица, равная 10^{18}). По различным прогнозам к 2035 г. энергопотребление возрастет более чем в полтора раза, в первую очередь, за счет развивающихся стран . Органические топлива будут продолжать превалировать в мировом энергетическом балансе, вклад в него которых в 2035 г. составит около 86% (в 2007 г. этот вклад составил 94%) [1].

Альтернативой сложившейся структуре используемых первичных источников энергии могут служить ВИЭ. Во многих странах приняты амбициозные планы добиться к 2020 году доли ВИЭ в энергобалансах на уровне 15 ÷ 20% и выше, а в Евросоюзе к 2040 году – до 40%. Распоряжением Правительства РФ от 8 января 2009 года за № 1-р в России к 2020 году планируется достичь вклада ВИЭ в производство электроэнергии на уровне 4,5% [2].

Главными преимуществами ВИЭ, определяющими интерес к ним, являются:

- *неисчерпаемость или возобновляемость*, на которой может основываться устойчивое развитие энергетики;
- *экологическая чистота* (использование ВИЭ в подавляющем большинстве случаев не сопровождается ни химическим, ни тепловым загрязнением);
- *доступность*, наличие того или иного ВИЭ практически в любом регионе земного шара, что существенно для энергетической безопасности страны.

Наряду с этим различные ВИЭ обладают ***существенными недостатками***:

- *малая плотность потока энергии* в расчете на единицу площади или объема, определяющая большие габариты, а значит, и стоимость устройств, воспринимающих и преобразующих эту энергию;
- *непостоянство поступления энергии во времени*.

Вовлечение ВИЭ в энергетический баланс определяется конкуренцией перечисленных достоинств и недостатков. Решающим аргументом в пользу ВИЭ является их социальная значимость.

Кроме того, отметим сложившиеся в энергетике России существенные отличия от других развитых стран:

- централизованные системы энергоснабжения охватывают менее 1/3 ее территории, где проживают около 21 млн человек, а тарифы на топливо и энергию наиболее высокие (более 25 руб/кВт·ч));
- более 50% регионов страны энергодефицитны и нуждаются в завозе топлива;
- газифицировано 50 % населенных пунктов (в сельской местности – менее 35%) [1].

Для систем теплоснабжения в России также сложились свои особенности. Продолжительность отопительного периода колеблется от 22 -25 недель на юге страны до 40 - 45 недель на севере. В балансе конечного энергопотребления потребление тепла составляет наибольшую долю (31%), причем более 60% конечного тепла используется в жилищно-коммунальном секторе. Производство тепловой энергии в стране в 2008 г. составило 8110 ГДж в год, из которых более 70% относится к централизованным источникам и около 30% - к децентрализованным (малые котельные, автономные источники). Около 50% объектов коммунального теплоснабжения и инженерных сетей требуют замены. На каждые 100 км тепловых сетей ежегодно регистрируется в среднем 70 повреждений. Потери в тепловых сетях в ряде случаев достигают 30%, а с утечками теплоносителя ежегодно теряются более 0,25 км^3 воды [3].

Из вышесказанного следует, что будущее систем отопления и горячего водоснабжения всех потребителей, включая объектов во всех городах, за локальными (автономными) источниками, не требующих протяженных инженерных сетей с максимальным привлечением ВИЭ.

Для сглаживания недостатков ВИЭ, особенно при их использовании в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения, необходимы аккумуляторы тепла. Тепловое аккумулирование является неотъемлемой частью стабилизации рабочего режима тепловых сетей, позволяющей регулировать неравномерность, как поступления энергии, так и её потребления.

Тепловое аккумулирование. Технология аккумулирования тепла можно подразделить на следующие виды: физическое тепло за счет теплоемкости материала, тепло обратимых фазовых превращений и тепло обратимых химических реакций. Эти виды различаются по качеству запасаемого тепла в единице объема и объему аккумулирующего материала, по времени накопления тепла в среде и ее температуре. В настоящее время практическое применение нашли в основном аккумуляторы тепла двух видов: за счет теплоемкости материала и тепла обратимых фазовых превращений.

Теплоемкостное аккумулирование сопровождается изменением температуры аккумулирующего материала, технология его достаточно успешно отработана. Его основной недостаток – это воспроизводство тепла на более низком температурном уровне и низкая плотность запасенного тепла.

Самым интенсивно разрабатываемым способом аккумулирования энергии является тепловое аккумулирование с использованием скрытой теплоты фазового перехода «твердое тело - жидкость» неорганических и органических соединений, их эвтектических композиций. Эффективность этого способа обусловлена тем, что аккумуляторы тепла на основе фазового перехода по сравнению с традиционными теплоемкостными аккумуляторами обладают более высокой плотностью аккумулируемой энергии и постоянной температурой зарядки (разрядки).

Наиболее востребованными в практическом использовании являются аккумуляторы фазового перехода в сочетании с частичным аккумулированием физического тепла (фазопереходно-теплоемкостные аккумуляторы), в которых

учитываются и тепло фазового перехода ($\Delta H_{ф.п.}$), и тепло за счет теплоемкости материала при охлаждении его от температуры фазового перехода до заданной температуры T_1. Теплота, запасаемая любым материалом при переходе его от температуры T_2 до температуры T_1 (при постоянном давлении), определяется изменением энтальпии (H^o_{T2} - H^o_{T1}). Значения высокотемпературных составляющих энтальпий (H^o_T - H^o_{298}) приводятся в справочных таблицах термодинамических функций индивидуальных веществ.

Теплота, запасаемая фазопереходно-теплоемкостным аккумулятором в диапазоне температур $T_1 \div T_2$ ($T_1 < T_{ф.п.} < T_2$), определяется формулой [4]:

$$\Delta H = (H^o_{Tф.п.} - H^o_{T1}) + \Delta H_{ф.п.} + (H^o_{T2} - H^o_{Tф.п.}),$$

где $T_{ф.п.}$ – температура фазового перехода. Первое слагаемое в этой формуле учитывает изменение энтальпии твердой фазы, второе – изотермического фазового перехода, а третье – жидкой фазы аккумулируемого материала.

В настоящее время, в основном, в отопительных котлах для систем отопления и горячего водоснабжения сжигают природный газ (в газифицированных населенных пунктах) или привозной мазут или уголь. Ставится задача не о локальном или ограниченном применении тепловых аккумуляторов, а о максимальном отказе от прямого сжигания для этих целей органического топлива. По данным статотчетности за 2009 год по Республике Дагестан потребление тепловой энергии составило 7357207 ГДж, что эквивалентно примерно 256 тыс. т.у.т. или 204 тыс. $м^3$ природного газа.

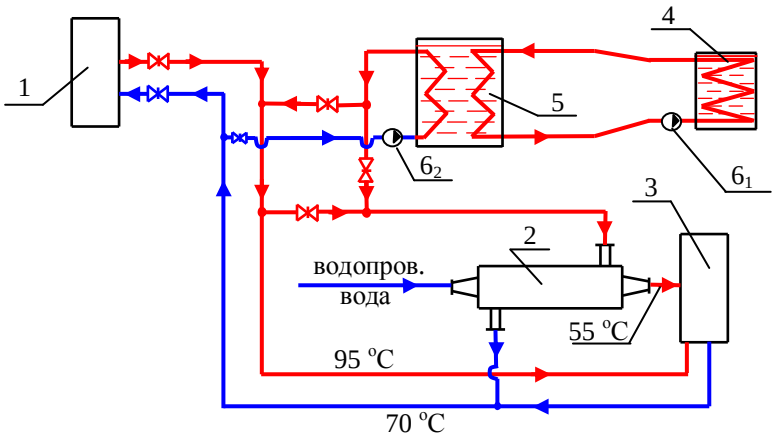
В системах отопления и горячего водоснабжения фазопереходно-теплоемкостные аккумуляторы могут применяться:

- как резервный источник тепла на объектах (особенно для помещений, где требуется сохранение постоянной температуры) с локальными системами (отдельный котел на каждое здание) теплоснабжения в газифицированных населенных пунктах во время аварийных и ограничительных отключений подачи газа;
- как основной источник тепла в регионах, где практикуются ночные и дневные тарифы на электроэнергию (зарядка аккумулятора за счет дешевой электроэнергии в ночное время);
- как основной источник тепла на объектах в негазифицированных населенных пунктах, где энергоснабжение обеспечивается дорогостоящим привозным топливом (зарядка аккумулятора за счет электроэнергии (или тепловой энергии) с использованием одного из ВИЭ).

Предлагаемая нами принципиальная схема отопления и горячего водоснабжения с использованием теплового аккумулятора приведена на рис. 1. Высокотемпературный жидкий теплоноситель циркулируется насосом 6_1 по первому контуру: бак-аккумулятор (4) – теплообменник (5), при этом охлаждая сначала расплавленный, а затем и твердофазный теплоаккумулирующий состав в баке-аккумуляторе и нагревая воду в теплообменнике до температуры 95 ^oC. (Согласно СНиП (строительные нормы и правила) [5, 6], вода подается в систему отопления при температуре 95 ^oC, а для горячего водоснабжения – при 55 ^oC.) Нагретую в теплообменнике воду вторым циркуляционным насосом (6_2) подается в систему отопления или горячего водоснабжения и через трубопровод обратной сетевой воды поступает в теплообменник.

В качестве высокотемпературного теплоносителя (с учетом ряда требований, предъявляемых к теплоносителю) можно использовать в диапазоне температур до 450 ÷ 500 ^oC органические жидкости (Diphil, Дифенил ДТ и др.), а

выше этих температур – эвтектические солевые расплавы с низкой температурой плавления (нитрат-нитритные сплавы щелочных металлов ($T_{пл.}$ от 63 °С и выше)).



1 – котельная;
2 – водоподогреватель;
3 – потребитель;
4 – бак-аккумулятор тепла;
5 – теплообменник;
6 – циркуляционный насос

Рис. 1. Принципиальная схема отопления и горячего водоснабжения с использованием теплового аккумулятора

Цель, методы и объект исследований. С целью получения энергоемких фазопереходно-теплоемкостных нонвариантных составов для теплового аккумулирования в данной работе методами физико-химического анализа исследован секущий стабильный тетраэдр LiF-LiCl-Li_2SO_4-$CaMoO_4$, являющийся единичной составляющей древа фаз пятикомпонентной взаимной системы Li,Ca//F,Cl,SO_4,MoO_4.

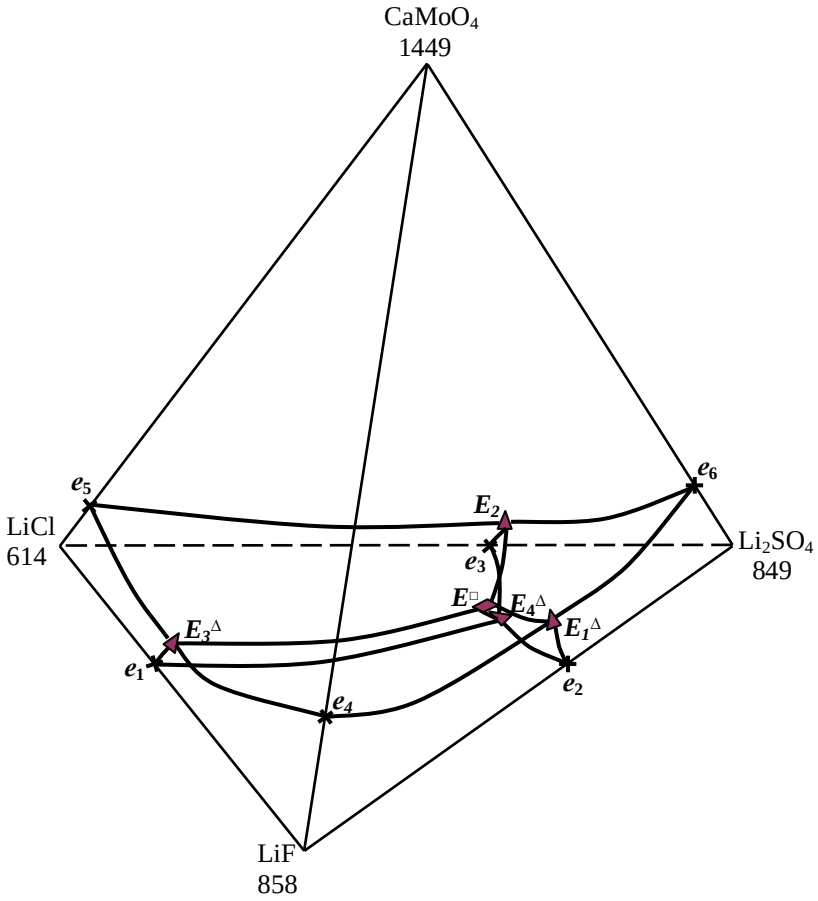


Рис. 2. Стабильный секущий тетраэдр LiF-LiCl-Li_2SO_4-$CaMoO_4$ с указанием нонвариантных точек

Выбор данного объекта обусловлен тем, что в его состав входят кальциевый природный минерал повеллит ($CaMoO_4$) и литиевые соли, обладающие высокими значениями энтальпий фазового перехода, а нонвариантные составы, расположенные в единичных составляющих многокомпонентных систем с участием стабильных диагоналей обладают наибольшей теплотой фазового перехода [7].

Исследования проводили дифференциально-термическим (ДТА) [8] и рентгенофазовым (РФА) [9] методами физико-химического анализа. Для записи кривых охлаждения (нагревания) применяли установку ДТА на базе автоматического электронного потенциометра КСП-4 с усилением сигнала дифференциальной термопары фотоусилителем Ф-116/1. Термоаналитические исследования проводились в стандартных платиновых микротиглях с использованием платина-платинородиевых термопар. Эталонным веществом служил свежепрокаленный оксид алюминия квалификации «ч.д.а.».

Рентгенограммы снимали с помощью дифрактометра ДРОН-2.0 ($Cu\ K_\alpha$ - излучение, никелевый β-фильтр). Составы для РФА отжигали в течении 18 ÷ 20 часов на 10 ÷ 15 °С ниже температур кристаллизаций образцов, а затем закаливали при 0 °С. Идентификация фазовых составов проводилась по картотеке ASTM [10]. Энтальпии фазовых переходов нонвариантных составов ($\Delta H_{пл.}$) определяли количественным ДТА [7]. Относительная точность измерения температур ±1 %, теплот фазовых переходов ± 8 %. Квалификация исходных солей: Li_2SO_4 и LiCl – «хч», $CaMoO_4$ – «ч», LiF – «чда». Исследования проводили в инертной среде, все составы выражены в молекулярных процентах

Характеристики исходных солей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исходных солей

Исходная соль	Молекулярная масса, г/моль	Температура плавления, °С	Энтальпия образования ΔH^o_{298}, кДж/моль	Энтальпия плавления $\Delta H_{пл}$, кДж/моль	Энтропия плавления $\Delta S_{пл}$, Дж/(моль·К)
LiF	25,94	849	612	27,08	24,14
LiCl	42,39	610	409	19,5	22,1
Li_2SO_4	109,94	858	1434	23,9	21,13
$CaMoO_4$	200,02	1449	1543	-	-

Расчетно-экспериментальная часть. Из элементов огранения данной системы нами впервые проекционно-термографическим методом (ПТГМ) [11] исследованы стабильный секущий треугольник LiF-LiCl-$CaMoO_4$ и тетраэдр LiF-LiCl-Li_2SO_4-$CaMoO_4$.

Для расчета энтальпий плавления, эвтектические смеси массой 0,3 г, помещенные в платиновые тигли, погружали в предварительно нагретую на 30 ÷ 40 °С выше их температур кристаллизаций шахтную печь, после чего печь равномерно охлаждалась. Эталонами служили соли: хлорид свинца ($PbCl_2$), хлорид лития (LiCl) и бромид калия (KBr) с известными величинами теплот фазовых переходов и температурами плавления 495, 610 и 730 °С, соответственно, близкими с исследуемыми. Расчет теплот плавления проводили по формуле [7]:

$$\Delta H_{обр} = (\Delta H_{эт} \cdot S_{обр} \cdot (1+0{,}00052\Delta T)) / S_{эт},$$

где, $S_{обр}$ и $S_{эт}$, $\Delta H_{обр}$ и $\Delta H_{эт}$, ΔT – соответственно площади пиков ($см^2$), энтальпии плавления (кДж/кг) и разность температур плавления (^oC) образца и эталона.

Плотность расплавов солей определялась методом гидростатического взвешивания платинового шарика, прикрепленного на платиновой нитке к одному плечу коромысла аналитических весов [12]. Фиксирование глубины погружения осуществлялась с применением платинового электрода. Плотность расплава рассчитывалась по формуле: $\rho_t = (m_b - m_d)/V_t$, где ρ_t – плотность расплава при температуре t ^oC, $кг/м^3$; m_b – масса платинового шарика при 20 ^oC, кг; m_d – масса шарика в расплаве при температуре t, ^oC, кг; V_t – объём шарика при температуре t ^oC, $м^3$. Объём шарика при различных температурах определялся по расплавам солей с известной плотностью в нужном интервале температур.

Теплоемкостную составляющую аккумулируемой тепловой энергии всех нонвариантных составов огранения и тетраэдра $LiF\text{-}LiCl\text{-}Li_2SO_4\text{-}CaMoO_4$ рассчитывались по изменению энтальпии соответствующих составов в диапазоне температур 95 ÷ ($T_{ф.п.}$+50) ^oC для отопления и 55 ÷ ($T_{ф.п.}$+50) ^oC для горячего водоснабжения (табл. 2). Необходимые для этого значения высокотемпературных составляющих энтальпий ($H^o_T - H^o_{298}$) всех исходных солей в широком диапазоне температур приведены в [13].

Кроме того, определены плотность суммарной аккумулируемой тепловой энергии ($МДж/м^3$) в расчете на плотность твердой фазы, а также суточный потенциал разового применения 1 $м^3$ каждого нонвариантного состава тетраэдра $LiF\text{-}LiCl\text{-}Li_2SO_4\text{-}CaMoO_4$ для отопления и горячего водоснабжения (табл. 2).

Таблица 2. Параметры теплоаккумулирующих нонвариантных сплавов тетраэдра $LiF\text{-}LiCl\text{-}Li_2SO_4\text{-}CaMoO_4$

Нонв точка	$T_{пл.}$, ^oC	$\Delta H_{пл.}$, кДж/кг	$H^o_{T2}-H^o_{328}$, кДж/кг	$H^o_{T2}-H^o_{368}$, кДж/кг	ΔH, $МДж/м^3$	Разовый потенц. 1 $м^3$ состава для		ρ, $кг/м^3$	
						отопл., $м^2$/сут	гор. вод., чел/сут	ж.ф.	тв. ф.
e_1	484	483	697	645	2505	346	117	1546	2123
e_2	532	809	813	776	3444	486	161	2109	2123
e_3	478	369	672	626	2245	310	105	1754	2157
e_4	741	770	1070	1024	6238	880	292	2380	3390
e_5	585	617	741	696	3110	435	145	1648	2290
e_6	709	197	1260	1216	3548	498	166	2123	2435
E^{Δ}_1	521	571	1140	1093	4115	579	193	2047	2405
E^{Δ}_2	468	717	637	588	3063	427	144	1823	2262
E^{Δ}_3	474	576	625	579	3046	424	143	1678	2536
E^{Δ}_4	440	564	637	588	2641	366	124	1752	2199
$E^{\square}$	408	614	576	528	2686	373	126	1774	2257

Нормативные показатели максимального теплового потока на отопление (80 $Вт/м^2$, при расчетной температуре наружного воздуха -10 ^oC) и горячее

водоснабжение жилых зданий (247 Вт/чел., при среднем расходе воды 85 л в сутки на 1 чел.) приведены в [5].

Как видно из табл. 2, доля теплоемкостной составляющей сопоставима, а в большинстве случаях даже превосходит долю фазопереходной составляющей общей аккумулируемой тепловой энергии.

Выводы. Впервые ДТА и РФА исследованы стабильный секущий треугольник LiF-LiCl-$CaMoO_4$ и тетраэдр LiF-LiCl-Li_2SO_4-$CaMoO_4$. В результате, выявлены составы и температуры кристаллизации одной тройной и одной четверной эвтектических сплавов системы, измерены их плотность в жидком состоянии. Определены энтальпии плавления и рассчитаны теплоемкостные составляющие аккумулируемой тепловой энергии всех эвтектических составов тетраэдра LiF-LiCl-Li_2SO_4-$CaMoO_4$.

Предложена принципиальная схема отопления и горячего водоснабжения с использованием теплового аккумулятора. Разовое применение 1 $м^3$ каждого из полученных эвтектических солевых составов как фазопереходно-теплоемкостных аккумулирующих материалов позволяет обеспечить отоплением 310 ÷ 880 $м^2$ площади жилого здания и горячим водоснабжением 105 ÷ 292 человек в течение одних суток. Полученные составы с плотностью суммарной аккумулируемой тепловой энергии 2245 ÷ 6238 МДж/$м^3$ могут быть использованы в качестве рабочих тел в фазопереходно-теплоемкостных аккумуляторах тепла с рабочим диапазоном температур 55 ÷ 709 ^oC.

Литература:

1. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Возобновляемые источники энергии для энергоснабжения потребителей России // Энергетический вестник, № 1, 2010. С. 9 – 29.
2. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Возобновляемые источники энергии в России. // II Международная конференция «Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы», сентябрь 2010, Махачкала, Россия. С. 4 – 23.
3. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
4. *Герасимов Я.И., Древинг В.П., Еремин Е.Н. и др.* Курс физической химии. Т. 1. Изд. 2-е, исправленное. – М.: Химия, 1969. – 592 с.
5. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование. - М. 1992.
6. СНиП 2.04.07-86. Тепловые сети. - М. 1988.
7. *Васина Н.А., Грызлова Е.С., Шапошникова С.Г.* Теплофизические свойства многокомпонентных солевых систем. - М.: Химия, 1984. - 112 с.
8. *Егунов В.П.* Введение в термический анализ. Самара: Самарский гос. тех. ун-т, 1996. - 270 с.
9. *Трунов В.К. Ковба Л.М.* Рентгенофазовый анализ. М.:Изд-во МГУ, 1976.-232 с.
10. 10. ASTM. Diffraction Data cardsand Alfabetical and Gronped Numerical Index of x- Ray Diffraction Data. Изд. американского общества по испытанию материалов. Филадельфия, 1946-1969г.
11. *Космынин А.С., Трунин А.С.* Проекционно-термографический метод исследования гетерогенных равновесий в конденсированных многокомпонентных системах. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2006. 182 с.
12. *Трунин А.С.* Комплексная методология исследования многокомпонентных систем. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 1997.-308 с.
13. *Люцарев В.С., Ермаков К.В., Калугина О.Б.* Программа *Chet*. Вер. 1.4. – М. 1989. Сер. №7.

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Куртынов С.Е., Ильин Р.А.

Лаборатория нетрадиционной энергетики СНЦ РАН (при Астраханском государственном техническом университете); Россия, г.Астрахань, 414025, ул. Татищева, 16;
e-mail: akilyin@newmail.ru

Вопросы эффективности использования котлов, возобновляемых источников энергии и, в том числе – их совместной работы, в настоящее время достаточно актуальны (например, [1-19] и др.).

При автономной работе энергетический КПД собственно котлов достаточно высок, до 0,87-0,92 при работе на газе и мазуте на номинальном режиме [8, 9, 16]. Для промышленных котлов типа ДКВр (1,4 МПа), Е (1,4), Е-50 (4,0), БКЗ-75 (4,0), КВ-ГМ (0,8-2,5 МПа) он составляет, соответственно, 0,89-0,91, 0,89-0,92, 0,91,-0,93, 0,90-0,92, 0,87-0,93. Для котлов ДКВр-10-13 и ПТВМ-50 устанавливается норма расхода условного топлива на номинальном режиме при работе на газе и мазуте в интервале 157-163 кг у.т. на 1 Гкал получаемой тепловой энергии, что соответствует энергетическому КПД котлов 0,91-0,88 [18].

Однако эксергетические КПД котлов, которые учитывают потери эксергии (качества, работоспособности тепловой энергии) имеют весьма низкие величины. Например, в работе [15] приведены энергетические и эксергетические КПД котлов на угле 12-ти тепловых электростанций с высокими параметрами пара (12,6/540 МПа/^{0}С – 34,5/650): при энергетическом КПД 0,89-0,91 эксергетический КПД составил 0,39-0,49 на номинальном режиме. При анализе эффективности паротурбинной установки [12] с параметрами 16,67 МПа, 550 ^{0}С указан энергетический КПД современных котлов электростанций 0,89 (уголь) – 0,93 (газ). При этом эксергетический КПД для рассмотренных условий составил 0,56. Для промышленных и отопительных котлов эксергетический КПД снижается до 0,3 вследствие увеличения разности между температурой продуктов сгорания и температурой рабочего вещества (воды, пара) и существенного увеличения, в связи с этим, потерь от необратимости теплообмена [9, 14].

Весьма правильна и категорична фраза из [18]: «Некоторые процессы имеют весьма низкий эксергетический КПД даже при использовании современных технических решений. Низкое значение эксергетического КПД топливных котлов обусловлено прежде всего необратимостью процессов горения и теплообмена между продуктами сгорания и нагреваемой водой и паром. КПД можно несколько повысить, например, уменьшив коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания, улучшив теплоизоляцию котла и т.п. Однако для значительного снижения потерь от необратимости процесса между высокотемпературными продуктами сгорания и относительно низкотемпературным рабочим веществом необходимо применять нагреватели других типов, использующие уходящую из технологической установки теплоту потоков рабочего тела с более низкой температурой».

В данной работе показаны возможности повышения эффективности использования котлов при их совместной работе с возобновляемыми источниками энергии (солнечной, геотермальной). Оценка эффективности производится по коэффициенту использования располагаемой эксергии. Это означает, что при снижении температуры источника тепловой энергии эксергетическая

эффективность его использования повышается, что можно обеспечить при совместной работе котла с ВИЭ.

Этот коэффициент позволяет не только определить эффективность использования эксергии с учетом ожиданий потребителя, но и оценить относительную экономию топлива и относительный срок окупаемости при сравнении вариантов установок для определенного объекта и конкретных условий его использования на стадии их выбора и проектирования.

Для анализа рассматриваемой схемы («Котел + ВИЭ + потребитель тепловой энергии») используется формула для общего коэффициента использования располагаемой эксергии [6, 12]:

$$\delta\eta_{ex}^{\text{общ}} = \tau_{\text{п–о}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пот1}} + \psi_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{пот2}} / \left(\tau_{\text{т–о}} + \psi \cdot \tau_{\text{доп–о}}\right), \quad (1)$$

в виде

$$\delta\eta_{ex}^{\text{общ}} = \delta\eta_{ex}^{\text{к}} \cdot \left(\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пот1}} + \psi \cdot \eta_{\text{пот2}}\right) / \left(1 + \psi \cdot \tau_{\text{доп–о}} / \tau_{\text{т–о}}\right), \quad (2)$$

где $\delta\eta_{ex}^{\text{к}}$ – коэффициент использования располагаемой эксергии в системе «котел + потребитель» без дополнительного (ВИЭ) источника теплоты; $\eta_{\text{к}}$ – энергетический КПД котла; $\eta_{\text{пот1}}$, $\eta_{\text{пот2}}$ – КПД, учитывающий потери тепловой энергии при ее передаче потребителю от котла (индекс 1) и дополнительного источника (2); $\tau_{\text{п-о}}$, $\tau_{\text{т-о}}$, $\tau_{\text{доп-о}}$ – эксергетические температурные функции в интервалах температур, соответственно, $T_{\text{п}}$-$T_{\text{о}}$, $T_{\text{т}}$-$T_{\text{о}}$, $T_{\text{доп}}$-$T_{\text{о}}$; $T_{\text{п}}$ – температура на входе в потребитель, К; $T_{\text{т}}$ – максимальная теоретическая температура горения топлива, К (принято 2313 К); $T_{\text{доп}}$ – температура на выходе из дополнительного (ВИЭ) источника теплоты, К; $T_{\text{о}}$ – температура окружающей среды, К; $\psi = Q_{\text{доп}} / Q_{\text{к}}$; $Q_{\text{доп}}$ – количество теплоты от дополнительного источника потребителю; $Q_{\text{к}}$ – количество теплоты от котла потребителю.

Коэффициент использования располагаемой эксергии системы «котел + дополнительный источник теплоты + потребитель» для частного случая: $\eta_{\text{пот1}} = 1$, $\eta_{\text{пот2}} = 1$ и, для упрощения анализа, при $\eta_{\text{к}} = 1$, $\eta_{\text{пр}} = 1$:

$$\delta\eta_{ex}^{\text{общ}} = \tau_{\text{п–о}} \cdot \left(1 + \psi\right) / \left(\tau_{\text{т–о}} + \psi \cdot \tau_{\text{доп–о}}\right), \quad (3)$$

$$\delta\eta_{ex}^{\text{общ}} = \delta\eta_{ex}^{\text{к}} \cdot \left(1 + \psi\right) / \left(1 + \psi \cdot \tau_{\text{доп–о}} / \tau_{\text{т–о}}\right). \quad (4)$$

Анализ системы по (3) и (4) выполнен в широком диапазоне параметров ψ и $T_{\text{доп}}$ для двух характерных значений $T_{\text{п}}$ – 363 К (90 $^{\text{o}}$C) и 393 (120 $^{\text{o}}$C), с учетом, что $T_{\text{доп}}$ от дополнительного источника тепловой энергии, когда в его качестве используются возобновляемые источники энергии (солнечная, геотермальная [1, 2, 4, 17]), может быть меньше $T_{\text{п}}$.

Результаты анализа представлены на рис.1 и 2, где видно, что использование дополнительных источников тепловой энергии весьма эффективно уже при ψ = 0,15-0,25. Увеличение $\delta\eta_{ex}^{\text{общ}}$, таким образом, приводит к уменьшению расхода топлива на котел. При $\eta_{\text{к}} < 1$ результаты анализа принципиально не изменяются.

Общий термодинамический подход к оценке эффективности использования эксергии топлива по коэффициенту использования располагаемой эксергии $\delta\eta_{ex}^{\text{общ}}$ в котлах с дополнительным (ВИЭ) источником позволяет на начальной стадии принятия решений без подробной технической и технико-экономической проработки выделить один или два приоритетных варианта параметров, состава и схем комбинированных источников энергии для теплоснабжения.

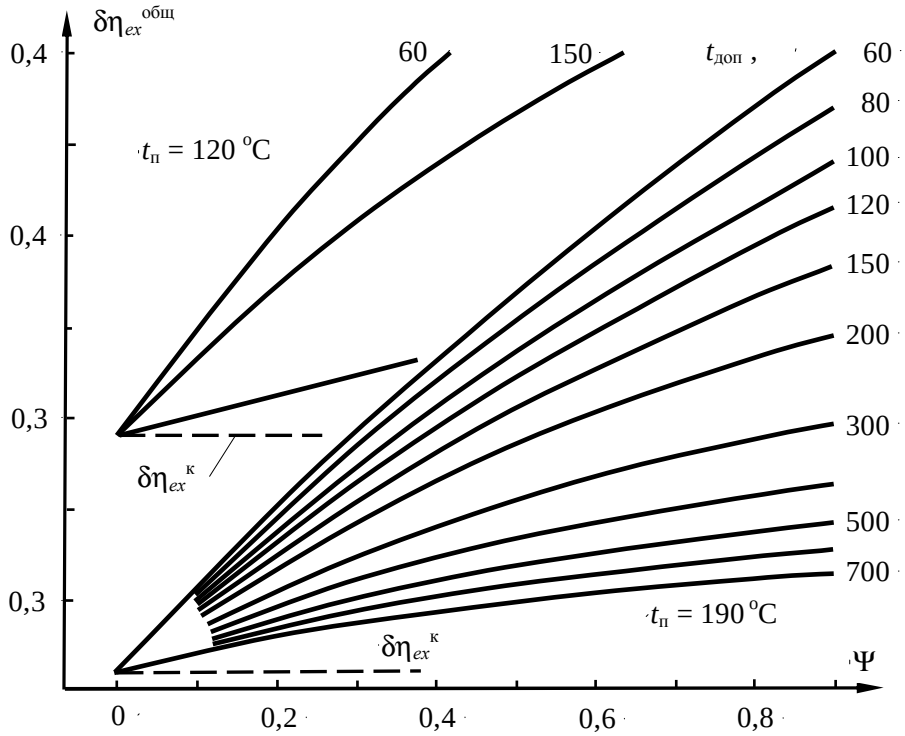


Рис.1. Зависимость общего коэффициента использования располагаемой эксергии при совместной работе с ВИЭ от доли тепловой энергии Ψ, обеспечиваемой ВИЭ.

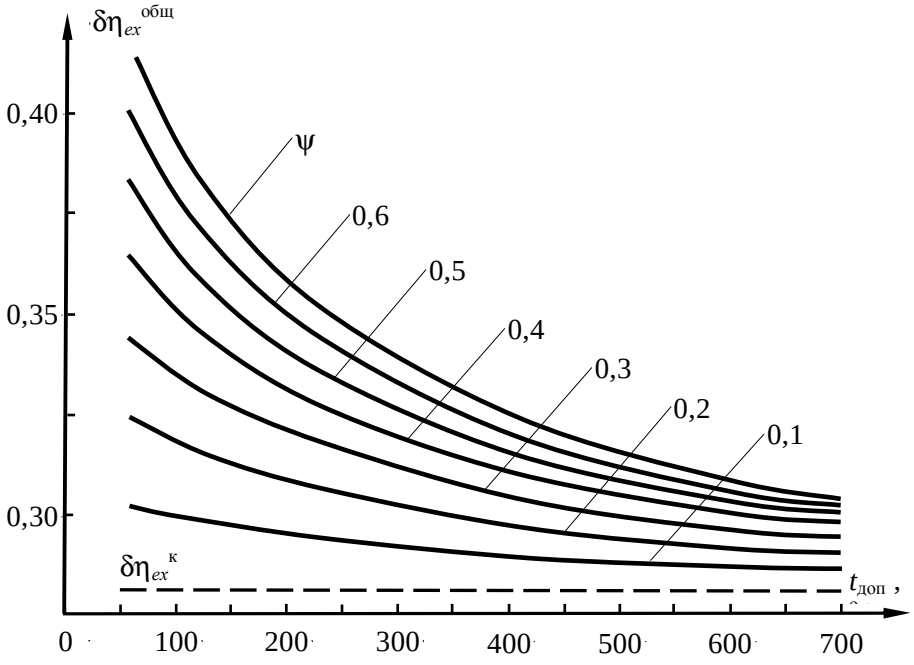


Рис.2. Эффективность системы «котел + дополнительный источник (ВИЭ) + потребитель» при $t_{доп}$ = var, $t_п$ = 90 °C и при различных величинах ψ. При $t_{доп}$ < (150-100) °C могут использоваться, в основном, ВИЭ. При $t_{доп} < t_п$ тепловая энергия дополнительного источника вводится непосредственно в котел.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
2. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. М.: Физматлит, 2010. 256 с.

3. *Андрющенко А.И., Ларин Е.А., Сандалова Л.А.* Метод эксергетического анализа термодинамических систем и комплексов. Учебное пособие. Саратов: СГТУ, 2008. 74 с.
4. *Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.* Солнечная энергетика. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с.
5. *Гохштейн Д.П.* Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. 368 с.
6. *Ильин Р.А., Ильин А.К.* Методология термодинамической оценки эффективности теплоэнергетических технологий / Материалы всеросс. конф. «Энергетика России в 21 веке: развитие, функционирование, управление». Иркутск: Институт систем энергетики им. Л. Мелентьева СО РАН. 2005. С. 21-28.
7. *Ильин Р.А.* К проблеме оценки эффективности теплоэнергетических технологий в промышленной энергетике // Вестник АГТУ. 2005. Вып.6 (29). С.214-229.
8. *Ильин Р.А.* Об эффективности использования котлов / Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Материалы 5–международн. конф. Ч. 3. Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. С.224-228.
9. *Ильин Р.А., Ильин А.К.* Еще раз об эксергетической эффективности использования топливных котлов для теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Приложение №8. 2006. С.49-51.
10. *Ильин Р.А.* Сравнительная эффективность комбинированных теплоэнергетических установок // Промышленная энергетика. 2009. №10. С. 49-53.
11. *Ильин Р.А.* Алгоритм оценки эффективности при создании и использовании теплоэнергетических установок различных видов // Вестник АГТУ. Серия «Морская техника и технология». 2010. Вып. 2. С. 79-82.
12. *Ильин Р.А.* Комплексная термодинамическая оценка эффективности теплоэнергетических установок. М.: МНИЭУ (МЭИ), УМО вузов РФ по образованию в области энергетики и электротехники; Астрахань: «Новая линия», 2011. 66 с.
13. *Каганович Б.М., Филиппов С.П.* Теоретические основы анализа эффективности комбинированных технологий // Известия академии наук. Энергетика. 2008. №6. С. 116-126.
14. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. 5-ое изд-е. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 496 с.
15. *Мастепанов А.М.* Топливно-энергетический комплекс России на рубеже веков: состояние, проблемы и перспективы развития. 4-е изд-е. М.: Издательство ИАЦ «Энергия», 2009. Т. 1. 480 с. Т. 2. 472 с.
16. *Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н.* Справочник по котельным установкам малой производительности. Под ред. К.Ф. Роддатиса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
17. *Фортов В.Е., Попель О.С.* Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. 168 с.
18. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др. Под ред. А.В. Клименко. 2-е изд. М.: Издат. дом МЭИ, 2011. 424 с.
19. *Янтовский Е.И.* Потоки энергии и эксергии. М.: Наука, 1988. 144 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВОВЛЕЧЕНИЯ РЕСУРСОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЮГА РОССИИ

Меджидов А.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: medzhidow@yandex.ru

Устойчивый рост потребления топлива и энергии, истощение запасов органического топлива и ограничение возможности его добычи, усиление загрязнения окружающей среды определяют повышенное внимание к возможному росту использования геотермальной энергии. Геотермальную энергию принято считать возобновляемой из-за практически неограниченных ее ресурсов [7]. Ресурсы геотермальной энергии в 10-15 раз превышают все ресурсы органического топлива [1]. Однако для Российской Федерации, где объемы геотермального производства в сотни раз отстают от среднеевропейского (1-5% в топливно-энергетическом балансе) уровня, ускорение развития этой отрасли является весьма актуальным [3] .

Экономический потенциал гидротермальных ресурсов с температурой воды более 50^{o}С и минерализацией менее 35 г/л составляет более 10% (115 млн.т. у. т.) от годового потребления энергоресурсов (945 млн.т. у. т.) в стране. С учетом низкопотенциальных термальных вод (20-50^{o}С), распространенных практически повсеместно, и тепла горных пород верхних слоев земной коры (до глубины 200 м) этот показатель может возрасти до 25% [1].

Прогнозные эксплуатационные ресурсы низкопотенциальных подземных вод Восточно-Предкавказского артезианского бассейна составляет 16,7 млн. м^3/сут, из которых более 1,5 млн. м^3/сут составляют воды со средней температурой 40^{o}С [4] . Эти воды практически не используются для нужд энергетики. Основной причиной этого является то, что температура таких вод недостаточна для теплоснабжения и горячего водоснабжения. В то же время такие воды, по сравнению с средне- и высоко- потенциальными термальными водами имеют ряд преимуществ: малые капитальные затраты для их добычи, низкая минерализация и, соответственно, отсутствие проблем, связанных с солеотложением и коррозией, а также наличие в регионе большого количества готовых к эксплуатации скважин (только в Северном Дагестане количество самоизливающихся скважин с низко потенциальными водами достигает свыше 3000).

Однако потенциал геотермального тепла для большинства регионов Северного Кавказа остается недоиспользованным. Так, по данным работы [4] количество эксплуатируемых скважин на месторождениях термальных вод составляет 172 для Республики Дагестан (РД) и 185 для Северного Кавказа (СК), добыча термальных вод 6,0 млн. м^3/год для РД и 11,0 млн.м^3/год для СК, производство тепловой энергии составляет 100 тыс. Гкал/год для РД и 500 тыс. Гкал/год для СК. В процентном отношении использование потенциала термальных вод составляет: для РД 12% от разведанных запасов и 3% от прогнозных запасов; для других регионов Северного Кавказа (СК) соответственно 12% и 2,4%. Такое положение дел наблюдается в отмеченных выше регионах, несмотря на благоприятные предпосылки к интенсивному развитию, т.е. на значительную ресурсную базу геотермальных вод, достаточно высокую

экономическую эффективность, принадлежность геотермального тепла к возобновляемым источникам энергии. В этой связи, проблема развития геотермального производства для частичного замещения поставок природного газа в регионы при постоянном увеличении экспортного потока и роста тарифов представляется весьма актуальной проблемой, имеющей общегосударственное значение.

Кроме того, актуальность развития геотермального производства в регионах Северного Кавказа обусловлена еще тем обстоятельством, что в соответствии со стратегией ОАО «Газпром» внутренняя регулируемая цена на газ в 2020 году планируется на уровне 80 долларов США на 1000 $м^3$ газа [4]. Но реальность такова, что внутренние цены подтягиваются к мировым и европейским. Европейская цена в 2008 году составляет 260 долларов США на 1000 $м^3$ газа и имеет тенденцию к росту. При успешном выполнении проекта реализации геотермального производства возможная экономия поставок газа на Северный Кавказ и соответствующее увеличение его экспорта оценивается в объеме до 3,5 млрд. $м^3$ за 15 лет.

Основным стимулом для развития геотермального производства является постоянный рост цен на органическое топливо [2]. Он вызван не только экономическими причинами роста потребления энергии и развития автотранспорта стран с растущими экономиками, но и политическими ожиданиями экономических потрясений. Такой рост, и по всей видимости, сохранится на ближайшие годы и даже десятилетие. Целесообразно в этой связи использование научного потенциала исследовательских организаций регионов юга России. Основными целями и направлениями исследований можно назвать:

1. разведка и выявление эксплуатационных запасов термальных вод по регионам;
2. оценка прогнозных ресурсов термальных вод по регионам Северного Кавказа;
3. анализ современного состояния и дальнейшего роста геотермального производства по регионам Северного Кавказа;
4. экономическая эффективность замещения природного газа геотермальной энергией;
5. разработка новых технологий извлечения тепловой энергии водоносных горизонтов, конкурентно способной с выработкой тепловой энергии от газовых котельных.

Основной риск, связанный с внедрением проекта, заключается в трудностях предприятий геотермии регионов в изыскании капиталовложений для своего развития. Существуют и другие факторы риска, связанные с недостаточной доказанностью эксплуатационных показателей добычных и нагнетательных скважин. Имеющиеся геолого-гидрогеологическая изученность месторождений позволяет считать такие показатели, как дебиты, давление закачки и др. достаточно достоверными, однако, требуется их уточнение путем проведения опытных работ.

Для снижения рисков при внедрении проекта необходимо:

– использовать наиболее рациональные технологии при ведении работ по разработке и эксплуатации геотермальных месторождений;
– содействовать широкомасштабному вовлечению, наряду с другими возобновляемыми источниками энергии, геотермальных ресурсов в топливно-энергетический баланс;
– вести постоянную маркетинговую работу, исследуя современный и перспективный, количественный и стоимостный потенциалы потребления.

Необходимо отметить, что для реализации проекта развития

геотермального производства в регионах Северного Кавказа имеются необходимые строительные и буровые организации, а необходимые теоретические проработки и другие работы могут быть осуществлены силами самих предприятий геотермии.

В отдельных регионах России геотермальное энергоснабжение может составить до 50-90% общего потребления энергии. К таким регионам, в первую очередь, относятся Северокавказские регионы. Экономический потенциал гидротермальных ресурсов регионов составляет около 25 млн. т. у. т. в год или более 20% от всех ресурсов России, а с учетом низкопотенциальных вод достигает до 30%. Здесь на небольших глубинах в осадочных отложениях артезианских бассейнов залегают неограниченные запасы пресных и слабоминерализованных вод с температурой от 20 до 50^{o}C [1].

Благоприятное сочетание природных и климатических условий, высокая геотермальная напряженность недр, обилие солнечной и ветровой энергии выдвинуло Республику Дагестан в качестве природного полигона для отработки необходимых опытно-технологических процессов в деле комплексного использования возобновляемых источников энергии и, прежде всего, гидротермальных ресурсов.

Слаботермальные пресные воды в РД вскрыты более чем 5000 артезианских, газонефтяных и геотермальных скважин. Они изучены довольно равномерно на территории Платформенного и Предгорного Дагестана. Однако до настоящего времени нет единой апробированной методики региональной оценки прогнозных эксплуатационных ресурсов термальных вод, несмотря на актуальность проблемы, поскольку промышленной оценке запасов того или иного месторождения, должна предшествовать региональная оценка ресурсов вод всего артезианского бассейна или водоносного комплекса [5].

Региональная оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов была проведена М.К. Курбановым по методике Н.Н. Биндемана и Ф.М. Бочевера [5]. При проведении прогнозной оценки вся площадь исследуемого бассейна была разбита на условные ячейки, представляющие квадраты со сторонами *l*. При этом предполагалось, что каждая ячейка, рассматриваемая отдельно и независимо друг от друга, к концу расчетного периода (25 лет) образует депрессионную воронку с контуром влияния R_k, равным

$$R_k = \sqrt{l^2 / 2\pi} \qquad (1)$$

Для расчетов использовалась приближенная формула для больших времен

$$Q_э = \frac{2\pi KhS_{\max}}{\ln\frac{0{,}47R_k}{R_c} + \frac{2a\tau_p}{R_k{}^2}}, \qquad (2)$$

где $Q_э$ - расчетный эксплуатационный дебит, м^3/сут; K – коэффициент фильтрации, м/сут; h – мощность водоносных горизонтов, м; R_k - контур влияния водозабора, м (принимается равным R_k = 10 км); R_c – радиус скважины, м; a - коэффициент пьезопроводности водонапорного горизонта; S_{max} - максимальное понижение динамического уровня, м; τ_p - расчетный период эксплуатации, сут.

По формуле (1.2) были рассчитаны прогнозные эксплуатационные дебиты по основным месторождениям Предгорного и Платформенного Дагестана (всего по 50 водозаборам). Расчетные дебиты скважин колеблются от 300 до 3000 м^3/сут, составляя в среднем 1550 м^3/сут.

Гидравлические потери на трение выражаются через дебит скважины и в общем случае турбулентного режима течения представляют собой квадратичную функцию дебита Q. В зависимости от внутреннего диаметра скважины d и эмпирической зависимости гидравлических потерь трения от дебита скважины для турбулентного режима ($v \geq 1{,}2$ м/с) конечный вид формулы для дебита скважины имеет вид [6].

$$Q + \frac{DQ}{\eta H} - \frac{D}{H}\left(P_{y0} - P_y + gH(\rho_0 - \rho)\right) = 0 \qquad (3)$$

где $D = 0{,}43 \cdot 10^{14} \cdot d^{5.3}$

Если скорость течения термальной воды $v<1{,}2$ м/с, то дебит скважины определяют из выражения

$$Q = \frac{\eta\left(P_{y0} - P_y + gH(\rho_0 - \rho)\right)}{\left(1 + 2 \cdot 10^9 \eta H d^{-3,3}\right)} \qquad (4)$$

где P_y– давление на устье работающей скважины, Па; P_{y0} – давление на устье простаивающей скважины, Па; H – глубина интервала притока, м; ρ - среднее значение плотности воды по стволу работающей скважины, кг/м^3; ρ_0 - среднее значение плотности воды по стволу простаивающей скважины, кг/м^3; g - ускорение свободного падения, м^2/с; η - коэффициент продуктивности пласта.

Так как дебит скважины зависит от диаметра эксплуатационной колонны, то диаметры эксплуатационных колонн должны быть приведены в соответствие с продуктивностью пластов месторождения с учетом технико-экономических показателей. С другой стороны, диаметр эксплуатационной колонны, определяемый из уравнений (3) и (4), должен быть положен в основу при проектировании и расчете конструкции термальной скважины. Правильный его выбор предопределяет снижение затрат в процессе освоения глубинного тепла, так как оптимизация диаметра колонны, в конечном счете, приводит к уменьшению числа скважин.

Срок разработки пласта определяется динамикой температуры добываемой термальной воды. Когда температура ее снизится настолько, что добыча станет нерентабельной, эксплуатация скважины должна быть прекращена. Если в качестве такого срока эксплуатации условно принять время τ_p, в течение которого температура термальной воды упадет на 60% своего предельно возможного снижения, то значения $\tau_э$ определяются по формуле

$$\tau_p = \tau_э + 10{,}7\frac{\lambda c L^2}{(c_ж v h)^2}; \tau_э = \frac{c_{пс} L}{c_ж v} \qquad (5)$$

Здесь λ - коэффициент теплопроводности пласта, Вт/м·°С ; c – объемная теплоемкость горной породы, Дж/см^3·°С; L – длина пласта, м; $c_ж$ – объемная теплоемкость термальной воды, Дж/см^3·°С; $c_{пс}$ – объемная теплоемкость пластовой системы (коллектор+жидкость), Дж/см^3·°С; h – мощность пласта, м.

Формулы (1.5) были предложены М.Г. Алишаевым в работе [5]. Из этих формул видно, что время τ_p складывается из времени достижения температурного возмущения до эксплуатационной скважины $\tau_э$, пропорционального расстоянию L между скважинами и времени постепенного снижения температуры добываемой воды, обусловленного теплообменом с окружающими породами. Время снижения температуры в большей степени зависит от длины пласта L. Поскольку при заданном перепаде давления скорость фильтрации v, согласно закону Дарси,

обратно пропорциональна расстоянию между галереями, то в формуле (1.5) второе слагаемое пропорционально четвертой степени L.

Это обстоятельство позволяет выбрать оптимальное расстояние между галереями. При небольших расстояниях второе слагаемое в первой из формул (1.5) мало и время разработки совпадает с $\tau_э$ (теплообмен с окружающими породами не успевает за вытеснением), при больших L время снижения температуры огромно, нагнетаемая вода успевает прогреться благодаря теплообмену с покрывающими и подстилающими породами.

Расчет значения температуры добываемой воды в эксплуатационной скважине для пары скважин по методике М.Г. Алишаева позволил установить:
а) при L=1100 м; h=40 м; Qh=2500 м^3/сут; T_0=70 ºС; T_B=40 ºС; $c/c_{пс}$=1,17 и $c_{пс}/c_{ж}$=0,65 (скважины 23т и 26т в РД). Вычислением определяется время достижения температурного возмущения до эксплуатационной скважины τ_p = 36 лет. По истечении этого срока начинается постепенный спад температуры. Темп падения будет выше, если температуропроводность a окружающих пород меньше. Так как для слюдистых пород значения a малы (a=3,21·10^{-7} м^2/с), то значения $T_э$ были вычислены для момента времени $\tau = 3\tau_p$ =108 лет. Эта температура оказалась равной 64,4 ºС, т.е. температура снизилась лишь на 5,6 ºС. Если бы покрывающие породы имели a=0, т.е. были бы нетеплопроводными, то температура снизилась бы на 15 ºС. Температура добываемой воды в эксплуатационной скважине $T_э$ поддерживается благодаря теплообмену с кровлей и подошвой.
б) при L=550 м; h=30 м; Qh=2400 м^3/сут; T_0=70 ºС; T_B=40 ºС; $c/c_{пс}$=1,17 и $c_{пс}/c_{ж}$=0,65 (скважины 26т и 19т в РД). Спад температуры начинается через τ_p = 7 лет. Принимая коэффициент температуропроводности a таким же, как у известняков (a=9,6·10^{-7} м^2/с) и , подсчитав снижение температуры через 62 года, когда $\tau = 8{,}84\tau_p$, получено, что через 62 года снижение температуры термальной воды снизится на 10,5 ºС и составит 59,5 ºС. Если окружающие пласт породы были бы нетеплопроводными, то за 62 года температура снизилась бы на 20 ºС.

При эксплуатации скважины, работающей с дебитом Q, по истечении некоторого времени в ней устанавливается определенный профиль температуры $T(x)$, который затем меняется со временем очень медленно. Градиент температуры вдоль скважины обусловлен потерями тепла в окружающий горный массив. Уравнения для квазиустановившейся температуры можно записать в виде

$$\frac{dT}{dx} + \alpha(t)\frac{T - T_0(x)}{L} = 0\,;\ x > 0\,;\quad T(0) = T_{пл} \tag{6}$$

$$\alpha(t) = \frac{2\pi\lambda L}{c_{ж}Q}\frac{0{,}85 + 0{,}27\sqrt[4]{F_0}}{\sqrt{F_0}}\,;\ F_0 = \frac{a^2 t}{R_c^{\,2}}\,;\ a^2 = \frac{\lambda}{c} \tag{7}$$

Проинтегрировав (1.6) и (1.7) для температуры на устье скважины, можно получить

$$\frac{T_y - T_{0y}}{T_{пл} - T_{0y}} = \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} \tag{8}$$

Для большого отрезка времени, когда число Фурье велико, а параметр α мал формула (1.8) может быть заменена асимптотической формулой

$$\frac{T_{пл} - T_y}{T_{пл} - T_{0y}} = \frac{\alpha}{2} \tag{9}$$

где $T_{пл}$ – температура пласта, ºС ; T_y – температура термальной воды у устья скважины, ºС; T_{0y} - температура термальной воды на устье простаивающей скважины, ºС.

При проведении практических расчетов для горных пород можно принять значения λ = 2,1 Вт/м ·ºС и $a^2 = 10^{-6}$ м^2/с. Если принять, что радиус труб r = 0,15 м, объемная теплоемкость термальной воды $c_{ж}$ = 4,2 Дж/см^3 ºС, а глубина залегания пласта L = 1000 м при дебите скважины Q = 1000 м^3/сут, $T_{пл}$ = 120 ºС и T_{0y} = 20 ºС. При этих значениях безразмерный комплекс $2\pi\lambda L / c_{ж} Q = 0{,}27$, что свидетельствует о малом значении функции $\alpha(t)$ при F_0>>1. По истечении трех суток будем иметь F_0 = 11,6; $\alpha(t)$ = 0,11; $T_{пл} - T_y$ = 5,5 ºС. По истечении месяца непрерывной работы скважины F_0 = 116; $\alpha(t)$ = 0,044; $T_{пл} - T_y$ = 2,2 ºС.

Это говорит о том, что при высоких значениях дебитов скважины потери температуры по стволу скважины незначительны, и при проведении практических расчетов температуру термальной воды по стволу скважины с достаточной точностью можно принять постоянной.

Естественные запасы слаботермальных вод апшеронского водоносного комплекса определялись как произведение суммарных объемов водоносных горизонтов на коэффициент водоотдачи. Суммарная мощность песчаников колеблется от 25 м на северо-западных окраинах бассейна до 300 м в подавляющей части Ногайского, Кизлярского, Бабаюртовского районов. Коэффициенты водоотдачи в среднем составляют 0,15-0,16.

Для условий Республики Дагестан в зависимости от глубины залегания температура вод артезианских скважин на устье колеблется от 20 до 50 ºС. Однако, несмотря на наличие более 3000 артезианских скважин, они, за исключением единичных случаев, в теплоэнергетических целях не используются.

Необходимо, однако, отметить, что при всей тщательности выбора исходных параметров невозможно избежать значительных погрешностей в оценке естественных ресурсов, так как протяженность расчетного профиля достигает сотен километров, а изменение фильтрационных свойств водоносных горизонтов наблюдается даже в пределах нескольких метров в одном и том же водоносном горизонте. Тем не менее, такие расчеты полезны и необходимы для решения практических и научно-методических вопросов, и по мере накопления новых исходных материалов следует уточнять и переоценивать естественные ресурсы. Региональная оценка эксплуатационных ресурсов апшеронского комплекса была произведена по вышеуказанной методике Н.Н. Биндемана и Ф.М. Бочевера для территории всего Терско-Кумского артезианского бассейна.

Количество необходимых гидрогеологических параметров здесь достаточно. Обобщены многолетние режимные наблюдения по 300 эксплуатационным скважинам, почти равномерно распределенным по всей площади бассейна. Рассчитаны дебиты более 250 водозаборов,

Расчетные дебиты в зависимости от гидрогеологических параметров колеблются от 1500 до 1600 м^3/сут, в то время как эксплуатационные дебиты существующих скважин при самоизливе не превышают в среднем 1000-1200 м^3/сут. Прогнозные эксплуатационные ресурсы пресных и слаботермальных вод подсчитаны гидродинамическими методами и составляют для Терско-Кумского артезианского бассейна 16,7 млн. м^3/сут, в том числе по данным М.К. Курбанова для Северного Дагестана 9,5 млн. м^3/сут. Более 15% или 1,5 млн. м^3/сут прогнозных эксплуатационных ресурсов Северного Дагестана имеют среднюю температуру 40ºС, что эквивалентно $6{,}9 \cdot 10^{10}$ МДж/год.

Учитывая, что на территории Республики Дагестан расположены геотермальные площади с разнообразными геологическими условиями, содержащими практически все типичные особенности равнинных и предгорных геотермальных месторождений Российской Федерации, имеющиеся предпосылки определяют возможности и позволяют организовать научные и опытно - конструкторские работы в этом районе с наименьшими затратами.

Таким образом, пресные и слабоминерализованные воды апшеронского комплекса обладают огромным тепловым потенциалом, который в технологическом отношении может быть использован в народном хозяйстве с большим экономическим и экологическим эффектом. При этом особенностью термальных скважин является наличие показателей, определяющих промышленную ценность их продукции. Главными из них являются дебит, температура и ее химический состав. Однако на практике не всегда имеет место благоприятное сочетание этих факторов. Очень часто термальная вода, имеющая достаточно большой дебит, имеет низкую температуру. Поэтому термальная вода с высокой температурой может быть использована для подогрева вышележащих слабоминерализованных вод с низкой температурой. Такой подогрев может быть осуществлен с помощью теплообменников, расположенных на поверхности или сконструированных внутри самой скважины, а для повышения температуры вторичного теплоносителя (обычная пресная вода) могут быть использованы теплонасосные установки (ТНУ). При этих условиях роль использования низкопотенциальных термальных вод в качестве промежуточных теплоносителей возрастает, и они будут играть в геотермальной энергетике не меньшую роль, чем высокопотенциальные термальные воды.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Технологии освоения геотермальных ресурсов осадочных бассейнов/ Материалы Международной конференции ИПГ ДНЦ РАН «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2005, т.1, с.173-185.
2. *Белан С.И., Панич Л.Н., Гусейнов Н.М.* Оценка перспектив использования геотермальных вод Юга России / Материалы Международной конференции ИПГ ДНЦ РАН «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2005, т.1, с.166-170.
3. *Калинин М.И., Кудрявцев Е.П.* Энергообеспечение регионов России с использованием ресурсов приповерхностной геотермии и грунтовых тепловых насосов/ Материалы Международной конференции ИПГ ДНЦ РАН «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2005, т.I, с.144-153.
4. *Курбанов М.К.* Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001. 206с.
5. Проблемы геотермальной энергетики Дагестана / Под ред. Амирханова Х.И. и Ятрова С.Н. М., Недра, 1980. 208с.
6. *Черменский Г.А.* Геотермия. М., Недра, 1972.
7. *Шпильрайн Э.Э.* Проблемы и перспективы возобновляемой энергии в России / Перспективы энергетики, 2003, т.7, с.393-403.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Рафикова Ю.Ю.[1], Тетерина Н.В.[2]

МГУ имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, НИЛ ВИЭ;
Москва, Россия, 119991, Воробьевы горы, 1, стр.19; e-mail: [1]ranel@pochta.ru,[2]ninok.net@gmail.com

Первостепенной задачей при осуществлении проектов по возобновляемой энергетике (ВЭ) в России наряду с решением технологических и технических задач является оценка возможности и эффективности использования ВИЭ для энергообеспечения регионов [1,2]. Для её решения необходимы обширные массивы, охватывающие как природные ресурсы территории, так и экономические характеристики региона (инфраструктура энергетики, энергетические балансы, линии электропередач и проч.). Становится необходимым привлечь такие инструменты анализа, которые позволяли бы собирать, хранить, дополнять и преобразовывать эти массивы данных, отображать их; путем всестороннего анализа получать на их основе обоснованные оценки и делать расчеты. Для решения столь комплексной проблемы необходимо применение инструментария геоинформационных технологий – в частности, осуществление геоинформационного картографирования.

В данной работе более подробно рассмотрено геоинформационное картографирование геотермальных ресурсов.

За рубежом уже имеется достаточно обширный опыт использования ГИС-технологий в области возобновляемой энергетики. Энергетические компании широко используют геоинформационные системы для разработки проектов, а некоторые их продукты, в виде атласов и ГИС-проектов, доступны в Интернете.

Проанализированные нами иностранные карты геотермальных ресурсов по охвату территории можно разделить на:

- региональные (например, Карта геотермальных данных по Орегону [1]);
- национальные (Геотермальная карта Северной Америки [2]);
- глобальные (Распределение мировой геотермальной энергии по странам в гигаватт*час [3]).

По типу отображаемой информации можно выделить:

- карты расположения проектов геотермальной энергетики (Карта геотермальных проектов и ресурсных площадей США [4]);
- карты гидротермальных месторождений и перспективных глубоких геотермальных систем (Карта ресурсного потенциала США [5]);
- карты распределения температур и глубины залегания геотермальных месторождений (Карта геотермальных ресурсов США на Google.org, [6]);
- карты распределения температур на глубине (карта распределения температур на глубине с мощностями осадочного чехла для территории США [7]);
- карты расположения геотермальных источников [8].

В России информация по геотермальным ресурсам на данный момент имеет разрозненный характер, и для отображения и оценки геотермальных ресурсов необходимо проделать обширную работу. Нами была проделана работа по геоинформационному картографированию для одного из самых перспективных, в плане развития геотермальной энергетики, регионов России.

Перед нами была поставлена задача сбора, анализа и структурирования данных по геотермальным ресурсам Камчатки с точки зрения их хозяйственного

использования. Для подготовки базы данных, подробной характеристики потенциала системы геотермальных месторождений Камчатки были собраны, проанализированы и систематизированы фондовые материалы, значительная часть которых была использована для построения тематических карт и проведения анализа возможности энергоснабжения на основе геотермальных месторождений выделенного района Камчатского края – Усть-Большерецкого. Также использовались карты полезных ископаемых и пояснительные материалы (пояснительные записки) к ним. Например, для Камчатского края основными картографическими источниками данных выступали:

- Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб 1:500000 // Под редакцией Ивановой Г.Ф., Котельниковой И.В., Пежемской Н.П. 2007;
- Карта термоминеральных источников и геотермальных ресурсов Камчатки. Масштаб 1:1500000//Коллектив авторов. П-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2006 и др.

Оценка геотермальных ресурсов является не простым расчётом ресурсной базы на данной площади, а требует оценки той части ресурсной базы, которая может быть добыта при определённых экономических условиях. Следовательно, оценка геотермальных ресурсов зависит от множества факторов, которые можно сгруппировать следующим образом:

- геологические и физические факторы, включающие: распределение температур и удельной теплоёмкости пород; общую и эффективную пористость; проницаемость; схему циркуляции флюидов; флюидные фазы (пар или вода); глубина резервуара;
- технологические факторы, включающие буровые технологии; метод извлечения геотермальной энергии (посредством природных флюидов (теплоносителей), или за счёт термогидравлических контуров); способ конверсии тепловой энергии в электрическую; факторы, связанные с прямым использованием тепла; возможность многоцелевого использования извлечённых флюидов; методы удаления отработанных газов и воды;
- экономические факторы, включая себестоимость тепловой и электрической энергии, полученной при эксплуатации месторождения; стоимость различных элементов системы утилизации отходов производства энергии; экономическая эффективность многоцелевых проектов геотермальной энергетики; себестоимость заменяемого энергоносителя; капитальные затраты;
- общие факторы, включающие законодательное регулирование; возможность использования других местных энергоресурсов; национальная и региональная энергетическая политика; социальные факторы; экологические ограничения.

Наиболее значимыми обобщающими работами по современной геотермальной энергетике России, в том числе по ресурсной базе, являются труды О.А. Поварова и Г.В. Томарова [15]. Тема районирования территории России по объемам запасов геотермальных ресурсов разработана Белоусовым В.И. в труде "Геотермальные ресурсы" [10]. В ней, в частности, приведён подробный обзор методов оценки потенциала геотермальных ресурсов.

В монографии "Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии" рассмотрены условия формирования различных видов геотермальных источников, методы оценки их запасов; физико-химические свойства термальных вод северокавказского региона, научно-технические проблемы освоения геотермальных ресурсов [9]. Особое внимание уделяется прогнозным ресурсам геотермальных месторождений в перспективных регионах

России. Также подробно освещается тема применения различных технологией использования геотермальных ресурсов в хозяйственной деятельности.

В 1972 году был выпущен труд "Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки", который весьма полно отражает широкий круг вопросов использования геотермальных ресурсов Камчатки, как региона РФ, наиболее богатого и освоенного с точки зрения использования геотермальных месторождений [12]. Вопросы геохимии термальных ресурсов РФ основательно рассмотрены в монографии " Геохимия термальных вод областей современного вулканизма" [11]. Результаты изучения бальнеологических характеристик камчатских термальных вод отражены в работе "Камчатка – край лечебный " [13]. Широкий спектр результатов экспедиционных исследований представлен в трудах Пийпа Б.И [14].

На основе вышеперечисленных и фондовых материалов были подготовлены таблицы, отражающие различные аспекты и характеристики геотермальных месторождений Камчатки. Эти таблицы рассматривались как основа базы данных, позволяющей проводить анализ возможностей комплексного использования геотермальных ресурсов территории. При этом важным для целей рационального природопользования представлялось, с одной стороны, именно комплексность такого использования, а с другой стороны, преодоление возможного конфликта природопользования в связи с наличием на территории Камчатки значительного количества ООПТ. В результате нами была выбрана следующая структура представления исходного материала.

I. Особенности расположения геотермального месторождения
1. Координаты месторождения
2. Положение геотермального месторождения в рамках административного деления территории
3. Положение геотермального месторождения относительно особо охраняемых природных территорий
4. Принадлежность месторождения определенной геотермальной провинции
5. Высота месторождения над уровнем моря

II. *Энергетические характеристики месторождений*
1. Классификация месторождений по температуре (низко-, средне- и высокопотенциальные)
2. Суммарный дебит скважин месторождения
3. Максимальная температура на выходе вод из скважины
4. Прогнозные параметры потенциальных ресурсов (объема) термальных вод
5. Прогнозные параметры температуры термальной воды на глубине

III. *Геохимические характеристики месторождений*
1. Количество проявлений (источников) месторождения и характеристики их истечения
2. Минерализация, классификация по минерализации
3. Величина pH и классификация по pH
4. Бальнеологические характеристики вод

IV. *Характеристики функционирования месторождений*
1. Направления современного использования (или отсутствие использования)
2. Уровень и особенности подготовленности и использования (или предполагаемого использования) месторождения

При обосновании выбранного способа структурирования данных очевидным являлась необходимость обозначения положения месторождений как относительно административных границ районов, так и относительно территорий

ООПТ. Следует отметить трудности определения точного географического положения месторождений (координаты) вследствие нескольких факторов, в частности, неточности координат, указанных в некоторых исходных материалах, режима ограниченного доступа к данным по координатам таких объектов и проч. Эта задача была решена комплексно как путем оцифровывания имеющихся различных тематических карт, так и путем анализа описаний месторождений.

Для целей исследований, безусловно, необходимым являлось представление данных о термических и – шире – энергетических характеристик геотермальных месторождений. Эти данные позволили сделать предварительные оценки о возможном направлении энергетического использования месторождений (для получения тепловой или электрической энергии). Геохимические характеристики месторождений позволили также оценить как особенности их предполагаемой эксплуатации (в части проблем, связанных с коррозией), так и бальнеологическую значимость месторождений.

Весьма важными в рамках данного исследования являлись собранные и структурированные материалы о подготовленности месторождений к эксплуатации, современном использовании и перспективных областях эксплуатации.

Структурированные по этой схеме данные были представлены в виде Excel-таблиц. В силу недостаточности исходных данных этот массив требует дальнейшего пополнения и конкретизации, однако позволяет уже на данном этапе проводить первичный тематический анализ и представлять данные в наглядном картографическом виде. На основе полученных и структурированных материалов с использованием программы MapInfo были подготовлены карты расположения геотермальных месторождений Камчатки и их значимых характеристик.

В настоящее время в связи с энергетическими и социально-экономическими проблемами Камчатки все более значимой становится комплексное использование местных ресурсов, из которых наиболее перспективными для целей энергетики и бальнеологии являются геотермальные. Поэтому необходимым является сбор и систематизация накопленных данных не только с позиций геологии; становится необходимым изучение возможностей использования геотермальных ресурсов с учетом сложившейся системы природопользования на Камчатке (в том числе с учетом структуры энергосистемы, потребления энергии и др.). В работе был собран, проанализирован и структурирован обширный материал комплексного изучения геотермальных ресурсов Камчатки, отражающий геологические, физико-химические, энергетические и другие характеристики. Полученные данные послужили основой для проведенного анализа возможностей энергообеспечения Усть-Большерецкого района Камчатского края на основе использования геотермальных ресурсов.

Осуществленная в данной работе схема геоинформационного картографирования геотермальных ресурсов в настоящий момент дорабатывается и подготавливается для тиражирования на остальные регионы России.

Литература:

1. http://www.oregongeology.org/sub/gtilo/
2. http://smu.edu/geothermal/2004NAMap/2004NAmap.htm
3. http://geothermal.marin.org/geomap_1.html
4. http://geoheat.oit.edu/dusys.htm
5. http://www.nrel.gov/gis/geothermal.html
6. http://www.google.org/egs/

7. http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/hot_springs/
8. https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt?open=512&objID=422&&PageID=3487&mode=2&in_hi_userid=200&cached=true
9. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 376 с.
10. Геотермальные ресурсы. Белоусов В.И., Постников А.И., Мельников Д.В., Белоусова С.П. учебно-методические пособие. Петропавловск-Камчатский: Издательство КГПУ. 2005. 105 с.
11. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма / В. И. Кононов. М.: Наука. 1983. 216 с.
12. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки / отв. ред. В. М. Сугробов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 284 с.
13. *Лодис Ф.А., Семенов В.И.* Камчатка – край лечебный / Петропавловск-Камчатский: Дальневост. кн. изд-во, 1993. 152 с.
14. *Пийп Б.И.* Термальные ключи Камчатки // Тр. СОПС АН СССР. Сер. Камчатская. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. Вып. 2. 268 с.
15. *Поваров О.А., Томаров Г.В.* Развитие геотермальной энергетики в России и за рубежом. // Теплоэнергетика. 2006. № 3. С.2-10.

ОЦЕНКА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ

Мамаев Б.О., Мамаев О.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: o_mammaev@rambler.ru

На примере геотермальных месторождений Дагестана, расположенных вблизи крупных населенных пунктов и промышленных объектов, на основе созданных геолого-физических моделей проведена региональная оценка теплоэнергетического потенциала петротермальных и гидротермальных ресурсов осадочной толщи. Величина потенциальной энергии, заключенной в объеме осадочных пород как в «физическом теле» сечением 1 км2 и мощностью до 5-5,5 км, составляет до 40-50 млн. ТУТ, а величина гидротермальной энергии пластовых вод без учета упругих запасов – до 10 млн. ТУТ.

В результате роли процессов радиотеплогенерации в осадочной толще за счет распада естественных радиоактивных элементов (урана, тория, калия) установлено, что вклад этих процессов в горных породах до глубины 5 км в образование наблюдаемого на поверхности теплового потока составляет около 10%, или 6-7 мВт/м2 . Проведенный анализ составляющих теплового потока на основе геолого-физических моделей земной коры для геотермальных месторождений Дагестана показал решающую роль в формировании величины теплового потока глубинных консолидированных слоев земной коры и мантийной составляющей, а также тектономагматической истории развития данного региона.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА) по состоянию на 2002 год доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировом энергетическом балансе составляют 13,60%. в составе возобновляемых источников энергии по своим потенциальным ресурсам и темпам освоения значительное место занимают геотермальная энергия недр Земли. Интерес специалистов к ВИЭ и в частности к геотермальной энергии в связи с постоянным повышением цен на нефть и газ и прогнозируемым истощением этих традиционных углеводородных источников в последние годы неуклонно растет.

Если не считать гидроэнергию рек и в настоящее время (по данным МЭА 2000г.) использование геотермальной энергии занимает около 60 % среди неорганических ВИЭ.

На всемирных геотермальных конгрессах (Япония, 2000г., Турция, 2005г.) отмечалось, что использование геотермального тепла Земли в XXI в. Достигнет 30% в мировом энергетическом балансе, а по самым оптимистическим прогнозам, даже 80% [1, 2].

Главными преимуществами геотермальной энергии при ее комплексном и рациональном использовании в народном хозяйстве являются: практическая неисчерпаемость и возобновляемость, экологическая чистота, доступность и наличие практически повсеместно на Земле.

К странам, где относительно широко используется геотермальная энергии для производства электроэнергии и тепловой энергии относятся Филиппины, Сальвадор, Никарагуа, Исландия, новая Зеландия, Индонезия и другие.

Под использованием геотермальной энергии до последнего времени, прежде всего, подразумевались освоение природных гидротермальных ресурсов. И большинство исследовательских работ в этой области были направлены на изучение формирования и оценки запасов геотермальных пластовых вод. Однако

гидротермальные ресурсы, хотя природные воды очень хорошие теплоносители с большой удельной теплоемкостью, составляют только небольшую часть потенциальной геотермальной энергии земной коры. Под геотермальными ресурсами в настоящее время понимается избыточная по отношению к температуре нейтрального слоя тепловая энергия, заключенная в твердой, жидкой и газообразной составляющих земной коры на глубинах, доступных современной технике бурения и освоения.

Между тем геотермальное тепло, аккумулированное твердыми горными породами земной коры при среднем геотермическом градиенте (3º С на 100 м), плотности 2,7 т/м^3 и теплоемкости 0,25 ккал/кг·град. до глубины 8 км в пределах суши Земли оцениваются примерно $2 \cdot 10^{23}$ ккал (А.Н. Щербань и др., 1974).

Для сравнения тепловой поток со всей поверхности Земли оценивается в $2 \cdot 10^{17}$ ккал/год при среднем значении теплового потока 50 мВт/м^2. А суммарная теплотворная энергия всех мировых запасов угля, нефти, газа и других видов топлива оценивается примерно $4 \cdot 10^{19}$ ккал (И.Д. Дергунов, 1959).

Эти цифры показывают, какое колоссальное количество геотермальной энергии заключено только в верхней части земной коры.

Но на современном уровне развития научно-технической базы и технологии извлечения и утилизации, возможно, только освоить лишь небольшую часть этого практически неисчерпаемого источника энергии.

Что касается изучения и освоения геотермальных, в частности, гидротермальных ресурсов, то район исследований – Восточное Предкавказье является наиболее изученным и перспективным районом по этим ресурсам. В частности в Дагестане, начиная с 60-х гг., широко применяются гидротермальные ресурсы для горячего водоснабжения и отопления в городах и в населенных пунктах (Махачкала, Кизляр, Избербаш, Терекли-Мектеб, Червленная и др.)

Была проведена с участием автора оценка [4] региональных запасов, ресурсов и теплоэнергетического потенциала термальных вод Восточно-Предкавказского артезианского бассейна по водоносным комплексам.

Использование гидротермальных ресурсов на всей территории Восточного Предкавказья в районах удаленных от промышленных объектов и населенных пунктов, практически, маловероятно, хотя оценка этих ресурсов показывает их значительные масштабы. Поэтому проведенная оценка этих ресурсов скорее имеет прогнозное и теоретическое значение.

Нами в данной работе ставилась задача оценить потенциальную тепловую энергию гидротермальных и петротермальных ресурсов на конкретных геотермальных месторождениях вблизи крупных населенных пунктов и промышленных объектов для последующей их рекомендации для использования и комплексного освоения в народном хозяйстве.

Следует отметить, что работы по оценке и изучению геотермальной энергии, заключенной в горных породах осадочной толщи (петротермальной энергии) по району исследований ранее не проводились. Нами не ставилась задача в данной работе по исследованию технологических вопросов по извлечению и утилизации геотермальной энергии осадочной толщи районов исследований.

Одновременно нами оценивалась и роль процессов радиотеплогенерации за счет распада естественных радиоактивных элементов (урана, тория, калия) в осадочной толще геотермальных месторождений в образовании фиксируемого на поверхности теплового потока.

Для постановки вышеуказанных исследований нами были выбраны

наиболее перспективные по оценке специалистов [8] геотермальные месторождения Предгорного и Равнинного Дагестана: Махачкала –Тернаир, Кизляр, Избербаш, Каякент, Берикей, Талги, Тарумовка, пл. Южно-Буйнакская.

В силу относительной однородности геологического строения и литологического состава осадочной толщи района исследований полученные величины оценок геотермальной энергии этих месторождений можно распространить и на другие районы Восточного Предкавказья с известными допущениями.

Для оценки потенциальной тепловой энергии петротермальных и гидротермальных ресурсов геотермальных месторождений нами выбрана простая геолого-физическая модель осадочной толщи с известными теплофизическими параметрами горных пород и литолого-стратиграфическим строением.

Для каждого литолого-стратиграфического слоя потенциальную петротермальную энергию сухой горной породы оценивали по формуле

$$Q_{c.n} = C \cdot t \cdot V_n \cdot \rho \,, \qquad (1)$$

где $Q_{c.n}$ – потенциальная тепловая петротермальная энергия сухой породы в Дж;

C – удельная теплоемкость горной породы, $\frac{Дж}{кг \cdot {}^0C}$;

V_n – объем горной породы, м^3;

ρ – удельная плотность породы, кг/м^3;

t – средняя температура пласта.

Объем горной породы определяется по выражению

$$Vn = \frac{100 - Kn}{100} \cdot V \,, \qquad (2)$$

где V – полный объем, занимаемый породой весте с породами;

K_n – коэффициент пористости;

Объем для каждого пласта

$$V = a \cdot b \cdot h \,, \qquad (3)$$

где a и b – длина и ширина пласта, м;

h – мощность пласта.

Так как, в осадочной толще мы имеем дело с водонасыщенными породами, то отдельно определяли потенциальную тепловую энергию пластовых вод по формуле

$$Q_{п.в.} = C_в \cdot t \cdot V_{пор} \cdot \rho \,, \qquad (4)$$

где $C_в$ – теплоемкость пластовых вод, нами принята равной 4,18 ·10 $\frac{Дж}{кг \cdot {}^0C}$;

t – средняя температура пластовой воды, ^{0}C;

ρ – удельная плотность воды, нами принята равной $10^3 \cdot$кг/м^3;

$V_{пор}$ – объем пор

$$V_{пор} = \frac{K_п}{100} \cdot V \,, \qquad (5)$$

где V – полный объем породы вместе с порами.

Полную потенциальную петротермальную и гидротермальную энергию заключенную в осадочной толще определяли как суммарную по всем литолого-стратиграфическим слоям по всей расчетной глубине литологической колонки.

Для расчета величины радиотеплогенерации в осадочной толще за счет распада естественных радиоактивных элементов (урана, тория, калия) в горных

породах и сравнения результатов с литературными данными здесь нами принята формула (Birch et al., 1968)

$$A = 0{,}133\rho(0{,}73U + 0{,}20Th + 0{,}27K), \qquad (6)$$

где A – генерация тепла, мкВт/м^3;

ρ – удельная плотность пород, г/см^3;

U, Th, K – содержания в горных породах для урана и тория г/т, а для калия в % весовых.

Расчет величины радиотеплогенерации нами производился по методу послойного определения радиотеплогенерации (ПОРТ) согласно [6].

Суммарный вклад процессов радиотеплогенерации в осадочной толще в наблюдаемый на поверхности тепловой поток местности оценивался, просуммировав по каждому литолого-стратиграфическому слою величину радиотеплогенерации $\sum_i^n A_i \cdot h_i$.

В качестве расчетных ячеек для оценки величины потенциальной петротермальной и гидротермальной энергии нами принимались объемы осадочных пород на геотермальных месторождениях, соизмеримые, как правило, по территории с населенным пунктом месторасположения, как для г. Кизляра к примеру площадью 5х5 км и мощностью 5 км.

Для относительной оценки геотермальной энергии в Прикумской зоне нами была выбрана промысловая площадь с опорной скважиной Южно-Буйнакская 1, по которой были достаточно полные литоло-гические и теплофизические данные. Результаты полученных расчетных данных для каждого месторождения, где были поставлены эти исследования, приведены в табл. 1. В качестве расчетных ячеек выбирались объемы осадочной толщи геотермальных месторождений площадью сечения 1 км^2 и мощностью до 5 км и более. Для описания геологического строения месторождений обращались к источникам [5, 7].

По результатам проведенных исследований на геотермальных месторождениях Дагестана на основе, созданных геолого-физических моделей, потенциальная петротермальная энергия, заключенная в расчетных ячейках осадочной толщи площадью сечения 1 км^2 и мощностью до 5 км, составляет в среднем величину, эквивалентную 40,0 млн. тонн условного топлива (ТУТ), а гидротермальная энергия -около 10 млн. ТУТ. Необходимо отметить, что приводимые цифры оценивают потенциальную тепловую энергию, заключенную в объеме осадочных пород как в «физическом теле», из которого возможно извлечь только определенную часть, в зависимости от применяемого технологического метода.

На исследованных геотермальных месторождениях установлено, что доля радиогенной составляющей осадочной толщи мощностью до 5 км в наблюдаемом на поверхности тепловом потоке равняется в среднем 10% или 6-7 мВт/м^2.

Таким образом, проведенные нами оценки потенциальных геотермальных ресурсов на конкретных месторождениях Дагестана показывают, что этот вид источников возобновляемой энергии альтернативной традиционным углеводородным источникам, имеет колоссальные практически неисчерпаемые запасы. Задача с их комплексным освоением заключается только в выработке современных геотехнологических, экологически рациональных приемов и технических решений с использованием таких средств, к примеру, как тепловые насосы и других современных технических решений, изучение и описание

которых не входит в тему данной работы.

Таблица 1. Теплоэнергетический потенциал осадочной толщи геотермальных месторождений Дагестана.

№ п/п	Название месторождения (мощность изученной осадочной толщи, м)	Петротерм.энергия Qc.n п 10^{14}Дж	Гидротерм, энергия Оп.в. 10^{14}Дж	Тегш. поток от радиотеплогенерации q рад. мВт/м^2	Тепл. поток на местности q мВт/м^2
1.	Южно-Буйнакская, скв. 1 (4760)	8164,2	3558,8	6,80	73,6
2.	Кизлярское месторождение (5000)	10418,0	2717,0	5,79	63,0
3.	Каякентское месторождение (5000)	10849,9	3146,7	6,13	62,0
4.	Избербашское месторождение (5000)	11324,0	2464,0	6,33	–
5.	Тарумовка (5440)	28657,0*	3349,8	6,82	74,0

* - коэффициент теплоемкости для горных пород принят как для водонасыщенных.

Литература:

16. *Huttrer G.W.* The status of word geothermal power generation, 1995-2000//Proc. Of the Word geothermal congr., 2000. Hyushu-Tohoku, Japan, May 28 – June 10. Tohoku, 2000. Vol. 1. P. 23-27.
17. *Lund J.W.*, *Freeston D.H.* Word-wide direct uses of geothermal energy, 2000//Jbid. P. 1-21.
18. *Маврицкий Б.Ф.* Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. М., Наука, 1971. 242 с.
19. *Курбанов М.К.* Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М., Наука, 2001. 260 с.
20. *Мирзоев Д.А.*, *Шарафутдинов Ф.Г.* Геология месторождений нефти и газа Дагестана. Махачкала, Дагкнигоиздат, 1986. 317с.
21. *Боганик Н.С.* Радиогенное тепло земной коры Русской платформы и ее складчатого обрамления. М., Наука, 1975. 160 с.
22. Геология нефтегазовых месторождения Дагестана и прилегающей акватории Каспийского моря. Шарафутдинов Ф.Г., Мирзоев ДА., Алиев Р.М. и др. Махачкала, Дагкнигоиздат, 2001. 298 с.
23. Проблемы геотермальной энергетики Дагестана. Гаджиев А.Г., Курбанов М.К., Суетнов В.В. и др. М., Недра, 1980. 280 с.
24. *Маммаев О.А.* Подземные воды Восточного Предкавказья (формирование, гидрогеохимия и процессы радиотеплогенерации). Махачкала, ДНЦ РАН, 2006. 280с.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ РАСЧЕТА ТРЕХМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Муфараджев К.К.[1], Кобзаренко Д.Н.[2]

[1]Дагестанский государственный технический университет;
Махачкала, Россия, 367030, пр-т И.Шамиля, 70; e-mail: muf@yandex.ru

[2]Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия, 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: kobzarenko_dm@mail.ru

Обсуждаются программная технология построения и реализация модуля расчета трехмерного распределения температурного поля в рамках системы трехмерного геоинформационного моделирования. Также рассматриваются вопросы визуализации трехмерного поля в системе.

Введение. Единственными достоверными исходными данными, необходимыми для выполнения задачи построения трехмерной модели распределения температурного поля, являются термограммы – зависимости температуры от глубины, полученные на основе измерений в скважинах. Также достоверной является замеренная температура нейтрального слоя. Вся остальная недостающая информация получается путем выполнения интерполяции промежуточных значений и экстраполяции в глубину земной коры.

Для решения данной задачи можно использовать разные подходы, которые зависят от полноты и формы представления исходной информации. Исходная информация может быть представлена, кроме собственно первичного скважинного материала, обработанными данными в виде изолиний температуры на определенных глубинах или изолиний глубины залегания геоизотерм.

Выходными данными в рассматриваемой задаче является трехмерная непрерывная регулярная сеть со значениями температуры в узлах. Параметры трехмерной регулярной сети: X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max} – минимум и максимум в плоскости *XY*, *SpaceXY* – шаг между узлами в плоскости *XY*, Z_{min}, Z_{max} – минимум и максимум по глубине, *SpaceZ* – шаг по глубине.

Расчет трехмерного распределения температурного поля на основе скважинных измерений. Здесь исходными данными являются термограммы, снятые в определенной точке пространства *XY*, которые в цифровом виде представляют массив пар значений: глубина (*d, м*) и температура (*t, °C*) – (d_1, t_1), $(d_2, t_2),\ldots,(d_n, t_n)$ (рис.1). В этом случае алгоритм расчета трехмерной регулярной сети распределения температурного поля состоит в следующем:

1. Начало.
2. Ввод исходных данных: а) термограммы в количестве *k*: $TG_1(X_1,Y_1, d_{11},t_{11}, d_{12},t_{12},\ldots,d_{1n1},t_{1n1})$, $TG_2(X_2,Y_2, d_{21},t_{21}, d_{22},t_{22},\ldots,d_{2n2},t_{2n2}),\ldots$, $TG_k(X_k,Y_k, d_{k1},t_{k1}, d_{k2},t_{k2},\ldots,d_{knk},t_{knk})$, б) параметры трехмерной регулярной сети X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max}, *SpaceXY*, Z_{min}, Z_{max}, *SpaceZ*.
3. Создается дополнительный массив термограмм в количестве *k*: TG_1^0, $TG_2^0,\ldots$, TG_k^0.
4. В массив TG^0 из массива *TG* копируются данные координат скважин (*X,Y*). Для всех термограмм в TG^0 резервируется *n* количество пар (*d, t*), где $n = (Z_{max} - Z_{min}) / SpaceZ + 1$.
5. Для $i = 1\ldots k$ выполняются пп.6-8.
6. Для $Z = Z_{min}\ldots Z_{max}$ с шагом *SpaceZ* выполняются пп.7-8.
7. $j = 1 + Z - Z_{min} / SpaceZ$.

8. В термограмме TG_i^0 определяются значения пары $d_j = Z$, t_j – через подстановку d_j в зависимость $t(d)$, полученную по формуле Лагранжа (1) на основе пар (d,t) из термограммы TG_i.
9. Для $X = X_{min}…X_{max}$ с шагом *SpaceXY* и $Y = Y_{min}…Y_{max}$ с шагом *SpaceXY* выполняются пп.10-12.
10. Для $Z = Z_{min}…Z_{max}$ с шагом *SpaceZ* выполняются пп.11-12.
11. $j = 1 + Z – Z_{min} / SpaceZ$.
12. В узле результирующей регулярной сети (X, Y, Z) рассчитывается значение температуры с помощью двумерной интерполяции по методу инверсных расстояний. В интерполяции участвуют данные: X, Y, t_j из массива термограмм TG^0. Интерполяция выполняется в плоскости XY по текущему срезу Z.
13. Вывод трехмерной непрерывной регулярной сети со значениями температуры в узлах.
14. Конец.

На рис.1 иллюстрируется преобразование исходных данных термограмм TG в TG^0 (пункты 3-8 алгоритма) в соответствии с дискретизацией по Z, заданной в параметрах регулярной сети.

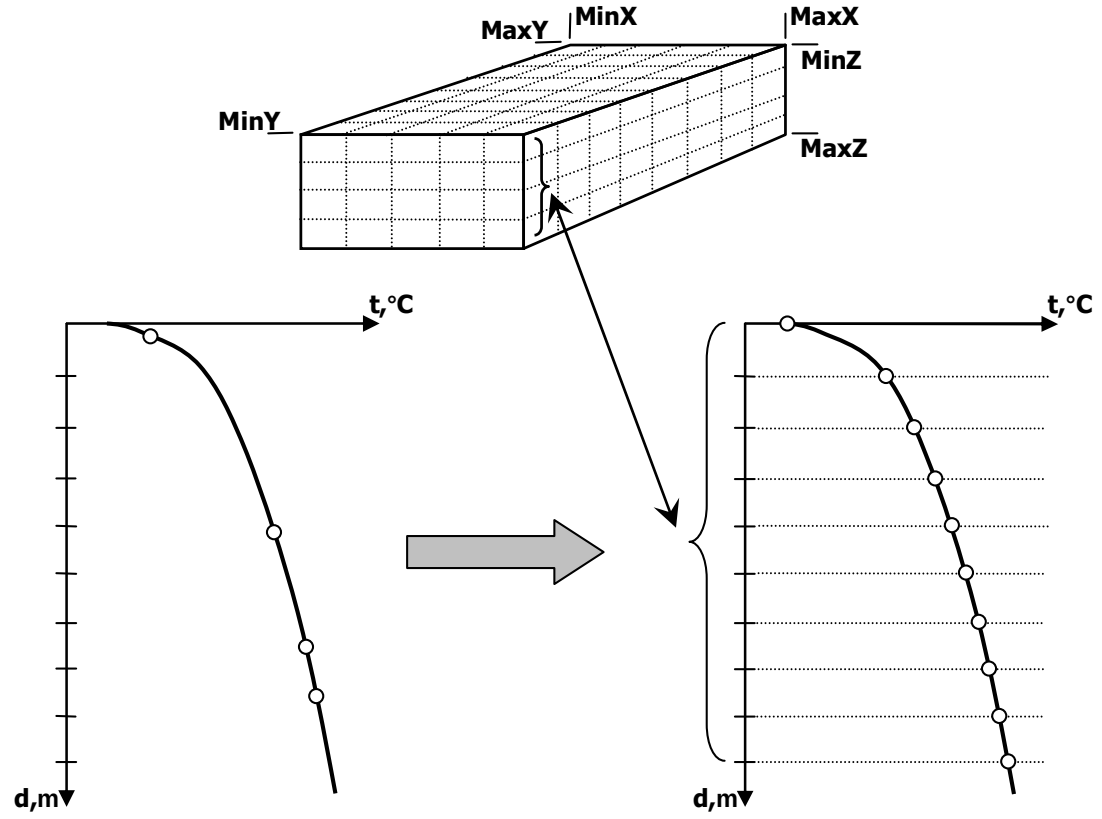


Рис.1. Преобразование исходных данных термограмм в соответствии с дискретизацией по Z результирующей трехмерной регулярной сети

Для выполнения преобразования термограмм используется зависимость $t(d)$, полученная на основе интерполяционного полинома Лагранжа [1]:

$$t(d) = \sum_{i=0}^{n} \frac{(d-d_0)(d-d_1)\cdot\ldots\cdot(d-d_{i-1})(d-d_{i+1})\cdot\ldots\cdot(d-d_n)}{(d_i-d_0)(d_i-d_1)\cdot\ldots\cdot(d_i-d_{i-1})(d_i-d_{i+1})\cdot\ldots\cdot(d_i-d_n)} t_i \,. \quad (1)$$

Расчет трехмерного распределения температурного поля на основе изолиний температуры по глубинам и геоизотерм. В первом случае исходными данными являются изолинии температуры на определенных глубинах (рис.2).

Обычно это карты глубинного распределения температуры, построенные специалистами в данной области.

Алгоритм расчета трехмерной регулярной сети распределения температурного поля на основе изолиний температуры по глубинам состоит в следующем:

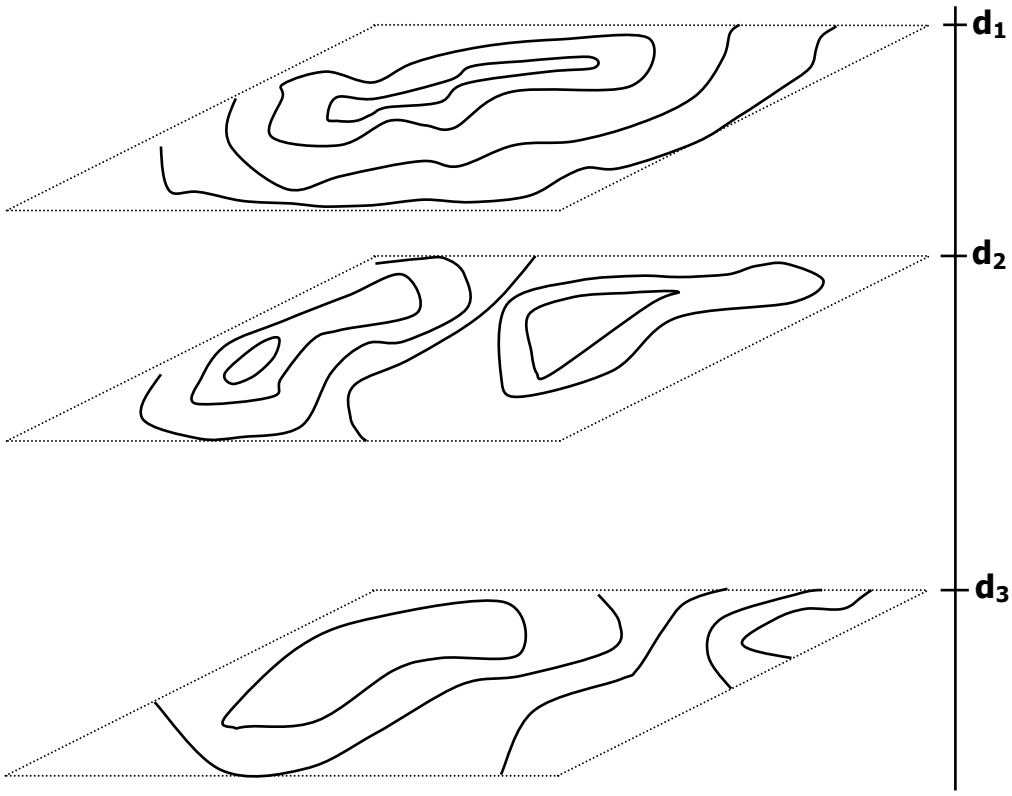


Рис.2. Исходные данные в виде изолиний температуры на определенных глубинах

1. Ввод исходных данных: а) количество слоев k по глубинам, б) глубины слоев (м) d_1, d_2,…, d_k, в) массив изолиний $IS_i[1…n_i]$ для каждого i-го слоя, г) параметры трехмерной регулярной сети X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max}, $SpaceXY$, Z_{min}, Z_{max}, $SpaceZ$. Изолиния имеет атрибуты: t – температура (°C), X_1,Y_1, X_2,Y_2,…, X_m,Y_m – геометрия (полилиния / полигон).
2. Создается массив непрерывных регулярных сетей $R[1…k]$ с параметрами: X_{min}, Y_{min}, X_{max}, Y_{max}, $SpaceXY$.
3. Для $i = 1…k$ выполняется п.5.
4. На регулярной сети R_i выполняется интерполяция по исходным данным температуры изолиний i-го слоя. Результат интерполяции – значения температуры в узлах сети R_i, соответствующей глубине d_i.
5. Для $X = X_{min}…X_{max}$ с шагом $SpaceXY$ и $Y = Y_{min}…Y_{max}$ с шагом $SpaceXY$ выполняются пп.7-9.
6. Определяются коэффициенты интерполяционного полинома Лагранжа (1) для зависимости $t(d)$: d_1, d_2,…, d_k – из исходных данных; $t_1 = R_1(X,Y)$, $t_2 = R_2(X,Y)$,…, $t_k = R_k(X,Y)$ – значения в узлах регулярных сетей R_i.
7. Для $Z = Z_{min}…Z_{max}$ с шагом $SpaceZ$ выполняется п.9.
8. В узле результирующей регулярной сети (X, Y, Z) находится значение температуры на основе зависимости $t(d)$.
9. Вывод трехмерной непрерывной регулярной сети со значениями температуры в узлах.

В другом варианте построения трехмерной модели температурного поля состоит в использовании в качестве исходных данных изолиний геоизотерм. Карты геоизотерм, наряду с картами глубинного распределения температуры, могут быть использованы в случае дефицита исходных данных по скважинам. Данный расчет отличается от предыдущего тем, что здесь температура и глубина меняются местами и алгоритм претерпевает незначительные изменения.

На основе предложенных алгоритмов в рамках системы трехмерного геоинформационного моделирования [2] разработан программный модуль расчета трехмерного температурного поля. Программный модуль выполняет расчет трехмерного температурного модуля, используя в качестве исходных данных изолиний геоизотерм.

Программный модуль имеет слудующие опции входных данных:

1. *Источник данных температуры (°С) нейтрального слоя*. Опция задания ссылки на файл непрерывной регулярной сети со значениями температуры нейтрального слоя в узлах.
2. *Количество геоизотерм*. Опция задания количества геоизотерм *n*.
3. *Источник данных глубины (м) залегания геоизотермы №1*. Опция задания ссылки на файл непрерывной регулярной сети со значениями глубины залегания первой геоизотермы в узлах.
4. *Температура (°С) геоизотермы №1*. Опция задания значения температуры первой геоизотермы.

3+2n-2. *Источник данных глубины (м) залегания геоизотермы №n*. Опция задания ссылки на файл непрерывной регулярной сети со значениями глубины залегания последней геоизотермы в узлах.

3+2n -1. *Температура (°С) геоизотермы №n*. Опция задания температуры последней геоизотермы.

4+2n. *Глубина расчета (м)*. Опция задания максимальной глубины расчета температурного поля.

5+2n. *Шаг по глубине (м)*. Опция задания шага для трехмерной непрерывной регулярной сети температурного поля.

6+2n. *Имя файла результата*. Опция задания имени файла результирующей структуры данных «Непрерывная регулярная сеть».

7+2n. *Генерация файла результата*. Кнопка «Выполнить» запускает генератор на выполнение.

Глубина расчета и шаг по глубине влияют на объем результирующих данных, поэтому выбирать эти параметры следует еще и, исходя из возможностей вычислительных ресурсов.

С помощью разработанного программного модуля выполнено моделирование распределения трехмерного температурного поля на территории Дагестана. Для расчета использовались известные карты глубины залегания геоизотерм 100,160,200°С [3] и температуры нейтрального слоя [4]. Построение трехмерного температурного поля выполнено до глубины 5000м. Моделирование выполнено с уровнем генерализации регулярных сетей по *XY* – 250м. Шаг по глубине выбран, равным 50м. Визуализация полученной модели температурного поля до 5000м в СТГМ представлена на рис.3.

Заключение. Разработанный программный модуль построения модели трехмерного распределения температурного поля является одним из основных звеньев системы трехмерного геоинформационного моделирования. Он позволяет решать задачи, связанные с распределением геотермальных энергоресурсов региона.

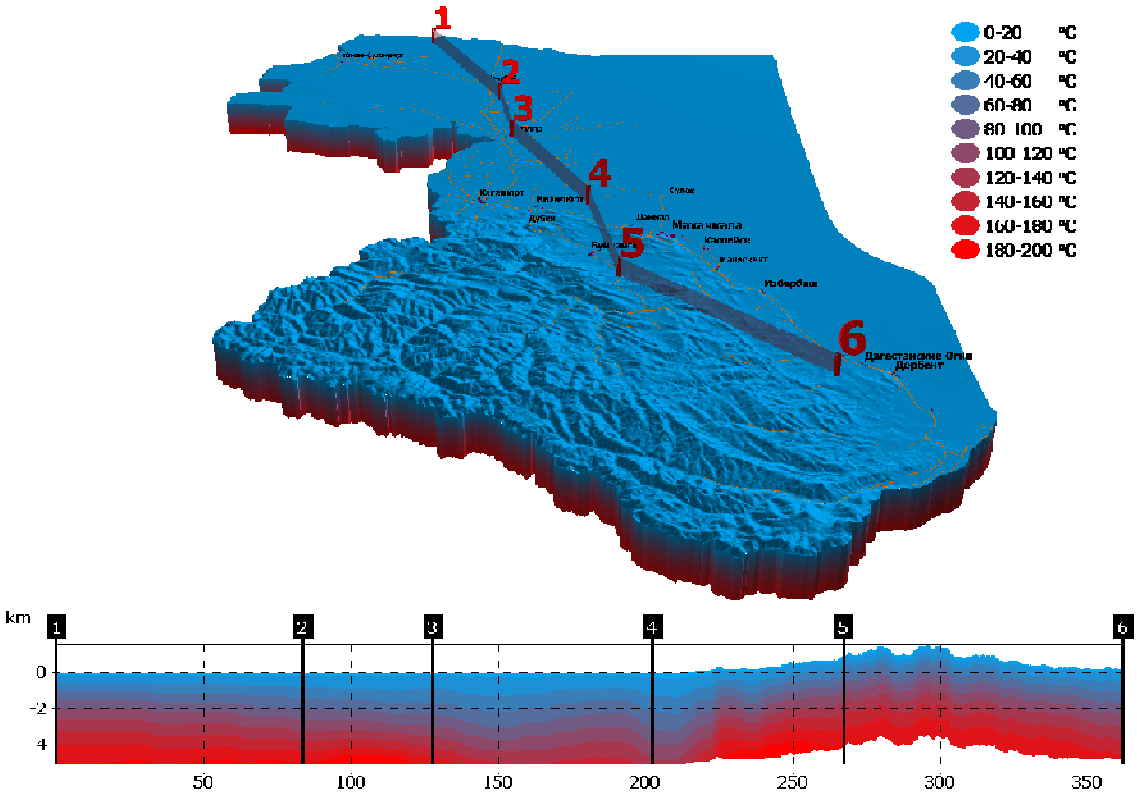


Рис.3. Визуализация модели трехмерного температурного поля до 5000м в СТГМ

Литература:

1. *Колдаев В.Д.* Численные методы и программирование: учебное пособие / Под ред. Проф. Л.Г.Гагариной. – М.: «Форум»: ИНФРА-М, 2008. 336с.
2. *Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н.* Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии. 2009. №11. С.32-36.
3. *Курбанов М.К.* Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001. 260с.
4. *Амирханов Х.И., Суетнов В.В., Левкович Р.А., Гаирбеков Х.А.* Тепловой режим осадочных толщ. Махачкала, 1972. 230с.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ РЕГУЛЯРНОЙ СЕТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ С МЕТЕОСТАНЦИЙ

Гаджимурадов Р.Н.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Россия, Махачкала; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ipg_sun@mail.ru

Рассмотрены вопросы геоинформационного моделирования продолжительности солнечного сияния на территории Республики Дагестан. Описан формат хранения метеорологических данных и разработан модуль системы трехмерного информационного моделирования, осуществляющий импорт данных с метеорологических станций, их векторизацию и вычисление регулярной сети распределения продолжительности солнечного сияния.

Одним из основных показателей, позволяющих определить потенциал солнечной энергии района или местности, является продолжительность солнечного сияния, т.е. освещённость земной поверхности прямыми солнечными лучами. Поток солнечной энергии, образованный прямыми лучами солнца, называется «прямой радиацией». В ясный день продолжительность солнечного сияния практически совпадает с продолжительностью светового дня. Именно от продолжительности солнечного сияния зависит эффективность энергоустановки, поскольку объем поступающей солнечной энергии может отличаться на порядок – при ясном солнце мощность солнечного излучения может достигать 1000 Вт/м^2, при облачности может быть 100 Вт/м^2 и менее.

Как известно, продолжительность солнечного сияния измеряют с помощью гелиографа, которым снабжены почти все метеорологические станции мира, в том числе станции, находящиеся на территории Республики Дагестан и близлежащих регионов

С сожалением стоит отметить, что охват территории республики метеостанциями недостаточный – всего 10 метеостанций, особенно слабо охвачена горная часть территории республики. Но преимуществом моделирования потенциала солнечной энергии является то, что в отличие от других видов ресурсов (топливных, геотермальной энергии, ветра и т.д.) он имеет очень хорошую географическую равномерность. Т.е. если у нас есть данные в двух географических точках на небольшом расстоянии друг от друга, можно легко оценить потенциал точек между ними с помощью интерполяции. Поэтому для более полного охвата территории и более точной оценки были использованы данные и с ближайших метеостанций сопредельных регионов - Рощино, Лагодехи, Кварели и Закатала.

Ранее продолжительность солнечно сияния на территории Республики Дагестан уже моделировалась, в том числе были построены соответствующие карты (см. [1]). При построении карт использовалась система трехмерного геоинформационного моделирования (СТГМ), которая позволяет автоматизировать процесс моделирования, построения и визуализации карты благодаря готовым модулям. [2, 3] Однако, в процессе моделирования и построения различных карт быстро выяснились недостатки этого подхода, а именно: необходимость повторного выполнения некоторых действий и этапов, необходимость использования нескольких модулей (отдельных exe-файлов), сложность для неподготовленного пользователя. Поэтому для их устранения и

повышения производительности работы было решено разработать отдельный готовый модуль, позволяющий выполнить все необходимые этапы моделирования и построения карты.

Моделирование и построение карты с помощью СТГМ выглядит следующим образом. В первую очередь загружаются и обрабатываются данные о продолжительности солнечного сияния, полученные с метеостанций. Отдельно стоит отметить, что данные с метеостанций хранятся в отдельных файлах (для каждой метеостанции) за весь выбранный период времени – т.е., если понадобится оценить потенциал солнечной энергии за разные периоды – скажем, за период с весны по осень и в среднем за год, весь цикл моделирования придется повторить заново.

Затем задаются координаты метеостанции во внутренней системе координат объекта моделирования. Следующим шагом выполняется импорт и векторизация данных измерений, которые сохраняются в базу рабочих данных (БРД) системы для последующего использования (визуализации, интерполяции и т.д.).

После этого осуществляется построение регулярной сети, в узлы которой заносятся значения средней продолжительности солнечного сияния, вычисленные интерполяцией методом инверсных расстояний [4] или методом кригинга [5], и вычисленная регулярная сеть также сохраняется в БРД. Для визуализации полученной регулярной сети выполняется ее текстурирование (раскраска с разбиением на диапазоны) и полученная «раскрашенная» регулярная сеть сохраняется в базу визуальных данных (БВД) и становится доступной для визуализации.

Таким образом, примерная схема и последовательность действий при моделировании и построении карты отображена на рис.1.

Рис.1. Стандартная схема моделирования и построения карты с помощью СТГМ.

В результате моделирования в главном модуле можно визуализировать трехмерную карту, примерный вид (без самого окна главного модуля СТГМ) которой изображен на рис.2.

Очевидно, что последовательность действий слишком длинная, сложная и трудоемкая, что усложняет процесс моделирования, особенно для неподготовленных пользователей. Кроме того, как уже было сказано, моделирование и построение карт за различные периоды времени также усложняется, поскольку приходится некоторые этапы выполнять повторно. Поэтому была придумана другая схема, менее универсальная, но более простая и удобная, которая отображена на рис.3.

Распишем ее более подробно. В первую очередь, нужно отметить, что новый модуль позволяет загружать данные измерений как из одного объединенного файла (аналогично предыдущей схеме), так и из нескольких файлов, каждый из которых будет автоматически обработан как файл данных измерений отдельной метеостанции (в соответствии с форматом данных, предоставляемым Институтом Космических Исследований Российской Академии Наук). Это позволяет избежать ручной обработки («сведения») данных в единый файл текстовым или табличным редактором.

Координаты метеостанций задаются в географических единицах (минуты, секунды), которые автоматически приводятся к внутренней системе координат объекта моделирования. Далее выполняется импорт данных измерений, их векторизация и немедленное (без промежуточного сохранения результатов в файл) построение регулярной сети, значения узлов которой вычисляются выбранным методом интерполяции.

Рис.2. Карта среднегодовой продолжительности солнечного сияния на территории Республики Дагестан.

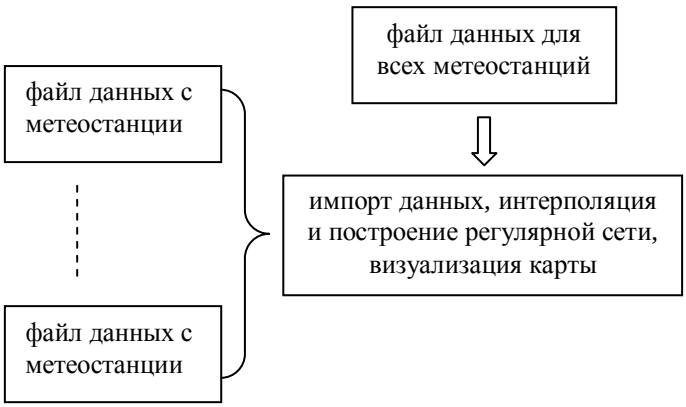


Рис.3. Схема моделирования и построения карты с помощью нового модуля.

После завершения построение регулярной сети она немедленно визуализируется без текстурирования. Текстурирование тоже можно было бы добавить (как с указанием границ диапазонов, так и без – указанием цветов для нижнего и верхнего значений сети с градиентной раскраской), но от этого было решено отказаться в целях упрощения процесса моделирования и в силу того, что разрабатываемый модуль узкоспециализированный, и цвета для обозначения потенциала солнечной энергии уже устоялись – это оттенки желтого, орнажевого или красного цветов для высокого потенциала и оттенки холодных цветов (обычно синего) для низкого потенциала.

Таким образом, получаем следующие входные данные и параметры процесса моделирования, которые необходимо задать пользователю:
– один или несколько файлов с результатами измерений;
– уровень генерализации регулярной сети (для регулярной сети продолжительности солнечного сияния оптимальны значения 2250 и выше);
– количество точек, используемых в интерполяции (для территории республики Дагестан с учетом охвата и расположения метеостанций оптимальны значения 3-4).

Разумеется, упрощенная схема (и соответственно, разработанный модуль) имеет, как преимущества, так и недостатки:
– схема менее универсальна, для наложения других карт и текстур на полученную регулярную сеть необходимо использовать другие модули СТГМ;
– модуль визуализирует двумерную карту, без рельефа и наложения других текстур, для визуализации трехмерной карты необходимо использовать модуль визуализации СТГМ;
+ модуль интуитивно понятнее и гораздо проще в использовании;
+ модуль более удобен для повторных исследований и построения карт для различных периодов времени;
+ модуль гораздо более производителен и эффективен;
+ модуль может быть практически без изменений использован для моделирования и построения карт прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиаций.

Заключение. Разработаны методика, схема и отдельный модуль моделирования и построения карты продолжительности солнечного сияния, проведено сравнение с ранее использованным программным решением.

В дальнейшем планируется доработать модуль для моделирования и построения карт с использованием других методов интерполяции, а также по другим критериям оценки потенциала солнечной энергии (прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации).

Литература:

1. *Гаджимурадов Р.Н.* Построение карты продолжительности солнечного сияния на территории Республики Дагестан // Сборник докладов III Школы молодых ученых, 2010.
2. *Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н.* Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии, №11, 2009, С.32-36.
3. *Кобзаренко Д.Н.* Алгоритмическое и программное обеспечение оценки распределения геотермальных ресурсов // Махачкала, 2011 г.
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_distance_weighting, Geostatistical interpolation, Inverse distance weighting.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Kriging, Geostatistical interpolation, Kriging

ТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Алибеков Д. М.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: miglakasi@mail.ru

Сегодня мировая экономика взяла курс на переход к рациональному сочетанию традиционных и новых источников энергии. Энергопотребление в мире к 2000 г. Составило более 18 млрд. т. у. т., а энергопотребление к 2025 г. может возрасти до 30-38 млрд. т. у. т.. По прогнозным данным к 2050 г. возможно потребление на уровне 60 млрд. т. у. т.. Характерной тенденцией развития мировой экономики в рассматриваемый период является систематическое снижение потребления органического топлива и соответствующий рост использования нетрадиционных энергетических ресурсов. Геотермальная энергия занимает среди них одно из первых мест.

Огромное значение для энергетики будущего имеет извлечение тепловой энергии, заключённой в «сухих» горных породах, - петротермальных ресурсах. Как известно, для отбора тепла из слабопроницаемой или непроницаемой горячей горной породы необходимо разрушить горную породу, чтобы расширить природные трещины и/или образовалась новая система трещин при помощи более известного нам метода как гидроразрыв, сопровождающийся как результат растягивающих или сдвигающих деформаций массива под влиянием рабочей жидкости (воды) [1]. Принципиальная технологическая схема системы извлечения тепла из сухих горных пород таким методом приведена на рис. 1. [2]. Суть метода гидроразрыва состоит в том, что при закачивании в скважину воды под высоким давлением, превышающей горное давление, вдоль неё образуются протяжённые трещины.

К основным параметрам гидроразрыва, требующимся при его проектировании нужно отнести следующие параметры:

$P_н^{'}$ и $P_н$ соответственно давление рабочей жидкости, развиваемое насосным агрегатом на устье скважины, необходимое для инициации трещины и для развития гидроразрыва, Па;

$P_c^{'}$ и P_c – соответственно давление жидкости в скважине на глубине разрыва, необходимое для инициации и для развития трещины, Па;

$P_{гр}$ – давление рабочей жидкости на границе трещины, необходимое для разрыва пород, Па;

ΔP_K и ΔP_{TP} – соответственно изменение давления рабочей жидкости при её движении по колонне насосно-компрессорных труб скважины и по трещине гидроразрыва до её границы, Па;

δ – максимальное раскрытие трещины (расстояние между её берегами по нормали), м;

R_{TP} – расстояние от оси нагнетательной скважины до границы трещины, м;

$W_{ж}$ – расход рабочей жидкости в единицу времени, $м^3/с$;

τ_p – время образования трещины гидроразрыва радиусом R_{TP}, с;

Эти параметры могут быть различными в зависимости от пространственной ориентации трещины и могут меняться по мере увеличения δ и τ_p.

В настоящее время в России завод ЗАО “ПКБ “АВТОМАТИКА” выпускает насосные агрегаты следующих модификаций для гидроразрывов

пластов: АНА-105, АНА-105М, АНА-105М-01, АНА-105М-02.

Технические характеристики этих агрегатов таковы:
– мощность рабочего оборудования – 2000 л.с.;
– максимальное развиваемое давление на выходе из агрегата – не менее 107 МПа;
– максимальная производительность агрегата – не менее 2,063 м^3/мин при рабочем давлении на выходе из агрегата не менее 37,5 МПа;
– диапазон рабочих температур – от минус 40 до плюс 50, °С.

В [4] даются расчётные зависимости, позволяющие приближённо определить почти все основные параметра гидроразрыва при проектировании ГЦС.

Давление рабочей жидкости, развиваемое насосным агрегатом на устье скважины, необходимое для инициации трещины и для развития гидроразрыва, определяются по формуле, Па:

$$P_н^{'} = P_c^{'} - P_{гст} + \Delta P_к = P_c^{'} - \rho_{ж} g H_p + \frac{128 \mu_p W_p H_p}{\pi d_k^4} \quad (1)$$

$$P_н = P_c - \rho_{ж} g H_p + \frac{128 \mu_p W_p H_p}{\pi d_k^4} \quad (2)$$

где d_k - внутренний диаметр колонны насосно-компрессорных труб, м; $P_{гст}$ - гидростатический напор, Па; $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, кг/м^3; g - ускорение свободного падения, м/с^2; H_p - глубина рабочего интервала скважины, м; $\mu_{ж}$ - динамическая вязкость жидкости, Па·с. Значения динамической вязкости для определённой эксэргии приведены в [5].

Давление жидкости в скважине на глубине разрыва, необходимое для развития трещины, Па:

$$P_c = P_{гр} + \Delta P_{TP} \quad (3)$$

В случае гидроразрыва непроницаемого природного массива ($k=0$) связь между давлением жидкости в рабочем интервале скважины P_c и полным горным давлением $q_г = \rho g H_p$ при модуле упругости E, Па и коэффициенте Пуассона ν с учётом гидравлических потерь в трещине радиусом R_{TP} определяется уравнением:

$$\left(\frac{P_c - q_г}{E} \right)^3 \frac{P_c - q_г}{P_c} = 0.0463 \frac{(1+\nu^2) W_p \mu_p}{E V_p} \quad (4)$$

Общий объём жидкости в трещине, м^3:

$$V_{ж} = \frac{5(1-\nu^2)(P_c - q_г) R_{TP}^3}{E} \quad (5)$$

Максимальное раскрытие трещины около нагнетательной скважины, м:

$$\delta_0 = 8(1-\nu^2)(P_c - q_г) R_{TP} / \pi E \quad (6)$$

Определим параметры гидроразрыва для указанной на рис. 1. схемы, при:
глубина скважины – $H_р$=3000 м;
закачиваемая жидкость – вода;
температура нейтрального слоя и градиент соответственно – T_0=15°С, Г=0.035 К/м;
горная порода – гранит ($\rho = 2650$ кг/м^3);
модуль упругости и коэффициент Пуассона для гранита соответственно E=0.49· 10^5 Па, ν =0,25;

расход рабочей жидкости в насосно-компрессионной колонне труб - $W_р$=0.1 м^3/с;
диаметр колонны насосно-компрессионных труб – $d_к$=0.2 м;
значение динамической вязкости берём из [5] - $\mu = 2 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

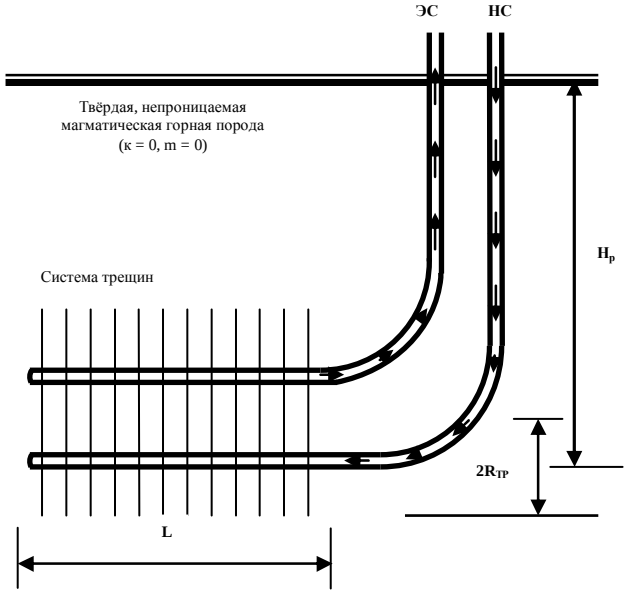


Рис.1. Принципиальная технологическая схема извлечения тепла из «сухих» горячих горных пород: НС – нагнетательная скважина; ЭС- эксплуатационная скважина.

Согласно [4] ориентация трещины в непроницаемой горной породе будет вертикальной при глубине скважины $H_p \geq 2000$ м. В данном случае H_p=3000 м. В таком случае горизонтальное напряжение можно определить следующим образом:

$$\delta_x = \frac{\nu}{1-\nu} \rho_n g H_p = 25.97 \text{ МПа.}$$

Гидростатическое давление в соответствии с разностью температур на устье и забое скважины ($\rho_ж = 979$ кг/м^3):

$P_{гст}$=28.8 МПа.

Горное давление:

$\delta_z = q_г = 77.98$ МПа.

Необходимое давление жидкости в скважине для развития гидроразрыва находим из трансцендентной зависимости (4):

P_c= 78.91 МПа.

Давление жидкости в скважине, необходимое для инициации трещины (коэффициент структурного ослабления породы по нормали к плоскости контакта слоёв для гранита $\varphi_x[\delta_p]_x = 0.5 \div 0.2$):

$$P_c^{'} = 2\delta_x + P_{ГСТ} + \varphi_x[\delta_p]_x = 81.02 \text{ МПа.}$$

Это соответствует потерям давления в трещине:

$\Delta P_{ТР} = P_c - q_г = 0.93$ МПа.

По формулам (5) и (6) определяем общий объём жидкости в трещине (при $R_{ТР}$=100 м) и максимальное раскрытие трещины:

$V_ж$ = 89,4 м^3, $\delta_0 = 0.0045$ м.

Потери напора жидкости в скважине, при её движении по колонне насосно-компрессорных труб, по формуле (1) составляют:

$\Delta P_k = 0.00152$ МПа.

Давление, развиваемое насосным агрегатом у устья скважины для развития гидроразрыва:

$P_н = 50.112$ МПа,

а давление насосного агрегата, необходимое для инициации трещины находим из (1):

$P_H^{'} = 52.222$ МПа.

Продолжительность гидроразрыва:

$\tau_p = V_ж / W_p = 14{,}9$ мин.

Здесь не учитывается время закачки проппанта в систему трещин.

Для практически непроницаемых горных пород условие поддержания вертикальной трещины гидростатическим давлением без учёта давления, развиваемого циркуляционным насосом, можно записать следующим образом:

$$\rho_p g H_p \geq \frac{\nu}{1-\nu} \rho_n g H_p \qquad (7).$$

В данном случае условие (7) выполняется.

Таким образом можно сделать вывод, что технология гидроразрыва является весьма рентабельной для создания геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) в нашей стране, так как породы с температурой 100-150°С в интервале глубин 5-6км развиты здесь почти повсеместно. При таких температурах использование петротермальных ресурсов для энергетики и теплоснабжения становится весьма целесообразным.

Литература:

1. *Э. Берман* «Геотермальная энергия». Перевод с англ. под редакцией д-ра геол. –мин. наук Б. Ф. Маврицкого, изд. МИР, М.: 1978, 411 с.
2. *Алхасов А. Б.* «Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии». – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
3. http://fracturing.ru/grp4.html.
4. *Дядькин Ю.Д.* «Основы геотермальной технологии». Л.: изд. ЛГИ, 1985. – 176с.
5. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* «Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара». – М.: Издательство МЭИ. 1999. – 168 с.; ил.

ОБЗОР ТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Шапиев Г.Ш.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И. Шамиля, 39а; e-mail: shguseyn@mail.ru

Реакция термоядерного синтеза легких элементов в глубинах Солнца порождает колоссальную энергию солнечного излучения. Для среднего расстояния от Солнца при движении Земли по эллиптической орбите I_0 = 1366 Вт/м^2. Суммарная мощность лучистой энергии, поступающей к земной атмосфере, равна примерно 180 млн ГВт (суммарная мощность электростанций России – 215 ГВт).45% приходящей лучистой энергии приходится на видимый свет (длины волн 0,4 …0,75 мкм), 45% - на инфракрасное (тепловое) излучение, 10% - на ультрафиолетовые лучи.

Баланс лучистой энергии Земли представлен на рис. 1. [1]

Рис.1. Баланс лучистой энергии Земли.

Локальные значения лучистой энергии Солнца приходящей, к поверхности литосферы или гидросферы зависят от ориентации к Солнцу (освещенности), облачности, запыленности воздуха, высоты над уровнем моря, времени года и суток. В средних широтах интенсивность солнечного излучения I достигает 800 Вт/м2 летом и 200…350 Вт/м2 зимой, уменьшаясь до нуля с заходом Солнца. Лучистая энергия Солнца используется биосферой со времен появления жизни на планете.

Превращение солнечной энергии в механическую впервые было продемонстрировано на Всемирной выставке в Париже в 1600 г.(солнечный двигатель, работавший на нагретом воздухе и использовавшийся для перекачки воды.) В конце XVII в. французский химик А. Лавуазье создал первую солнечную печь, в которой достигалась температура в 1650 °С и нагревались образцы исследуемых материалов в вакууме и защитной атмосфере. В 1833 г. в США Дж. Эриксон построил солнечный воздушный двигатель с параболоцилиндрическим концентратором размером 4,8* 3,3 м. Первый плоский коллектор солнечной энергии был построен французом Ш.А. Тельером. Он имел площадь 20 м2 и использовался в тепловом двигателе, работавшем на аммиаке.

В 1890 г. профессор В.К. Церасский в Москве осуществил процесс плавления металлов солнечной энергией, сфокусированной параболоидным зеркалом, в фокусе которого температура превышала 3000°С.

На башенных СЭС сегодня зеркала (гелиостаты) отражают СИ на

теплоприемник, установленный на высокой башне. Этот принцип англичанин Уильям Адаме использовал для своей энергетической установки в Бомбее еще в 1878 году.

Все сказанное выше говорит о том, что по своей сути многие популярные сегодня технические схемы СЭУ уходят корнями в прошлое.

Классификация СЭУ и их особенности [2]

В зависимости от технологических схем СЭУ могут существенно отличаться друг от друга - от простейших нагревательных плоских поверхностей до сложнейших систем управления для слежения за Солнцем с целью получения максимального прихода СИ на ПП. СЭУ используются в процессах сушки различных материалов исельхозпродуктов, для получения горячей воды, для опреснения морской воды, для получения пресной воды и т.д. Учитывая рассеянный характер СИ на Земле весьма эффективны и различные системы концентрации СИ с целью повышения и экономических энергетических показателей СЭУ разного назначения. К СЭУ наземным и космическим, естественно, помимо чисто энергетических требований, предъявляются и различные требования, учитывающие характерные особенности, например, связанные с доставкой СЭУ в космос и т.д.

В связи со сказанным выше первоочередное значение приобретаетзадача четкой классификации СЭУ с целью поиска путей дальнейшегоповышения их эффективности сегодня и в перспективе. Рассмотрим наиболее характерные сегодня общие классификационные признаки современных и перспективных типов и видов СЭУ.

По виду преобразования и использования СИ в другие виды энергии: в тепловую, механическую, электрическую, используется в химических и биологических процессах. При использовании СЭУ в электроэнергетике и теплоэнергетике они могут делиться на три категории, определяемые видом их использования для определенных потребителей энергии: СЭУ, предназначенные для работы в большой ОЭС или просто ЭЭС; СЭУ, работающие на локальную сеть; СЭУ, предназначенные для энергообеспечения автономного потребителя.

В зависимости от категории использования СЭУ могут появиться требования об обязательном сочетании СЭУ с системой аккумуляции энергии любого эффективного вида или с другими видами энергоустановок на базе ВИЭ.

По месту размещения на Земле: наземные и космические.

Системы защиты СЭУ у них будут принципиально разные: в космосе – защита ПП от жесткого космического излучения, разрушающего сами ПП; на земле – охлаждение СЭУ, защита от пыли и вандализма в том числе. Для космических СЭУ, работающих в безвоздушном пространстве проблема самой конструкции СЭУ становится менее значимой с весовыми показателями СЭУ. Наиболее проблематична здесь задача передачи накопленного СИ на Земле без нанесения заметного вреда человеку и окружающей среде в целом. В частности, требование минимального воздействия озоновый защитный слой Земли. Для наземных СЭУ характерны, очевидно, принципиально другие технические проблемы солнечной энергетики.

По стационарности: переносные, передвижные и стационарные СЭУ.

Отличаются друг от друга как по массо-габаритным характеристикам, так и по сложности конструктивного исполнения. Существенно отличаются друг от друга по надежностным характеристикам.

По виду ориентации на солнце:

С постоянной ориентацией на поверхности земли и с системой слежения

за Солнцем с целью максимизации прихода СИ на ПП. К постоянно ориентированным на Солнце СЭУ относятся, как правило, энергоустановки бытового назначения, размещенные на крышах строений, на земле с ориентацией на Юг под постоянным углом к горизонту и на специальных стационарных конструкциях-каркасах для размещения СЭУ. В ряде случаев для небольших простых СЭУ возможно изменение угла наклона ПП в каждом месяце года, что достаточно просто может быть реализовано конструктивно.

Система непрерывного во времени слежения за Солнцем может быть реализована с помощью гелиостатов.

По технической сложности СЭУ: простые и сложные по техническому циклу и исполнению. К простым СЭУ можно отнести: нагреватели воды различной конструкции; подогреватели воздуха; сушилки продуктов сельского хозяйства; отопительные системы; опреснители воды; теплицы; солнечные кухонные печи или нагреватели, холодильные и водоподъемные установки и т.д.

Значительным недостатком процесса получения солнечной энергии является относительно низкая плотность лучистой энергии, что вынуждает предварительно концентрировать энергетические потоки. Облучённость рассматриваемой площадки зависит от широты местности (к тропикам она больше), времени года, суток, наличия облаков и загрязнений в атмосфере, от угла наклона к горизонту. На рис.2 представлена карта инсоляции территории России.

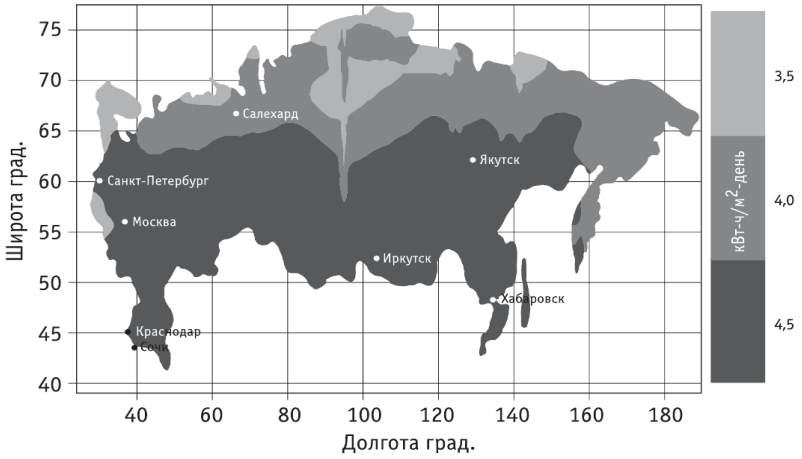


Рис.2. Приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность на территории России. [3]

Солнечная энергия может успешно использоваться на территории Российской Федерации, причем не только в ее южных регионах.

Различные независимые исследования подтверждают, что потенциал солнечной энергии наиболее велик на юго-западе (Северный Кавказ, район Черного и Каспийского морей), в Южной Сибири и на Дальнем Востоке. Значительными ресурсами обладают Республика Калмыкия, Ставропольский и Краснодарский край, Ростовская, Волгоградская, Астраханская и другие области на юго-западе, а так же Республики Алтай и Бурятия, Приморский край, Читинская область и другие регионы на юго-востоке страны. Именно здесь возможно круглогодичное использование установок, преобразующих солнечную энергию.

Благоприятным для развития солнечной энергетики по среднегодовым показателям поступления солнечной радиации является более 60% территории России, в том числе и многие северные районы. Однако важный фактор, определяющий экономическую эффективность применения гелиоустановок, - это

продолжительность их использования в течение года. Для большинства российских районов различие в поступлении солнечной радиации летом и зимой значительно.

Так, в средней полосе России солнечное излучение в летний период в 15 раз больше, чем в зимний.[3] Из южных регионов России наиболее перспективным в области освоения солнечной энергии является территория республики Дагестан. По такому показателю, как удельный валовой приход солнечной энергии, который в республике составляет 1400 киловатт-часов на квадратный метр в год, Дагестан занимает первое место в стране.

Продолжительность солнечного сияния в республике достигает около 300 солнечных дней в год. Следовательно, можно утверждать, что использование солнца в качестве альтернативного источника энергии, в целом, весьма целесообразно. Установка солнечных батарей в особенности оправданна на равнинных территориях. При установке солнечных батарей в горах необходимо учитывать рельеф местности. [4] Необходимость внедрения солнечной энергетики в горные районы республики возникает из-за наличия большого числа мелких потребителей энергии, удаленных от источников энергии и центров ее распределения - это хутора, фермы и другие мелкие крестьянские хозяйства. Строительство линий электропередач или газопроводов к таким потребителям - экономически невыгодно.[6]Возобновляемые энергоресурсы, используемые в отдаленных районах республики для автономных энергоустановок, замещают, в основном, электроэнергию, а также уголь и дрова, которые дотируются из бюджета. Таким образом, использование возобновляемых источников энергии позволит значительно сократить государственные дотации. [5]

В таблице 1 приведены значения среднемесячной инсоляции на горизонтальной поверхности для трёх районов Дагестана.

Табл.1. Среднемесячная инсоляция на горизонтальной поверхности (кВт/м2/день)(средние значения за 22 года)[4]

Месяц / Район	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Среднее за год
Махачкала Широта 42.983° Долгота 47.483°	1.77	2.50	3.37	4.30	5.09	5.56	5.45	4.80	4.03	2.97	1.93	1.48	3.61
с. Ботлих, Широта 42.65° Долгота 46.217°	1.91	2.76	3.68	4.58	5.41	5.87	5.69	4.98	4.24	3.17	2.13	1.63	3.84
г. Дербент Широта 42.069° Долгота 48.296°	1.44	2.13	3.25	4.61	5.92	6.52	6.53	5.76	4.30	2.72	1.61	1.20	3.84

В первую очередь альтернативные виды энергии предполагается использовать, в сфере ЖКХ. В республике уже есть многоквартирные и частные дома, где установлены солнечные батареи, которые производят на предприятии «Волна» в Дербенте. Как говорилось выше, энергия солнца может активно использоваться в горных селениях, где ощущается нехватка традиционных видов энергетических ресурсов. Но на пути внедрения солнечной энергетики в горныерайоны, существует несколько проблем, главная из которых – малая

информированность жителей горных районов об использовании АИЭ.

В республике имеется высокий научный потенциал разработок по созданию и внедрению возобновляемых источников энергии в лице Института высоких температур РАН «Полигон Солнце», Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, ОАО «Геобуртерн», ООО «Дагкремний» и др.

В последние годы солнечная энергетика интенсивно развивается.Недавно президент Медведев поставил задачу увеличить долю возобновляемых источников энергии к 2020 году от нынешнего 1% до 20%. В европейских странах альтернативные источники энергии составляют не менее 20%. В Испании ветряные агрегаты вырабатывают до 30% энергии.[7]

Основное внимание уделяется сложным промышленным СЭУ, изготавливаемых серийно. В том числе: башенные СЭС; солнечные пруды; СЭУ с параболо-цилиндрическими концентраторами; солнечные коллекторы; концентраторы СИ и, наиболее перспективные сегодня системы прямого преобразования СИ в электричество - СФЭУ.

В высокогорном Дагестане наиболее приемлема технологическая схема совместного использования СЭУ с параболоцилиндрическими концентраторами и ВЭУ.

Представляет также интерес использование солнечных коллекторов в сочетании с тепловыми насосами (ТН) в том числе для отопления (Рис.3).

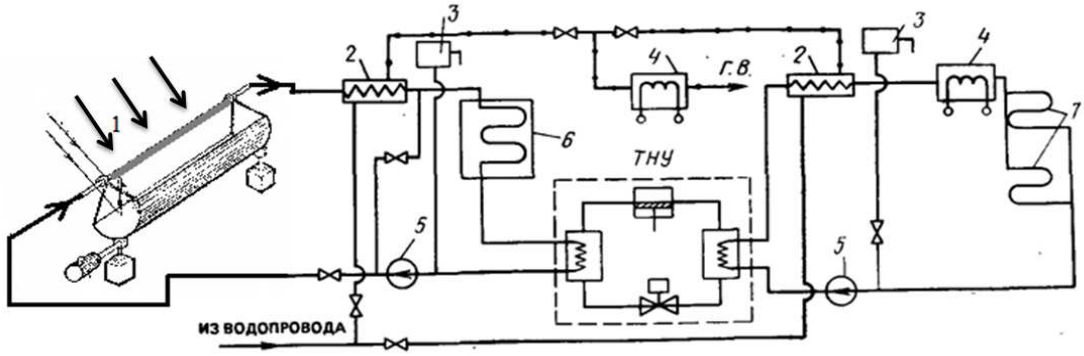


Рис.3. Принципиальная схема системы теплоснабжения жилого дома с теплонасосной установкой, 1 - солнечный коллектор с параболоцилиндрическим концентратором, 2-тепло-обменник, 3-расширительный бак, 4-электроводонагреватель, 5-насос, 6-бак-аккумулятор, 7-отопительные панели.

По данным Роспатента, среди субъектов СКФО Дагестан самым активным по части разработки новых технологий является Дагестан, но внедрение этих технологий пока оставляет желать лучшего. [5]

Литература:

1. *В.Г.Лабейш.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб.пособие. - СПб.: СЗТУ, 2003.-79с.
2. *Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.* Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. -317с.
3. Развитие возобновляемых источников энергии в России: возможности и практика (на примере Камчатской области).Сборник. - М.: ОМНО «Совет Гринпис», 2006. – 92 с.
4. http://dagestan-meteo.ru/
5. ntsr.info
6. www.referun.com
7. http://www.vestikavkaza.ru/articles/obshestvo/Ecology/21464.html

СЕРТИФИКАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В МИРЕ

Сулейманов М.Ж., Ефимов Д.В.

Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН; Москва, Россия; 125412, ул.Ижорская, 13, стр.2; e-mail: smusi@mail.ru

Использование возобновляемых источников энергии рассматривается сегодня как один из ключевых критериев обеспечения устойчивого развития энергетической отрасли [1]. Одним из наиболее перспективных устройств, применяемых в области возобновляемой энергетики, является солнечный коллектор. Во всем мире с каждым годом увеличивается объем производства солнечных коллекторов. Соответственно растет и конкуренция между компаниями-производителями. Это приводит к необходимости создания более совершенных энергоэффективных устройств, требующие патентной регистрации и последующей сертификации.

Сертификация позволяет производителю и дистрибьютору быть уверенными в качестве продукции и репутации компании-производителя. В некоторых странах производители проходят обязательную сертификацию, в то время как в большинстве стран она является добровольной.

Например, во Флориде (США) для того, чтобы продукция смогла выйти на рынок, необходимо, чтобы она была протестирована местными органами контроля качества продукции, что подтверждается выдачей соответствующего местного сертификата. Таким же образом дело обстоит в Канаде и Австралии.

Для сертификации продукции производители солнечных коллекторов должны обращаться в специализированные научные лаборатории, в которых устройства тестируют в соответствии с существующими стандартами и выдают официальный документ с результатами проведенных испытаний. Затем орган сертификации, уполномоченный подтвердить соответствие полученных в лаборатории результатов испытаний существующим стандартным нормативам, принимает решение о выдаче того или иного сертификата соответствия на представленный продукт.

Обзор мировых сертификационных центров и лабораторий для испытаний солнечных коллекторов и систем проведен журналом Sun & Wind Energy [2].

В Таблице 1 представлен рейтинг стран по количеству действующих научных лабораторий, позволяющих проводить испытания солнечных коллекторов.

Таблица 1. Количество испытательных лабораторий по странам мира.

Страна	Количество компаний	Страна	Количество компаний
Германия	5	Швейцария	1
США	4	Португалия	1
Канада	3	Нидерланды	1
Китай	3	Турция	1
Австралия	3	Швеция	1
Италия	3	Словакия	1
Испания	3	Индия	1
Австрия	2	Греция	1
Бразилия	2	ЮАР	1
Израиль	1		

Из таблицы видно, что по количеству лабораторий, специализирующихся на испытаниях солнечных коллекторов, первое место занимает Германия.

Обычно при испытаниях солнечных коллекторов проверяются их теплофизические свойства, срок службы, надежность и безотказность устройства. Испытания проводят по нескольким существующим методикам.

Методики тепловых испытаний солнечных коллекторов базируются на различных математических моделях, описывающих работу солнечного коллектора [3]. Первая попытка обобщения опыта тепловых испытаний солнечных коллекторов и разработки стандартной методики была предпринята Национальным бюро стандартов (НБС) (сейчас Институт стандартов и технологий – NIST) США [4, 5].

Разработанная в НБС методика была положена в основу целого ряда национальных стандартов.

Многие страны разработали собственные стандарты и нормы испытаний солнечных коллекторов, но в большинстве своем они схожи с международным стандартом ISO 9806. Отличие заключается в граничных условиях, заложенных в модель. К примеру, в Австралии и Новой Зеландии коллекторы должны быть испытаны при температурах выше 50^{o}C, кроме того должны быть учтены такие погодные условия, как град, муссоны и ультрафиолетовое излучение. Эти критерии описаны в стандарте AS/NZS 2712.

В Европе условия испытаний солнечных коллекторов регламентируются стандартами EN 12975-2 (для солнечных коллекторов) и EN 12976 (для солнечных систем в целом).

Одной из ведущих организаций занимающихся сертификацией солнечных коллекторов является SRCC (Solar Rating and Certification Corp), США. Во время нефтяного кризиса 1974 года в США развитие солнечной энергетики получило большой толчок. Для того чтобы убедить покупателей солнечных коллекторов в качестве, долговечности и надежности предлагаемой им продукции, потребовалось создать специальную организацию, занимающуюся тестированием и сертификацией установок, предназначенных для преобразования солнечной энергии. До создания SRCC нормы, по которым проводились испытания солнечных коллекторов в США, были не регламентированы, и испытания коллекторов, например, в Калифорнии и во Флориде могли проводиться совершенно по-разному. Поэтому и возникла необходимость в создании единой национальной программы по сертификации данной продукции.

Так, в 1980-ом году была создана некоммерческая организация SRCC. Главная ее цель заключалась в создании и развитии программы по сертификации солнечных коллекторов в соответствии с существующими национальными стандартами. Эта организация разрабатывает методики, по которым независимые лаборатории должны проводить испытания для получения сертификата SRCC. Однако сама эта организация не проводит испытаний. Первыми лабораториями, в которых проводились испытания, были FSEC (Florida Solar Energy Center), основанная в 1980 году, и Канадский Центр, основанный в 1984 году. На протяжении 20 лет они были основными испытательными центрами в Северной Америке. По оценке на 2010 год SRCC выдало более 1200 сертификатов на солнечные установки.

В течение последнего десятилетия значительно возросло количество компаний, занимающихся производством солнечных коллекторов. Органы тестирования не справлялись с таким объемом работ по испытанию и сертификации продукции. Иногда производителям приходилось ждать более двух

лет до старта испытаний их продукции. Как следствие в 2009-ом году были открыты новые испытательные центры: пять в Германии и один в Швеции.

Испытательные лаборатории периодически проходят проверки, призванные подтвердить, что стандарты, по которым проводятся испытания в данной лаборатории, не устарели и все еще отвечают существующим нормам, с учетом всех нововведений. К примеру, в Германии и близлежащих странах на региональном уровне работает специальная организация под названием «Группа обмена опытом немецких испытательных лабораторий солнечных тепловых систем и их компонентов». В нее входят немецкие, австрийские и шведские испытательные лаборатории.

Большой список испытательных лабораторий и выдаваемых ими сертификатов представлен на сайте www.solarkeymark.com.

Намереваясь протестировать свою продукцию, компании-производители должны учитывать многие факторы, включая стоимость и время, в течение которого она может получить сертификат. Получение сертификатов в Канаде или во Флориде, к примеру, может занимать от полугода до двух лет. Поэтому целесообразно направлять запросы по осуществлению сертификационных испытаний в Европейские страны. Это позволит значительно сэкономить время сертификации устройства.

В настоящее время в Европе наилучшим образом зарекомендовал себя сертификационный знак качества «Keymark label». Для того чтобы испытательная лаборатория могла начать выдавать сертификаты под маркой «Keymark label», она должна быть аккредитована в Европейском центре стандартизации.

В связи с постоянным ростом рынка солнечных тепловых установок возникла необходимость создания универсального глобального мирового стандарта. Этот вопрос начал активно обсуждаться в настоящее время. Одним из вариантов его решения является разделение продукции на категории A, B, C, D, которые отличаются по условиям, необходимым для проведения испытаний. К примеру, к категории А будут относиться коллекторы или солнечные системы, не требующие специальных условий испытания. К категории В будут относиться коллекторы, работающие в суровых погодных условиях, например, в Австралии, где температура окружающего воздуха может подняться выше 50ºС. В Таблице 2 представлены страны, которые имеют свои собственные независимые сертификационные центры.

В России параметры солнечных коллекторов регламентируются по ГОСТ Р 51595-2000 [6]. Стандарт определяет технические требования к материалам, особенностям конструкции солнечных коллекторов, допустимым значениям их параметров, а также устанавливает необходимую номенклатуру испытаний коллекторов в зависимости от целей испытаний.

Методики и программы испытаний в свою очередь регламентируются по ГОСТ Р 51596-2000 [7]. Основными целями испытаний солнечных коллекторов являются проверка их работоспособности в нормальных и аварийных режимах работы. Процедура тепловых испытаний солнечного коллектора в [7] не содержится и, соответственно, параметры теплотехнического совершенства для характеристики качества разработки и изготовления солнечного коллектора в [6] не используются.

В России сертификационные центры отсутствуют. Из-за этого отечественные производители вынуждены либо обращаться в зарубежные испытательные центры, либо вносить в техническую документацию непроверенные теплотехнические показатели.

Таблица 2. Существующие сертификационные центры.

Название / Страна	**Сертификация**	**Стандарт или норма**	**Сайт**
Canadian Standards Association, Canada	Коллекторы и солнечные системы	CSA F378-87, CSA F379-09	www.getsolarcertified.com
CERTIF - Associação para a Certificação, Portugal	Коллекторы и солнечные системы	Solar Keymark, EN 12975, EN 12976	www.certif.pt
DIN CERTCO, Germany	Коллекторы и солнечные системы	Solar Keymark, EN 12975	www.dincertco.de
ELOT S.A., Greece	Коллекторы	Solar Keymark, EN 12975	www.elot.gr
ICIM S.p.A., Italy	Коллекторы и солнечные системы	Solar Keymark, EN 12975	www.icim.it
National Institute of Metrology, Standardization and Industry Quality (INMETRO), Brazil	Солнечные системы	NBR- 15569	www.inmetro.gov.br
Intertek Testing Services Shenzhen, China	Коллекторы и солнечные системы	Golden Sun Mark, SRCC, Solar Keymark	www.intertek.com
National Accreditation Board for Testing and Calibration Laboratories (NABL), India	Коллекторы и солнечные системы	IS 12933, IS 13129	www.nabl-india.org
Kiwa Gastec Certification, Netherlands	Коллекторы и солнечные системы	Solar Keymark, EN 12975	www.1kiwa.com
SAI Global, Australia	Коллекторы и солнечные системы	AS/NZS 2712	www.sai-global.com
Solar Rating and Certification Corporation (SRCC), USA	Коллекторы и солнечные системы	SRCC	www.solar-rating.org
South African Bureau of Standards (SABS),South Africa	Коллекторы и солнечные системы	SANS 1307	www.sabs.co.za
Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR)	Коллекторы	Solar Keymark, EN 12975	www.aenor.es
SP Technical Research Institute of Sweden	Коллекторы	Solar Keymark, EN 12975	www.sp.se
The Standards Institution of Israel	Солнечные водонагревательные установки	Solar Keymark, Israeli standard no 571	www.sii.org.il
TSU Piestany (Technicky skusobny ustav Piestany) s.p., Slovakia	Коллекторы и солнечные системы	Solar Keymark, EN 12975	www.tsu.sk
Turkish Standards Institution (TSE), Turkey	Коллекторы	TS 3680	www.tse.org.tr

В Объединенном институте высоких температур РАН в Лаборатории возобновляемых источников энергии действует стенд для испытаний солнечных коллекторов и солнечных водонагревательных установок. На сегодняшний день этот стенд является единственным специализированным исследовательским стендом в России.

Наличие стенда делает возможным организацию испытаний гелиотехнического оборудования отечественных производителей в соответствии с отечественными и международными методиками испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы (госконтракт № 14.740.11.0096), Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы" (госконтракт № 16.516.11.6104) и Гранта Президента по государственной поддержке ведущей научной школы НШ 3717.2010.8.

Литература:

1. *В.Е. Фортов, О.С. Попель.* Энрегетика в современном мире – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. -168 с.
2. Sun & Wind Energy 1/2011
3. *Дж. А. Даффи, У.А. Бекман.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии // Издательство МИР. Москва. 1977.
4. *Фрид С.Е.* Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов // Препринт № 3-248. ИВТАН АН СССР. Москва. 1988г.
5. *Сулейманов М.Ж.* Экспериментальное исследование теплотехнических характеристик солнечных коллекторов и водонагревательных установок // Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. ОИВТ РАН. Москва. 2007 г.
6. ГОСТ Р 51595-2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия. – М. Госстандарт. 1999.
7. ГОСТ Р 51596-2000. Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Методы испытаний. – М. Госстандарт. 1999.

СОЛНЕЧНАЯ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ПАРАБОЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРАТОРА

Искендеров Э.Г., Зейналов М.Ш., Арбуханова П.А., Милихин И.А.

Филиал объединенного института высоких температур РАН;
Махачкала, Россия; 367030, Махачкала, ул.Ярагского, 75; e-mail: iselga@mail.ru

Системами солнечного теплоснабжения называются системы, использующие в качестве источника тепловой энергии солнечную радиацию. Их характерным отличием от других систем низкотемпературного отопления является применение специального элемента – гелиоприемника, предназначенного для улавливания солнечной радиации и преобразования ее в тепловую энергию.

Получение тепла за счет солнечной радиации основано на нагревании теплоносителя (воздух, вода и т.п.) выше температуры окружающей среды.

На территории Дагестана солнечная энергия доступна на протяжении почти всего года (около 300 дней), в других регионах России их намного меньше. Как правило, абсолютно ясных солнечных дней в течение года бывает не так уж и много. В основном преобладает переменная облачность, когда солнце появляется на десяток – другой минут, а затем на это же время прячется за облаками и интенсивность солнечной тепловой энергии резко падает. Все это крайне неблагоприятно сказывается на перспективах использования солнечной энергии для организации горячего водоснабжения на даче или в загородном доме. Солнечные коллекторы и водонагреватели традиционной конфигурации просто физически неспособны эффективно нагревать воду. Потому что они основаны на принципе непрерывной циркуляции воды из накопительного бака в солнечный коллектор и обратно. И небольшой по площади солнечный коллектор площадью в 1-2 кв. метра не способен быстро нагреть большой объем воды в несколько сот литров.

Практически единственным выходом организовать действительно надежное горячее водоснабжение от солнечной энергии служит построение концентрирующего солнечного коллектора с малым объемом воды, нагреваемой в каждую единицу времени.

На каждый квадратный метр поверхности падает примерно 800-1000 Ватт солнечной энергии. Возьмем нижнее значение (с учетом отражения от самого солнечного коллектора). Получим, что теплотворность коллектора 800 Ватт (или 2900 КДж). Теплоемкость воды равна 4,2 КДж/(кг·град.).

Возьмем для примера электрический чайник. При мощности в 1,5 КВт он за считанные минуты доводит несколько литров воды до кипения. Но если заставить его кипятить бочку воды, то на это может уйти несколько часов. С другой стороны, мы не нуждаемся сразу в целой бочке горячей воды. Нам в каждую минуту времени надо всего 2-3 литра. Умыться, помыть посуду и т.д. Соответственно получаем следующую схему нагревания воды. Относительно маломощным нагревателем мы быстро нагреваем 1-2 литра воды и сливаем ее в теплоизолированный накопительный бак (ТНБ). Затем нагреваем следующую порцию воды и снова сливаем ее в наш бак и так далее. А для своих нужд мы используем ее уже из бака. Т.е. делаем проточный водонагреватель с накоплением результата его работы.

Такая схема значительно снижает требования по мощности собственно

нагревателя и, в тоже время, позволит иметь достаточно большой запас горячей воды в несколько десятков литров, в зависимости от емкости накопительного бака.

Например, в течение 10-15 минут, пока светит солнце, мы получим около 200 Ватт-часов энергии от солнца. Это эквивалентно 720 КДж. Что позволит нагреть до 50-60 градусов примерно 4-5 литров воды. В следующий «выход» солнца - еще 5 литров, потом еще. И так далее в течение всего дня.

Причем чем меньше будет емкость нашего нагревателя, тем эффективнее он будет использовать солнечную энергию. Он будет выхватывать солнечное тепло, даже если солнце будет выходить всего на несколько минут! А уже если этот период будет долгим, такой нагреватель превратится в кипятильник.

Сделать такой малоёмкий солнечный коллектор можно двумя способами. Первый - сделать очень плоский классический коллектор максимально большой площади. Например, толщиной всего в 1-3 см и площадью в 1-1,5 кв. метра. Но его емкость будет около 20-40 литров! Особо маленьким его не назовешь. И что бы нагреть всю эту воду потребуется как минимум час солнца.

Второй вариант - сделать концентрирующий параболический солнечный коллектор примерно такой же площади и с емкостью 2-3 литра! Тогда вода в нем будет нагреваться всего за 5-8 минут! Соответственно всего полчаса солнца - и у нас около 10-15 литров достаточно горячей воды! Более того, концентрирующий коллектор способен собирать и рассеянную солнечную энергию, когда лучи рассеиваются дымкой и облаками.

Нами разработана небольшая водонагревательная установка на основе параболоцилиндрического концентратора, который возможно сделать в бытовых условиях.

Формула расчета параболы следующая: $y = x^2/(4 \cdot f)$, где f – фокусное расстояние.

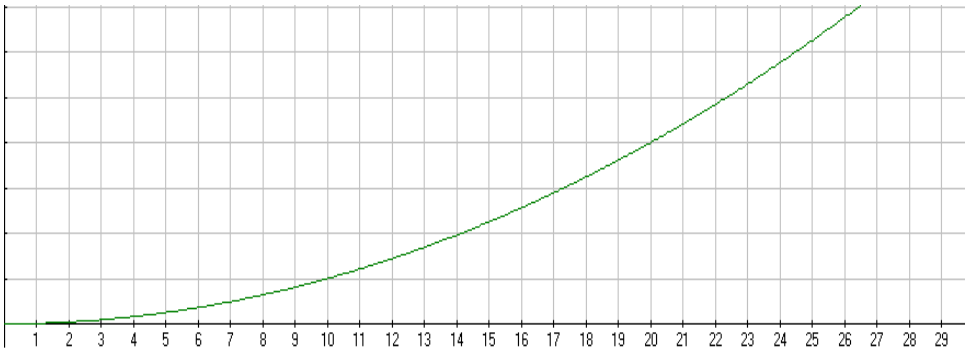


Рис.1. Построение параболы по формуле.

Существует и достаточно простой способ для построения параболы. На листе фанеры мы рисуем прямой угол. Затем, по одной стороне наносим отметки через 1 единицу измерения (например, через 100 мм, на рис.2 – буквы). А по другой - через 2 единицы (т.е через 200 мм, на рис.2. – цифры). Затем соединяем отметки линиями a1, b2, c3 и т.д. Образующиеся пересечения линий и дадут нам искомую параболу. Ее естественно надо сгладить при помощи лекала. Разумеется, это только половинка параболы, которая нам нужна, вторая её зеркальное отражение.

Рассмотрим саму установку и принцип ее работы (рис.3). Вода в коллектор – нагреватель поступает под небольшим давлением из напорного бака. А на выходе коллектора установлен клапан – термостат, аналогичный по

действию тому, что устанавливается в контурах охлаждения автомобилей, т.е. он открывается тогда, когда вода нагревается до определенной температуры. Когда порция воды, находящаяся в коллекторе нагреется, термостат открывается и вода сливается в баки-термосы. Как только вся горячая вода сольется и начнет идти прохладная вода, то термостат тут же закроется и коллектор начнет греть следующую порцию.

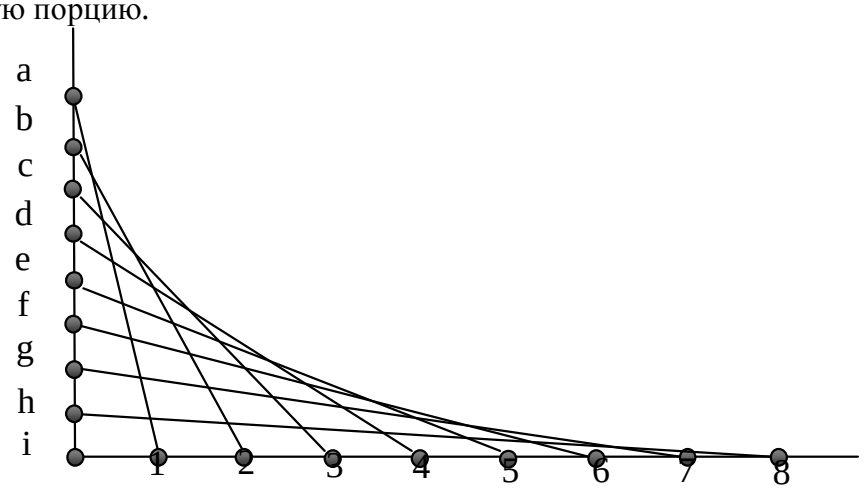


Рис.2. Построение параболы графически.

Чтобы зря не пропадало место позади параболического зеркала, баки-термосы установлены в свободных нишах и тщательно теплоизолированы. Хотя, как понимаете, это всего лишь вариант их расположения. Их можно установить в любом удобном месте, но важно тщательно утеплить (изолировать) трубу, ведущую к ним от коллектора. Для долговременного поддержания температуры горячей воды в ТНБ в него, возможно, встроить тепловой аккумулятор, с составом, разработанным в ФО ИВТ РАН.

Для того чтобы не делать гелиотрекер, который всегда поворачивает параболическое зеркало строго на солнце либо перемещает коллектор по фокальной плоскости следует сделать вертикальное расположение параболического зеркала, что и было сделано в нашем случае (рис.4.).

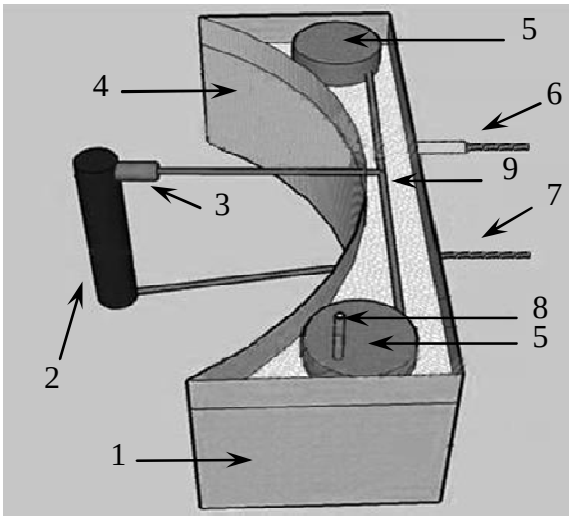


Рис.3. Солнечная водонагревательная установка в горизонтальном исполнении.
(1 - корпус, 2 - коллектор-нагреватель, 3 - термостат, 4 – параболическое зеркало, 5-теплоизолированный накопительный бак (ТНБ), 6 - выход горячей воды (расход), 7 - подача холодной воды, 8 - перелив, 9 – утеплитель).

Как известно солнце достаточно быстро перемещается по горизонтали, и очень медленно по вертикали. Поэтому, если сделать достаточно вытянутую параболу и расположить коллектор в ее фокальной плоскости, то несколько часов подряд на коллектор будет падать весь объем отраженной солнечной энергии. А регулировку по вертикали придется делать лишь раз в неделю-две, в зависимости от угла солнца над горизонтом.

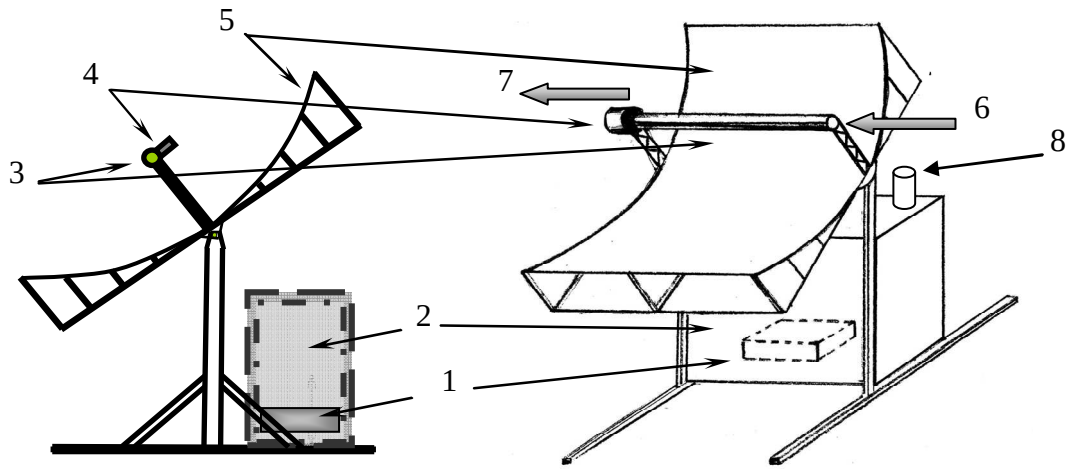


Рис. 4. Солнечная водонагревательная установка в вертикальном исполнении (1 – тепловой аккумулятор, 2 – теплоизолированный накопительный бак (ТНБ), 3 – коллектор-нагреватель, 4 - термостат, 5 – параболическое зеркало, 6 - подача холодной воды, 7 – выход горячей воды (расход),8 – перелив).

Предпочтительнее конечно бы было, использование гелиотрекера, поворачивающего параболическое зеркало непосредственно на солнце. В нашем случае можно создать еще одну установку такого же типа но с параболическим концентратором и использовать паровой двигатель для выработки электричества для гелиотрекера, т.к. температура нагревателя в установке достигает температуры свыше 130 градусов и в данном случае мы можем использовать пар образующийся при кипении воды.

Но даже без использования механизма слежения за солнцем на предлагаемой солнечной водонагревательной установке за 1 час было получено 50 литров воды, нагретой от 20 до 50^{o}C.

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Возобновляемая энергетика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.– 256с. – ISBN 978-5-9221-1244-4.
2. *Мак-Вейг Д.* Применение солнечной энергии. Пер. с англ./Под ред. Тарнижевского. М.:Энергоиздат, 1981.
3. Использована информация с сайта http://www.delaysam.ru/.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА ТЕРРИТОРИИ ДАГЕСТАНА

Камилова А.М.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Россия, Махачкала; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: anna702@mail.ru

В докладе приведены полученные карты распределения средней удельной мощности и средней удельной энергии ветрового потока на территории Дагестана. Построение карт осуществлялось с помощью системы трехмерного геоинформационного моделирования.

Для сравнительной оценки потенциальных возможностей ветроэнергетики в том или ином районе определяют удельную мощность и удельную энергию ветрового потока (ВП), т.е. теоретический потенциал ветроэнергетики.

Удельная мощность ВП - это энергия, переносимая ветром в единицу времени через единицу площади поверхности, перпендикулярной скорости ветра. Для потока воздуха со скоростью v, м/с, удельная мощность $P(v)$, Вт/м^2, равна:

$$P(v)= 0{,}5\cdot\rho\cdot v^3,$$

где ρ, кг/м^3, - плотность воздуха, значения которой для разных температур и высот различны и приведены в [2].

Средняя удельная мощность ВП при использовании экспериментальных повторяемостей скоростей t_i вычисляется по формуле:

$$P_{ср} = \sum_{i=1}^{n} P(v_i)\cdot t_i = 0{,}5\cdot\rho_{ср}\cdot\overline{v^3}, \qquad (1)$$

где $\rho_{ср}$ – средняя плотность воздуха; $\overline{v^3}$ - среднее значение куба скорости ветра, определяемое по формуле:

$$\overline{v^3} = \sum_{i=1}^{n} v_i^3\cdot t_i(\Delta v_i), \qquad (2)$$

где $t_i(\Delta v_i)$ – повторяемость скоростей в i-ом интервале скорости (градации) Δv_i.

Для получения экспериментальной повторяемости скоростей ветра $t_i(\Delta v_i)$ используется формула:

$$t_i(\Delta v_i) = m_i / n, \qquad (3)$$

где m_i – число измерений скорости, приходящихся на i-й интервал; n – общее число измерений скорости за рассматриваемый период времени.

Стандартные градации скорости $\Delta v_i = v_i^{\max} - v_i^{\min}$ имеют 15 интервалов со следующими значениями: 0-1, 2-3,…, 16-17, 18-20, 21-24, 25-28, 29-34, 35-40 и более 40 м/с. Границы интервалов соответствуют средним скоростям ветра между смежными диапазонами скоростей, т.е., например, в градацию 4-5 м/с попадают скорости в диапазоне $3{,}5 < v \le 5{,}5$ м/с.

Формула (1) может быть применена для любого интервала времени, такого, как месяц, сезон или год. Таким образом, средняя удельная энергия ветра $E_{вп}^{уд}$, Дж/м^2 представляется выражением:

$$P_{ср} = 0{,}5\cdot\rho_{ср}\cdot T\cdot\sum_{i=1}^{n} v_i^3\cdot t_i(\Delta v_i), \qquad (4)$$

где T, с, - период наблюдения.

Целью данной работы является построение карт распределения средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП на территории Дагестана для различных периодов времени. Для этого были выполнены следующие мероприятия:

1. Собраны первичные данные по скорости ветра, температуре воздуха и высоте расположения метеостанций над уровнем моря на территории Дагестана и пограничных районах.
2. Разработано программное обеспечение, выполняющее расчет средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП.
3. Построены карты пространственного распределения средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП на различных высотах с помощью системы геоинформационного моделирования.

Первичные данные по скорости ветра, температуре воздуха, а также данные о высоте расположении метеостанций над уровнем моря были получены с сервера "Погода России", разработанного лабораторией информационной поддержки космического мониторинга (SMIS IKI RAN) [4]. Для выполнения данной работы для всех метеостанций был выбран общий период 2000–2004 гг, обладающий полным объемом данных по скорости ветра и температуре воздуха. Для построения точных карт распределения средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП на территории Дагестана было решено использовать информацию с метеостанций, расположенных на соседних территориях. Все данные представлены в файлах формата *.txt.*

Для обработки первичных данных и расчета средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП было разработано программное обеспечение, выполняющее следующие действия:

1. Импорт данных из файлов формата *.txt* в файлы формата *.xls*.
2. Определение плотности воздуха по таблице из [2].
3. Определение средних значений плотности воздуха и куба скорости ветра.
4. Вычисление средней удельной мощности ВП по формуле (1) для выбранного периода времени и экспорт полученных значений в файл формата *.xls*.
5. Вычисление средней удельной энергии ВП по формуле (4) для выбранного периода времени и экспорт полученных значений в файл формата *.xls*.

В [2] плотность воздуха ρ представлена в виде таблицы как функция высоты z, м, и средней температуры на высоте z. Общий диапазон значений температуры принимается равным от -25° до 40°С с шагом 5°С, для каждого значения z указывается свой диапазон: от (-5° - 40°С) до (-25° - 20°С). Градиент температуры - 6,5 К/км. Высота z меняется в диапазоне от 0 до 2400 м шагом 100 м. Для определения более точных значений ρ изменение температуры и высоты с шагом 5 и 100 соответственно является недостаточным. Поэтому шаг был уменьшен: для температуры до 1°С, высоты до 10 м. Для вычисления новых приближенных значений ρ использовался метод интерполирования величины полиномом Лагранжа [6]. Вычисления производились в два этапа: интерполирование по температуре, затем по высоте. Кроме того диапазон температур от -25° до 40°С был определен для каждого значения z.

После формирования подробной таблицы для величины ρ, используя данные по температуре воздуха и высоте расположения метеостанций над уровнем моря, были определены значения ρ для всех значений скорости ветра и вычислены средние значения плотности воздуха для метеостанций для выбранных периодов времени.

Для определения среднего значения скорости ветра вся область значений

была разбита на интервалы Δv_i вблизи значений $v_i (i = 1, 2, \ldots, n)$, которые соответствуют середине интервала. Далее по формуле (3) была определена относительная доля t_i попадания всех значений скорости ветра за выбранный период времени в каждый интервал Δv_i, при этом соблюдалось выполнение условия нормировки: $\sum_{i=1}^{n} t_i = 1$. После чего по формуле (2) было определено среднее значение куба скорости ветра для выбранных периодов времени для всех метеостанций.

В завершении по формулам (1) и (4) были вычислены средняя удельная мощность и средняя удельная энергия для всех метеостанций за выбранный период времени на различных высотах. Все полученные значения экспортировались в соответствующие файлы формата *.xls*. Общий формат содержимого результирующих файлов может быть различен. Это зависит от выбранного периода времени *T*. На рис.1 представлены два возможных формата, где <ед.изм> - единицы измерения рассчитанной величины, в данном случае Вт/м^2 и Дж/(м^2·год).

Название метеостанции	январь 2000	февраль 2000	март 2000	…	октябрь 2000	ноябрь 2000	декабрь 2000
-	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>	…	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>
string	float	float	float	…	float	float	float
…	…	…	…	…	…	…	…

Название метеостанции	2000	2001	2002	2003	2004	2000-2004
-	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>	<ед.изм>
string	float	float	float	float	float	float
…	…	…	…	…	…	…

Рис.1. Формат содержимого результирующих файлов .xls.

Полученные *xls*-файлы импортировались в систему трехмерного геоинформационного моделирования [5] в проект «Республика Дагестан».

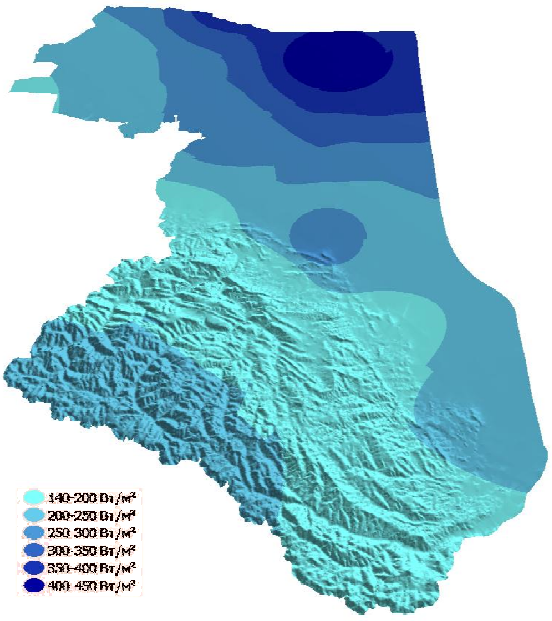


Рис. 2. Карта распределения среднегодовой удельной мощности ветрового потока на высоте 50 м на территории Дагестана за период 2000-2004 гг.

Результатом визуализации являются карты распределения средней удельной мощности и средней удельной энергии ВП на различных высотах за период 2000-2004 гг. На рис.2 и 3 показаны данные для периода 2000-2004 гг на высоте 50 м. На рис.2 выделены районы, соответствующие шести диапазонам средней удельной мощности ВП, Вт/м^2: 1) 140-200, 2) 200-250, 3) 250-300, 4) 350-400, 5) 400-450. На рис.3 – районы, соответствующие семи диапазонам средней удельной энергии ВП, Дж/(м^2·год): 1) 4,7-5,0×10^9; 2) 5,0-6,0×10^9; 3) 6,0-7,0×10^9; 4) 7,0-8,0×10^9; 5) 8,0-9,0×10^9; 6) 9,0-19,0×10^9; 10,0-15,0×10^9.

Из рисунков видно, что районы с самой высокой средней удельной мощностью 300-450 Вт/м^2 и средней удельной энергией 7,0-15,0×10^9 ВП находятся на севере территории Дагестана и в акватории Каспийского моря. На большей же части территории Дагестана средняя удельная мощность составляет около 200 Вт/м^2, а средняя удельная энергия – около 6,0×10^9 Дж/(м^2·год). Из этого следует, что вся территория Дагестана и особенно её северная часть являются весьма перспективными районами для использования ветровой энергии.

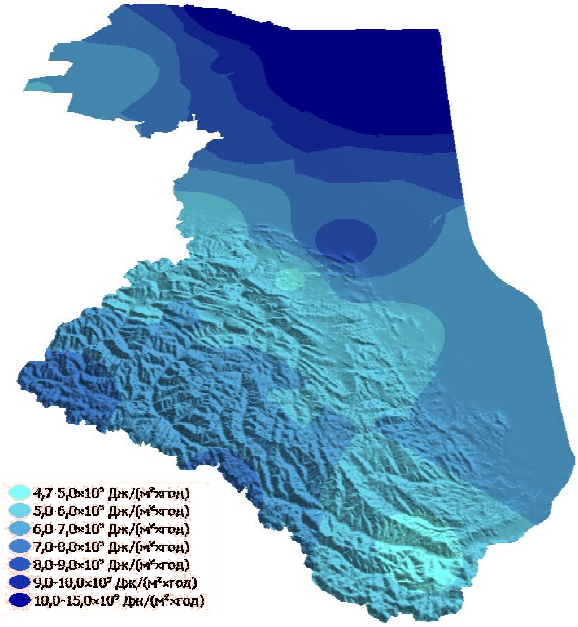


Рис. 3. Карта распределения среднегодовой удельной энергии ветрового потока на высоте 50 м на территории Дагестана за период 2000-2004 гг.

Литература:

1. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов. – СПб.: Наука, 2002. 314 с.
2. *Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М.* Атлас ветров России. - М.: Можайск-Терра, 2000. - 560с.
3. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие/ А.А. Бурмистров, В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина и др.; под ред. В.И. Виссарионова. – 2-еизд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 144 с.: ил.
4. Сервер «Погода России» // http://meteo.infospace.ru/
5. *Кобзаренко Д.Н., Камилова А.М., Гаджимурадов Р.Н.* Концепция построения системы трехмерного геоинформационного моделирования // Информационные технологии, №11, 2009, С. 32-36.
6. Численные методы и программирование: учебное пособие / Под ред. Проф. Л.Г. Гагариной. – М.: ИД «Форум»:Инфра-М, 2008. – 336 с.: ил. – (Профессиональное образование).

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ БИОМАССЫ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Спицина С.В.

Дагестанский государственный университет;
Махачкала, Россия; 367025, ул. М.Гаджиева, 43а; e-mail: Svet_SV@rambler.ru

Источниками биомассы в Республике Дагестан могут являться: твердые бытовые отходы (ТБО), которые сваливаются на полигонах, занимая огромные территории; осадочные сточные воды (ОСВ), которые не эффективно используются в качестве удобрений на полях, так как содержат семена растений и другой «мусор» не нужный в удобрениях; опилки, которые сжигаются; отходы с животноводческих ферм и птицефабрик, в которых также содержатся нежелательные семена сорняков, яйца гельминтов, нитраты и нитриты. Все эти отходы могут давать энергию при небольших вложениях на их переработку. Затраты окупаются через 2-4 года. И что не менее важно, не наносится вред окружающей среде.

Твердые бытовые отходы, образующиеся в большом количестве (занимающие значительные территории, загрязняющие окружающую среду) и часто не находящие хозяйственного использования, являются постоянно возобновляемыми вторичными энергетическими ресурсами и представляют интерес, прежде всего, для местной энергетики. Они обладают сравнительно высоким энергетическим потенциалом и достаточно эффективно могут конвертироваться в топливо и энергию. Использование ТБО в качестве вторичных энергетических ресурсов является важной составной частью энергосбережения и способствует снижению загрязнения окружающей среды.

По теплоте сгорания ТБО приближаются к низкокалорийным углям и могут рассматриваться как весьма распространенное, доступное, низкокалорийное, постоянно возобновляемое местное топливо, не требующее затрат на добычу, которое должно найти применение в народном хозяйстве. Низшая теплота сгорания ТБО в зависимости от времени года и региона изменяется в пределах 4180-10450 кДж/кг. Для предварительной оценки энергетического потенциала бытовых отходов их низшая теплота сгорания может приниматься в размере 5000-8000 кДж/кг. Общий энергетический потенциал ТБО, ежегодно образующихся в РФ (85 млн. т), оцененный по их теплоте сгорании, составляет 3,5·1014-6,4·1014 кДж (8,1-10,2 млн. т у. т.).

Ежегодно в РД фактически образуется свыше 800 тыс. м3 отходов, при складировании которых занято более 220 га земли, не считая несанкционированные свалки.

Получение тепловой и электрической энергии из ТБО в основном осуществляется при их сжигании и захоронении на полигонах. Большинство существующих мест по захоронению бытовых и иных отходов не отвечают элементарным санитарным и природоохранным требованиям: отсутствуют санитарно-защитные зоны, нет ограждений, не ведется учет захороненных вредных отходов. Эти факторы приводят к загрязнению почвы, подземных и поверхностных вод, а также атмосферного воздуха при сжигании мусора.

Полигонное захоронение бытовых отходов широко практикуется во всем мире. Основное достоинство технологии захоронения – простота, малые капитальные и эксплуатационные затраты и относительная безопасность. При разложении бытовых отходов выделяется свалочный биогаз (СБ) – ценное

углеводородное топливо (содержащее метан до 70%), которое можно использовать для производства тепловой и электрической энергии.

Получение свалочного биогаза весьма перспективно для Дагестана, так как образующиеся бытовые отходы захораниваются на полигонах и свалках. Дополнительно ежегодно для захоронения ТБО отчуждаеются земли.

Значительное количество ТБО попадает на несанкционированные свалки, количество которых постоянно растет. Поэтому ТБО представляют собой источник загрязнения окружающей среды, способствуя распространению опасных веществ. Вместе с тем они содержат в своем составе ценные компоненты, которые могут быть использованы в качестве вторичных ресурсов

В Дагестане нерешённым остаётся один из наиболее проблемных вопросов экологической безопасности – это утилизация и захоронение отходов производства и потребления, который связан, в том числе, и с отсутствием в республике мусороперерабатывающих заводов. Ежедневно только из Махачкалы вывозятся и сжигаются сотни тонн бытовых и строительных отходов. Но все равно мощностей по уничтожению отходов явно не хватает. Кроме того, город быстро растет, и уже сегодня необходимо думать о том, как утилизировать мусор, когда население столицы достигнет миллиона человек [1]. Для решения этой серьёзной и весьма актуальной проблемы была разработана региональная целевая программа «Отходы», заказчиком которой выступило министерство природных ресурсов и экологии РД.

В ближайшее время, в Кизилюртовском районе предусмотрено строительство Дагестанского отходоперерабатывающего комплекса «Технопарк», который, как предполагается, будет обслуживать территории 5 районов республики.

В Махачкале тоже планируется построить мусороперерабатывающий завод и в результате переработки отходов получать электрическую и тепловую энергию. Мощность планируемого завода по переработке твердых бытовых отходов – 250 тысяч тонн в год. Уже выбрана технология сжигания. Оно будет производиться на базе оборудования из Франции и Германии. Площадку под строительство завода уже подготовили – это 5 гектаров земли. Начальная стадия завода обойдется инвесторам в более 3,6 млрд. руб. Сроки окупаемости завода 4-5 лет. Этот проект поддерживает президент и правительство республики. Важность этого проекта в том, что он не только обеспечит регион большим количеством рабочих мест, но и позволит наладить сотрудничество со многими строительными компаниями на территории РД.

Сельское хозяйство традиционно является одной из ключевых отраслей в экономике республики, чему способствуют как благоприятный климат, так и наличие необходимых площадей для его развития. Площадь сельхозугодий составляет 3,4 млн. га, из них пастбища занимают 2650 тыс. га, пашни – 513 тыс. га, многолетние насаждения – 76 тыс. га, остальное – сенокосы и залежь [2].

Известно, что отходы предприятий животноводства и птицеводства относятся к веществам высокой степени токсичности и их хранение в открытом виде представляет высокую экологическую опасность, поэтому в настоящее время разработан ряд технологий, позволяющих осуществить процесс переработки отходов в высококачественные органические удобрения и биогаз [3].

Наиболее эффективным способом реализации энергетического потенциала сельскохозяйственных отходов (СО), учитывая вопросы экологии и рационального природопользования в нашей республике, является производство из него биогаза. Сырьем для получения биогаза могут служить все органические

отходы сельскохозяйственных производств. К ним относятся: отходы животных, растительные отходы (солома, трава, листья и т.д.). В настоящее время в Республике их используют не эффективно. Около 50 % навоза используют как удобрение, разбрасывая на полях, порядка 30 % складируется. Кроме биогаза, при анаэробном сбраживании этих отходов получают весьма ценный продукт – органические удобрения.

В Дагестане количество отходов животноводства и птицеводства составляет около 850 тыс. т/год. Существует несколько путей реализации биогазового потенциала РД. Один из них – строительство централизованных биогазовых комплексов (ЦБК), широко применяемых в странах ЕС. Эти комплексы перерабатывают СО нескольких близлежащих хозяйств, а также бытовые отходы. Второй путь – это использование небольших индивидуальных биогазовых установок (ИБУ), эти установки перерабатывают отходы непосредственно в месте, где они образуются. Сброженный навоз поступает в хранилище, откуда по потребности забирают потребители для удобрения полей и садов. Биогаз поступает в газгольдер и расходуется на нужды фермера.

Проведенный анализ, позволяет сделать вывод об энергетическом потенциале отходов сельского хозяйства, которым обладает Республика Дагестан. Всего он оценивается в 106 МВт (~120 тыс. т у. т.), что составляет более 15 % от общего энергобаланса республики [4].

Одним из эффективных способов получения энергии в будущем может стать использование в качестве топлива твердых бытовых отходов. Использование тепла, получаемого при сжигании твердых бытовых отходов, предусматривается для выработки электроэнергии.

Среди возобновляемых источников энергии на основе сельскохозяйственных отходов биомасса является одним из перспективных и экологически чистых заменителей минерального топлива при производстве энергии. Полученный в результате анаэробной переработки навоза и отходов в биогазовых установках биогаз, может идти на отопление животноводческих помещений, жилых домов, теплиц, на получение энергии для приготовления пищи, сушку сельскохозяйственных продуктов горячим воздухом, подогрев воды, выработку электроэнергии с помощью газовых генераторов. Общий энергетический потенциал использования отходов животноводства на основе производства биогаза очень велик и позволяет удовлетворить годовую потребность сельского хозяйства в тепловой энергии.

Литература:

1. Исрапилов С. Завод будет построен без иностранных партнеров.// Махачкалинские известия. – 2010. – №10.
2. Государственный доклад о состоянии и использовании природных ресурсов и охране окружающей среды Республики Дагестан.: Махачкала. – 2008. – 148 с.
3. Шалимов Ю.Н., Гусев А.Л., Мхиторян Г.А., Литейнов Ю.В., Ковалев В.Е., Доброквашин Е.А., Миленина Е.С., Савельева Е.Л., Шалимов Д.Л. Современная альтернативная энергетика с точки зрения экономики и экологии.// Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – №10, с.114-138.
4. Магомедов А.М., Спицина С.В. Биоэнергетический потенциал сельскохозяйственных отходов и возможности его реализации в Республике Дагестан.// Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение. Законодательная и нормативная база. Новые энергоресурсосберегающие технологии и оборудование. – Пермь, 19-20 ноября 2009 г.

МЕХАНИЗМЫ, ФОРМЫ И МЕТОДЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ РЕГИОНА

Магомедова Н.А.[1], Цапиева О.К[2]

[1] Филиал объединенного института высоких температур РАН, Махачкала, Россия;
367030, Махачкала, ул. Ярагского, 75; e-mail: ivtran.inbox.ru;
[2] Учреждение российской академии наук Институт социально-экономических исследований Дагестанского НЦ РАН;
367030, Махачкала, ул. Ярагского, 75

В настоящее время конкурентоспособность малой энергетики возросла не только за счет роста цен на органическое топливо, но в такой же степени за счет высоких темпов инфляции и больших процентов на капитал. Поэтому крупные энергетические объекты, сроки, строительства которых растягиваются на 5 – 10 лет, лишаются одного из главных преимуществ – меньших удельных капиталовложений. Несмотря на это, обеспечение выпуска соответствующего оборудования для использования возобновляемых источников энергии нуждается в соответствующей экономической поддержке, включая льготные налоги и кредиты на производства, внедряющие прогрессивные технологии.

К числу серьезных сдерживающих факторов, препятствующих расширению масштабов развития экологически безопасных источников энергии можно отнести высокий уровень косвенных затрат, существенно увеличивающих и без того высокие капитальные удельные затраты в установки возобновляемых источников энергии.

Широкое развитие энергетики на базе экологически безопасных источников энергии сопряжено с решением ряда проблем, основными среди которых являются:

– несовершенство методов технико-экономического анализа систем энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии, не учитывающих экологические и социальные преимущества, которые обеспечивают приоритетное развитие данного направления энергетики;

– отсутствие механизма экономического стимулирования производства и внедрения оборудования возобновляемых источников энергии и соответствующей правовой базы на федеральном и, особенно, региональном уровнях.

Основное внимание должно быть уделено мерам государственного регулирования, позволяющим создать благоприятные условия для внедрения установок по использованию экологически безопасных источников энергии. К ним относятся:

– создание институционального органа, ответственного за формирование и реализацию политики в сфере внедрения экологически безопасных источников энергии как важнейшей части осуществления энергосберегающей политики;

– обеспечение стабильной финансово–инвестиционной базы развития экологически безопасных источников энергии;

– создание и широкое применение экономических стимулов внедрения экологически безопасных источников энергии;

– разработка и применение специализированной законодательной и нормативно–правовой базы;

– организация рекламно–информационных и разъяснительных кампаний на

различных уровнях.

При создании организационно–финансовых структур и правовой основы важнейшее значение имеет учет региональных социально–экономических особенностей региона.

Анализ законодательных инициатив стран, где экологически безопасные источники энергии имеют широкое применение, показал, что особый стимул возобновляемой энергетике дает установление гарантированных закупочных тарифов в сфере торговли электричеством.

Для успешного продвижения на рынок возобновляемых источников энергии возобновляемых источников энергии необходимо применение, как специального закупочного тарифа, так и государственных субсидий.

Налоговая поддержка в пользу возобновляемой энергетики может быть организована двумя путями: как часть более широких инициатив в защиту окружающей среды (экологические налоги) и как налоговые льготы, поощряющие инвестиции возобновляемую энергетику. Экологические налоги могут быть введены в рамках общей природоохранной политики, в частности, в целях снижения выбросов парниковых газов.

Основой решения проблемы вовлечения в топливно - энергетический баланс Республики Дагестан экологически безопасных источников энергии должны стать долговременные программы по нетрадиционной энергетике на федеральном и региональном уровне, включающие все этапы работ, включая и НИОКР. При всей значимости этой задачи практическое решение ее невозможно без создания соответствующей экономической и правовой базы.

На основании анализа путей развития нетрадиционной энергетики за рубежом и соответствующего опыта в развитых странах и странах с переходной экономикой мы разработали схема основных организационных направлений решения проблемы развития возобновляемых источников энергии на региональном уровне. Аналогичная структура, очевидно, должна иметься и на федеральном уровне, частью которой должны быть соответствующие органы, решения которых в той или иной степени должны учитываться на региональном уровне.

Реализацию государственных программ в такой важнейшей отрасли экономики как энергетика, государство должно осуществлять через специализированные организации. В таком качестве на региональном уровне должен выступить ***Центр по нетрадиционной энергетике***, в рамках которого функционируют группы экспертов, занимающиеся узкоспециализированными направлениями развития возобновляемых источников энергии, например, исследовательской деятельностью, поддержкой демонстрационных проектов, организацией научных семинаров и образовательных программ. Руководство Центром на федеральном и республиканском уровнях должны осуществлять соответствующие ведомства, занимающиеся вопросами энергетики и экологии. В специализированные комиссии Центра могут войти наряду с представителями этих ведомств высококвалифицированные ученые и представители заинтересованных организаций.

Основными направлениями деятельности Центра по нетрадиционной энергетике и энергосбережению, по нашему мнению, должны стать:

- отбор наиболее перспективных проектов в сфере возобновляемых источников энергии с целью представления им государственной финансовой поддержки;
- аккумулирование и распределение средств, предназначенных для финансовой поддержки НИОКР в сфере возобновляемых источников энергии;

- координация работы информационных кампаний и образовательных программ для различных слоев населения по проблемам развития возобновляемых источников энергии;
- решение проблем, связанных со стандартизацией оборудования и установок, использующих возобновляемых источников энергии;
- разработка рекомендаций для Правительства по улучшению законодательно–правовых и финансово–экономических условий развития возобновляемых источников энергии в республике;
- внедрение проектов по планированию, строительству, финансированию и эксплуатации энергетических установок;
- координация деятельности на региональном и муниципальном уровнях управления, организация взаимодействия между общественным управлением, частными компаниями и деловыми ассоциациями.

Каждому обществу для его безопасного существования требуется определённый уровень обеспеченности энергией, ниже которого промышленность, транспорт, медицинские учреждения, система борьбы с чрезвычайными ситуациями и другие жизненно важные системы начинают функционировать со сбоями. Этот минимально необходимый уровень представляет собой порог энергетической безопасности, т.е. защищённости жизненно важных интересов отдельных людей, общества и государства; при этом прилагательное «энергетическая» указывает на зависимость данного вида безопасности от обеспеченности энергоресурсами.

С другой стороны, высокий уровень энергопотребления влечёт проблемы загрязнения окружающей среды и возможного исчерпания технически и экономически доступных невозобновимых источников энергии. Наиболее наглядно загрязнение окружающей среды при использовании ископаемого органического топлива, от его добычи и транспортировки до сжигания в топках тепловых электростанций, в камерах сгорания двигателей и в других подобных устройствах. Таким образом, перед обществом стоит задача вписаться в «эколого-энергетический зазор»: производство энергии должно быть достаточным для обеспечения энергетической безопасности, но при этом не подвергать опасности состояние окружающей среды. Выполнению этой задачи должна быть посвящена экологически обоснованная государственная энергетическая политика. В осуществлении этой политики возможно сочетание трёх основных стратегий. Назовём их.

Первая стратегия – прямое увеличение производства энергии за счёт традиционных для данного общества энергоресурсов, при соблюдении (а при необходимости – развитии и совершенствовании) эколого-правовых требований: экологического нормирования, оценки воздействия на окружающую среду и др. Этот путь эффективен в том случае, когда ещё не достигнуты экологические пределы энергетического роста.

Вторая стратегия состоит в развитии принципиально новых источников энергии. В XX столетии таковыми стали ядерная энергия (в настоящее время уже перешедшая в разряд «традиционных» источников), а также энергия ветра, солнечного излучения, геотермальная, приливная и др. «нетрадиционные» виды. Поскольку новые виды энергетики создают новые виды воздействий на окружающую среду, их развитие должно сопровождаться развитием эколого-правовых требований в энергетике. Здесь особо следует подчеркнуть разработку и принятие (на основе положительного заключения государственной экологической экспертизы) для новых видов энергетических установок новых технико-

экологических стандартов.

Третья стратегия – снижение энергоёмкости экономики за счёт повышения её энергоэффективности, т.е. эффективности использования энергии и энергетических ресурсов. При этом снижается как объём потребляемых энергоресурсов (при сохранении энергетической безопасности), так и антропогенная нагрузка на окружающую среду. Прибегая к использованному ранее образному выражению, «эколого-энергетический зазор», в который должно вписаться общество, в результате реализации этой стратегии становится менее узким.

Здесь необходимо сделать два замечания.

Первое. Потребность общества в энергии зависит от ряда факторов: географических, в том числе климатических особенностей территории региона; структуры и технологического уровня её экономики; традиций данного общества, а также от его потребительских привычек. Нетрудно видеть, что одни из этих факторов не поддаются изменению в результате целенаправленной государственной политики (географические особенности страны), в то время как другие могут быть изменены (структура экономики, используемые технологии, потребительские привычки). Так, высокая энергоёмкость российской экономики – в 2-4 раза выше, чем в западных странах – обусловлена не только организационно и технологически, но и географическими особенностями региона. Соответственно, программы повышения энергоэффективности, безусловно, необходимы для оздоровления состояния окружающей среды и экономии невозобновимых ресурсов, но при этом следует помнить, что при прочих равных условиях энергоёмкость российской экономики останется выше.

Второе. Уменьшение энергоёмкости экономики не всегда обусловлено повышением её энергоэффективности и не всегда влечёт снижение антропогенной нагрузки на природную среду, если рассматривать глобальную экосистему в целом. Такая ситуация возникает, когда снижение энергоёмкости национальной экономики достигается за счёт вынесения наиболее энергоёмких производств за пределы страны. С точки зрения обеспечения и энергетической, и экологической безопасности, ценность представляет именно повышение энергоэффективности экономики.

Энергетика является базовым звеном экономики региона. Производство валового национального продукта, рост материальных и трудовых ресурсов в решающей степени определяются состоянием топливно-энергетического комплекса и величиной производимой энергии. В силу этого, начиная структурную перестройку экономики, необходимо, прежде всего, обратить внимание на состояние и тенденции развития энергетики, наличие в ней потенциала энергосбережения и внедрения ресурсосберегающих технологий.

Анализ энергетической базы и топливно-энергетических балансов Дагестана показывает, что основа ее функционирования топливные энергоносители и топливосжигающие технологии. По структуре потребляемых энергоресурсов в экономике на долю топлива (уголь, нефть, газ, дрова) приходится 80 %, а электроэнергии - 20 %. При этом наблюдается постоянное несоответствие между собственным производством топлива и его потреблением: скорость нарастания потребления топлива в республике превышает скорость его производства в 5 раз. В то же время среднегодовой прирост собственного производства электроэнергии составляет 24 %, а прирост ее потребления всего 3,4 %. В темпах потребления электроэнергии Дагестан отстает относительно производства всей энергии более чем в 2 раза. Не лучше положение и с дешевым

потреблением электроэнергии: по уровню его среднегодового потребления Дагестан отстает от России и других стран мира в 3-4 раза, а по отдельным горным районам в 10 раз.

Сложившаяся ситуация крайне неблагоприятна для Дагестана**.**

Во-первых, сохраняющиеся тенденции развития энерго-комплекса противоречат общемировым: повсюду в мире потребление электроэнергии опережает ее производство вдвое.

Во-вторых, чтобы обеспечить стабильное функционирование экономики, республике приходится импортировать значительные топливные ресурсы, сжигание которых осложняет экологическую ситуацию.

В-третьих**,** использование принципов централизации энергообеспечения становится фактором торможения энергосбережения и опасности для окружающей среды. По экспертным оценкам, выполненным на основе информационных материалов топливно-энергетического баланса РД, суммарные потери энергии в республике достигали, равной почти трем четвертям совместной годовой выработки Чирюртовской и Миатлинской ГЭС.

Подобное состояние свидетельствует, прежде всего, об отсутствии в РД какой-либо системы энергосбережения и о недопустимо низком уровне оснащенности объектов энергетики и промышленности соответствующими техническими средствами учета и контроля расходуемой энергии. Особенно это относится к системам топлива и энергоснабжения. А из-за фактического отсутствия достоверности измерительной информации нельзя добиться эффективности принимаемых решений в одной из важнейших областей энергетической политики - энергосбережении.

Итак, необходим коренной пересмотр энергетической политики Дагестана с учетом состояния основных системных звеньев топливно-энергетического комплекса, местных (региональных) особенностей и природных условий, а также прогрессивных тенденций развития мировой энергетики.

Топливно-энергетический комплекс республики - один из самых капиталоемких частей экономики. В его развитие и функционирование вовлекается значительное количество материальных и трудовых ресурсов. От его состояния в значительной степени зависят жизнеспособность экономики и повышение уровня благосостояния населения.

Основными звеньями топливно-энергетического комплекса в Дагестане являются системы электроснабжения и транспортной энергетики.

Централизованная система электроснабжения включает в себя всю электрическую сеть, независимо от ведомственной подчиненности. Централизация электроснабжения была обусловлена требованиями максимальной концентрации промышленных производств, но этот принцип имеет очевидные недостатки.

Принципы централизации, во-первых, диктуют крупномасштабное освоение только гидроресурсов посредством строительства больших ГЭС, хотя Дагестан располагает и другими возобновляемыми энергоресурсами. Во-вторых, это требует создания дальних электропередач высоких напряжений для транспортировки энергии в отдаленные районы. В результате - удлиняются сроки освоения гидроэнергоресурсов, усиливается противоэкологическое воздействие энергетики, увеличиваются капиталовложения, потери электроэнергии и, в конечном счете, снижается эффективность использования энергорееурсов. Последовательная схема освоения гидроэнергоресурсов, принятая в энергетической практике РД, обуславливает диспропорции в социально-

экономическом развитии отдельных территориальных энергетических зон, вызывая существенное отставание в уровне электрификации, особенно горных районов.

Существенным недостатком сложившейся системы является то, что, несмотря на наличие в республике определенного избытка электроэнергии, мы импортируем ежегодно из объединенной энергосистемы Кавказа более 1 млрд кВт/ч энергии. Особенно сильна энергетическая зависимость Дагестана от внешних источников в осенне-зимний период. При этом стала постоянной тенденция роста стоимости импортируемой электроэнергии, т.к. вырабатывается она в основном на теплоэлектростанциях. Расчеты показывают, что дефицит осенне-зимнего периода при восстановлении объемов промышленного производства в Дагестане не может быть покрыт даже с вводом в строй Ирганайской ГЭС.

Программа освоения гидроэнергоресурсов Дагестана, принятая до 2010 г., требует суммарных капиталовложений около 3 млрд долларов. Это делает программу фактически неосуществимой. Необходим неотложный переход к иной - параллельной - схеме широкомасштабного освоения всех основных возобновляемых энергоресурсов республики. Централизованная система топливо-обеспечения РД содержит организационные и технические звенья, участвующие в добыче и обеспечении республики твердым, жидким и газообразным топливом и тепловой энергией. Целью ее является передача тепловой энергии и горячей воды коммунально-бытовому сектору.

Покрытие потребности топливно-энергетического комплекса РД в твердом топливе (уголь, отопительные дрова) традиционно осуществляется за счет внешних источников. В связи с отпуском цен на энергоносители и увеличением стоимости угля, отопительных дров, нефтепродуктов и природного газа сократилось и потребление отдельных видов топлива. В тяжелое положение попали горные районы.

Сохранение традиционных методов и средств, реализующих топливную концепцию энергетики, может явиться одной из причин дальнейшего усиления напряженности в энергетике и экологии, а также существенного дефицита в бюджете республики. Если ориентироваться на цены 2010 г. и уровень топливопотребления 2007 г., то суммарные ежегодные расходы только коммунального бытового сектора на топливо составляют около 31 млрд рублей.

В целом ВИЭ связаны с большими капитальными вложениями и требуют аккумулирования значительных финансовых средств. Кроме больших капитальных удельных затрат экономическая эффективность использования ВИЭ снижается в некоторых случаях длительностью сроков строительства, а также высокой степенью риска по причине определенной зависимости от природного фактора и отсутствия уверенности места ВИЭ в будущем балансе потребления энергетических ресурсов. Последнее в меньшей степени относится к системам солнечного теплоснабжения, срок строительства которых составляет от нескольких недель до 1 года.

Однако широкое развитие энергетики на базе ВИЭ сопряжено с решением ряда проблем, основными среди которых являются:

– низкая плотность концентрации и случайно–детерминированный характер прихода энергии, требующих совершенных технических схем преобразования и аккумулирования энергии;

– несовершенство методов Технико-экономического анализа систем энергоснабжения на основе ВИЭ, учитывающих экологические и социальные

преимущества и обеспечивающие приоритетное развитие данного направления энергетики;

– отсутствие механизма экономического стимулирования производства и внедрения оборудования ВИЭ и соответствующей правовой базы на федеральном и, особенно, региональном уровнях.

Основное внимание должно быть уделено ключевым слагаемым в структуре мер государственного регулирования, необходимых для создания на существующем уровне технологического развития установок по использованию ВИЭ благоприятных условий для их развития. К ним относятся:

– наличие институционального органа, ответственного за формирование и реализацию политики в сфере ВИЭ как важнейшей части осуществления энергосберегающей политики;

– обеспечение стабильной финансово–инвестиционной базы;

– создание и широкое применение экономических стимулов;

– разработка и применение специализированной законодательной и нормативно–правовой базы;

– организация рекламно–информационных и разъяснительных кампаний на различных уровнях.

Реализация политики энергосбережения невозможна без четко функционирующей системы управления энергосбережением на федеральном, региональном и муниципальном уровнях. Система управления энергосбережением предполагает наличие четырех базовых блоков:

1) создание законодательной базы энергосбережения;

2) разработка и реализация федеральных, региональных, муниципальных и отраслевых программ энергосбережения;

3) создание фондов энергосбережения для консолидации финансовых средств всех уровней в целях внедрения энергосберегающих проектов;

4) создание центров энергосбережения, призванных осуществлять научно-методическое сопровождение и координацию энергосберегающей политики соответствующего уровня.

Демонстрационные зоны высокой энергетической эффективности создаются с целью пропаганды эффективного использования энергетических ресурсов в городах и районах, различных предприятиях и организациях. Имеется два направления к созданию демонстрационных зон высокой энергетической эффективности (демзоны):

1) создание демзон на крупных территориях областях, городах районах;

2) создание демзон на многопрофильных предприятиях и организациях.

В каждом из вариантов имеются свои достоинства и недостатки, и оба варианта имеют право на существование.

В первом блоке наиболее тщательно прорабатываются нормативные базы и территориальные проблемы, например обеспечение населения теплом от местных котельных малой мощности и/или централизованно от энергосистем. Во втором больше внимания уделяется отдельным конкретным технологиям и техническим решениям.

Для внедрения демзон по второму варианту наиболее целесообразны многопрофильные предприятия и организации, потому что главной задачей при реализации демонстрационных зон является проведение широкомасштабной информационно-пропагандистской деятельности среди специалистов и общественности по демонстрации на практике преимуществ внедрения энергосберегающих технологий, оборудования, изделий и материалов.

Создание демонстрационных зон высокой энергетической эффективности в городах и районах производится по решению административных органов управления различных уровней администраций: автономной республики, края, области, города или района и на основании договора между ними и другими заинтересованными лицами. Финансирование расходов на создание демонстрационных зон высокой энергетической эффективности может производиться за счет сторон – организаторов демонстрационных зон.

Заинтересованность государства в энерго- и ресурсосбережении, способствующем сохранению национальных запасов энергоресурсов и снижению воздействия отрицательных последствий научно-технического прогресса на природу и население страны, очевидна. В связи с этим основная роль в организации энергосбережения и энергоэффективности принадлежит государственным структурам управления. К основным задачам подобных структур можно отнести:

- проведение государственной политики в сфере энергосбережения и регулирование деятельности, направленной на эффективное использование и экономию топливно-энергетических ресурсов в народном хозяйстве Федерации;
- осуществление государственного надзора за рациональным использованием топлива, электрической и тепловой энергии объединениями, предприятиями, учреждениями и организациями независимо от их форм собственности и подчиненности.

В соответствии с этими задачами государство:

- способствует созданию экономических условий для повышения заинтересованности юридических и физических лиц в энергосбережении;
- организует, разрабатывает и осуществляет мероприятия по экономии и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов, включая проведение работ по развитию нетрадиционных источников энергии, вторичных энергоресурсов и местных видов ТЭР в целях замещения импортируемых;
- разрабатывает и вносит в установленном порядке в правительство предложения по повышению энергоэффективности народного хозяйства страны;
- способствует определению основных показателей по энергосбережению для отраслей и регионов;
- организует разработку и реализацию государственных научно-технических программ по энергосбережению, согласовывает и контролирует соответствующие отраслевые и региональные программы.

Важнейшей задачей государственных структур управления энергосбережением является также государственный надзор за рациональным использованием ТЭР в объединениях, предприятиях, учреждениях и организациях.

Государственный надзор осуществляется также за реализацией потребителями мер по экономии ТЭР и соблюдением норм расхода электрической и тепловой энергии, котельно-печного топлива.

Координация межведомственной деятельности в области энергосбережения осуществляется на основе Координационной программы (далее – Программа), а контроль проводит Координационный межведомственный совет (далее – Совет), к направлениям деятельности которого можно отнести:

- подготовку предложений по разработке и осуществлению мер, обеспечивающих повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов;
- содействие проведению энергосберегающей политики в стране.

В соответствии с этими задачами Координационный совет:

- разрабатывает предложения о приоритетных направлениях проведения научных исследований и применения прикладных разработок в области энергосбережения;
- дает рекомендации по внедрению энергоэффективных оборудования, технологий и материалов;
- разрабатывает предложения по вовлечению в топливный баланс местных топливных ресурсов, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- рассматривает проекты концепций и программ в области энергосбережения, использования местных топливных ресурсов, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии;
- дает заключения о целесообразности использования энергоемких оборудования и технологий и выпуске энергоемкой продукции в республике;
- содействует популяризации преимуществ энергосбережения, использования новых видов энергии и топлива;
- участвует в организации конференций, семинаров и совещаний по вопросам, входящим в компетенцию Совета;
- содействует организации подготовки кадров и повышения квалификации специалистов в области энергосбережения.

Литература:

1. *Магомедов И.Ш., Магомедова Н.А.* Теоретические основы формирование социально-экономических предпосылок устойчивого развития региона.// Журнал Региональные проблемы преобразования экономики - Махачкала:2009, №2-0,5пл.
2. *Магомедова Н.А.* Возобновляемая энергетика как фактор устойчивого развития региона (на примере РД)// журнал Финансы и кредит Региональная экономика: теория и практика - Москва 2009г, №43-0,9п.л.
3. *Магомедова Н. А. Цапиева О. К.* Ресурсы и эффективность использования солнечной энергии в Республике Дагестан // СПб.: Политехника 2008,. 7,5п.л,114 с.
4. *Амадзиев А.М., Магомедова Н.А., Цапиева О.К.* Концепция использования солнечной энергии в Республике Дагестан, Махачкала, 2009, 7,4 п.л.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ДЕМОНСТРАЦИОННОЙ ЗОНЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ РЕГИОНА

Магомедов И.Ш.

Филиал объединенного института высоких температур РАН;
Махачкала, Россия; 367030, ул.Ярагского, 75; e-mail: ivtran.inbox.ru

В настоящее время во всем мире проблема усовершенствования методики обучения и выпуска высококвалифицированных специалистов в области нетрадиционной энергетики становится наиболее острой. Действующий процесс обучения в лучшем случае сводится к чтению дополнительных специальных курсов по использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии и «экскурсионному» ознакомлению с действующими объектами при их наличии.

А как, известно, подготовка специалистов в области возобновляемых источников энергии является междисциплинарной: многие научные и технические проблемы, относящиеся к ней, находятся на стыке естественных и инженерных наук. Стройной системы образования для этого актуального направления развития науки и техники не создано пока ни в России, ни в других странах.

Инженерное использование возобновляемых источников энергии в качестве одного из компонентов всемирной энергетической системы требует знаний в области самых различных по характеру технологий, а также умения приложить эти знания к конкретным условиям. В настоящее время практически не существует специальных университетских курсов и программ обучения, предназначенных для целенаправленной подготовки инженеров и исследователей в этом важном для человечества направлении.

Усилия в создании стройной системы образования и информации по возобновляемым источникам энергии являются разрозненными действиями отдельных университетов или научных центров. Отсутствие координации не позволяет охватить все требуемые направления деятельности.

Естественно, такой метод обучения малоэффективен и нуждается в усовершенствовании.

Современные условия в России, СНГ и мировой опыт настоятельно требуют концентрации усилий отечественных и зарубежных специалистов в области ВИЭ по разработке методического, информационного и иного обеспечения для успешной организации подготовки специалистов разного уровня и широкой пропаганды возобновляемых источников энергии.

В силу этих причин решение проблемы подготовки специалистов в области возобновляемых источников энергии требует объединения усилий многих высших учебных заведений и научных институтов, компетентных в различных аспектах этой многогранной проблемы.

С 1996 года при Филиале Объединенного института высоких температур в г. Махачкале Российской Академии наук (Филиал ОИВТ РАН) создан Научно-образовательный комплекс (НОК) по подготовке кадров и развитию фундаментальных исследований в области нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Основной целью НОК является обеспечение непрерывности процесса обучения по схеме - «лицей - университет (академия)» с привлечением учащихся лицея и студентов к фундаментальным и прикладным исследованиям,

проводимым в Филиале ОИВТ РАН.

Активное участие в работе НОК принимают преподаватели и специалисты из Дагестанского государственного университета, Дагестанского технического университета, Дагестанской сельскохозяйственной академии и Махачкалинского физико-технического лицея.

Специалисты Филиала ОИВТ РАН имеют большой опыт по международному сотрудничеству и проведению совместных научных исследований в области возобновляемых источников энергии с представителями стран СНГ и зарубежных стран (Испания, Мексика, Чехия, Словакия, Польша, Азербайджан, Армения, Белоруссия, Грузия, Украина).

Настоящий проект предусматривает качественно новое развитие указанного НОК и превращение его в "Международный научно-исследовательский и образовательный центр по нанотехнологии, высокотемпературному использованию солнечной энергии и экологии" с целью установления партнерских связей с зарубежными образовательными и научными центрами и сотрудничества с ними.

Инициаторами (непосредственными исполнителями) по созданию "Международного научно-исследовательского и образовательного центра по нанотехнологии, высокотемпературному использованию солнечной энергии и экологии" являются: Объединенный институт высоких температур РАН и его Филиал в г. Махачкале, Московский государственный университет инженерной экологии (МГУИЭ) и Международная кафедра ЮНЕСКО МГУИЭ, а также ее филиал в Дагестанском государственном техническом университете.

Создание "Международного научно-исследовательского и образовательного центра по нанотехнологии, высокотемпературному использованию солнечной энергии и экологии" поддержано Комиссией РФ по делам ЮНЕСКО, департаментом инженерных наук ЮНЕСКО (Париж, Франция), Бюро ЮНЕСКО в Москве и Президиумом сети (EURONETRES). Предварительное согласие на создание Международного Центра получено от Президиума РАН, Министерства образования и науки РФ, Правительства республики Дагестан, а также от государств Каспийского и Кавказского регионов.

Проект предусматривает обмен специалистами между научно-образовательным центром и зарубежными образовательными и научными центрами, занимающимися подготовкой высококвалифицированных кадров в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики.

Научно-производственная база Филиала ОИВТ РАН еще при создании (1982г.) планировалась как международный научно-исследовательский центр по использованию возобновляемых нетрадиционных источников энергии и подготовке кадров. Поэтому были построены капитальные 2-х и 3-х этажные лабораторные корпусы, обеспеченные современным оборудованием, комфортабельный, со всеми удобствами пансионат с номерами «люкс», одно- и двухместными, принимающий одновременно до 60 человек.

Основные направления научно-исследовательской деятельности Филиала ОИВТ РАН:

– солнечное теплохладоснабжение;
– солнечные фотопреобразователи;
– системы аккумулирования тепловой энергии;
– переработка сельхозпродукции и другого растительного сырья с использованием нетрадиционных источников энергии;
– биогазовые установки;

– малые и микро ГЭС:
– сертифицирование нетрадиционных гелиоустановок и их элементов.

Филиал ОИВТ РАН был создан недалеко от г. Махачкалы на берегу Каспийского моря в 1983 г., с целью ускорения исследований и разработок в области использования нетрадиционных экологически чистых возобновляемых источников энергии (НВИЭ) и их практического применения в топливно-энергетическом комплексе и других отраслях народного хозяйства России и республики Дагестан.

Комплекс Филиала ИВТ РАН включает в себя: 5 двухэтажных жилых дома с активными и пассивными системами солнечного и геотермального теплоснабжения (в 3-х из которых используются тепловые насосы для системы отопления); 3-х этажный отель с системой солнечного горячего водоснабжения; 2-х этажный административный корпус и ресторан с системами солнечного горячего водоснабжения; плавательный бассейн с системой подогрева воды от солнечных коллекторов и другие объекты и сооружения, использующие солнечную энергию для различных целей, а также различные вспомогательные здания и сооружения.В настоящее время в Филиале ИВТ РАН проводится большой комплекс научных исследований по использованию возобновляемых источников энергии: разрабатываются и исследуются активные и пассивные системы солнечного горячего водоснабжения и отопления в жилищном и гражданском строительстве; комбинированные системы энергоснабжения на основе солнечной и геотермальной энергии, в том числе с использованием тепловых насосов; разрабатываются перспективные сельскохозяйственные установки (гелиосушилки и гелиотеплицы) и исследуются новые системы тепловых аккумуляторов на веществах, претерпевающих фазовый переход, изучаются теплофизические свойства этих веществ; разрабатываются методы технико-экономической оценки и оптимизации систем, использующих солнечную и геотермальную энергии, необходимые для прогнозирования развития и использования НВИЭ.

Филиал ИВТ РАН имеет уникальную в России солнечную печь мощностью 20 кВт (состоящую из фацетного концентратора площадью 60 кв.м. и 10 плоских гелиостатов с общей площадью 90 кв.м. с индивидуальной системой слежения) с плотностью потока солнечного излучения в 3000 кВт/м^2 на площади 0,8 кв.м., на которой решаются вопросы высокотемпературного материаловедения, и имитатор солнечного излучения (ИСИ) с плотностью излучения до 2,7 кВт/м^2 для проведения исследований по оптическим и теплотехническим характеристикам различных конструкций солнечных коллекторов и гелиоустановок, фотопреобразователей и проведение исследований в области нанотехнологий. Основные направления инновационной деятельности Филиала и НОК в настоящее время является:

1. Разработка технологий практического использования в топливно-энергетическом комплексе региона НВИЭ (солнечной, геотермальной, ветровой, энергии биомассы, энергии малых водных потоков);
2. Решение экологических проблем региона;
3. Разработка методов технико-экономической оценки и оптимизации систем, использующих солнечную и геотермальную энергию;
4. Изучение возможности использования НВИЭ (солнечной, геотермальной) в области охраны и безопасности здоровья населения России;
5. Организация серийного производства солнечных коллекторов (жидкостных, воздушных) и водонагревательных установок, модульных солнечных

сушильных установок различной производительности (гелиотеплиц, гелиосушилок) нового поколения с пассивным и активным управлением спектральными и теплофизическими характеристиками.

В последние годы ведется работа по созданию реабилитационного медицинского центра, который позволит решить проблему охраны и безопасности здоровья, реабилитации и лечения населения России.

Лечение пациентов в Медицинском центре будет проводиться на базе разработанного специалистами ОИВТ РАН уникального метода лечебно-диагностической биофотометрии, использующей концентрированный поток солнечного излучения с выделением необходимой спектральной области.

Основными направлениями деятельности "Международного научно-исследовательского и образовательного центра по нанотехнологии, высокотемпературному использованию солнечной энергии и экологии" с учетом научно-исследовательских работ, выполняемых в настоящее время в Филиале ОИВТ РАН и НОК, предполагаются следующие:

Работы в области развития нанотехнологий в Международном Центре:

1. Разработка и создание методик управления геометрической формой и размерами графитовых наноструктур с помощью комбинированного воздействия пучков протонов, электронов, солнечного ультрафиолета и высоких температур с целью создания автоэлектронных катодов для СВЧ-приборов, рентегеновских трубок и т.д. (Проведение исследований с целью определения влияния шероховатости поверхности, предварительной обработки образцов пучками электронов, протонов (до 100 и более кэВ) и солнечного УФ излучения (5 Солнц), а также последующего термического воздействия (до 3400 К) на форму и размеры образующихся наноструктур).

В результате исследований планируется создание технологии получения различных углеродных наноструктур с последующим их использованием (например, в СВЧ и рентгеновских приборах).

2. Разработка и создание методик получения на основе наночастиц глубоко-матовых радиационностойких терморадиационных покрытий класса "истинные поглотители", предназначенных для изделий гелиоэнергетики и ракетно-космической техники. (В процессе исследований планируется выявить влияние добавок нанофаз (металлических и др.) на оптические характеристики (отражательные) характеристики материалов покрытий различного назначения).

В результате проведенных исследований планируется создание технологии получения слабоотражающих покрытий (например, для гелиоэнергетики и ракетно-космической техники).

3. Разработка и создание методик использования концентрированного потока солнечного излучения, в качестве источника нагрева, для получения нанофаз. Это обусловлено возможностью достаточно легко управлять плотностью потока мощности светового пучка, а также спектральным составом излучения.

4. Нанотехнологии и их воздействие на безопасность окружающей среды.

Работы в области решения экологических аспектов возобновляемых источников энергии и Каспийского моря в Международном Центре:

1. Разработка и создание методик по исследованию экологических факторов использования возобновляемых источников энергии и экологические последствия такого использования на окружающую среду: солнечная энергия, биоэнергетика, геотермальная энергетика, ветроэнергетика, гидроэнергетика, приливная энергетика, волновая энергетика, гидротермальная энергетика.
2. Анализ учета экосистемных изменений и оценки антропогенных последствий

перспективного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии как альтернативных традиционным источникам энергии.

3. Разработка концепции рационального природопользования при использовании нетрадиционных возобновляемых источников энергии.
4. Создание научно обоснованной концепции риска новых и существующих энергетических технологий.
5. Разработка эффективных методов охраны водных ресурсов Каспийского моря при работе энергоустановок, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Главной целью научной, научно-технической и инновационной политики работы Международного центра является обеспечение подготовки специалистов, научных и научно-педагогических кадров на уровне мировых квалификационных требований.

Особая роль Международного центра определяется его влиянием на социально-экономическое развитие южных регионов России, в большинстве которых вузы составляют основу научно-технического потенциала. Поэтому важным аспектом деятельности Международного центра является формирование научно-технических программ, которые должны быть ориентированны на решение проблем регионов:

- в области фундаментальных, поисковых, инновационных и прикладных исследований Международного центра приоритетной должна стать задача по реализации крупных совместных международных программ и проектов. Как в рамках сети "EVRONETRES", так и различных международных фондов (Американский фонд гражданских исследований и развитой программы «Фундаментальные исследования и высшее образование»), позволяющих российским вузам быть в числе лидеров в естественно-научных и фундаментальных дисциплинах, а также в прикладных областях наук;
- в области инновационной деятельности сотрудничество Международного центра должно быть ориентировано на совместную деятельность и получение коммерческого эффекта. Перспективным является также совместная с международным сообществом работа по коммерциализации научно-технических результатов на внешнем и внутреннем рынке.

В результате выполнения указанных мероприятий по реализации работ Международного центра будет:

- обеспечена научная основа подготовки специалистов, научных и научно-педагогических кадров на уровне мировых квалификационных требований в области ВИЭ, нанотехнологий и экологии;
- разработан механизм формирования, обновления и реализации приоритетов научной деятельности, приоритетных проблем развития системы образования и подготовки специалистов;
- закреплено сотрудничество Международного центра в области системы образования с отраслями и регионами, что будет способствовать созданию новых технологий, решению крупных научно-технических проблем, развитию рынка научно-технической продукции;
- обеспечено широкое участие ученых системы образования в международных научных и образовательных программах и активизирована внешнеэкономическая деятельность вузов.
- развита системы подготовки менеджеров международного уровня для инновационной деятельности и соблюдение мер по обеспечению патентной (и иной) охраны интеллектуальной собственности.

В настоящее время на базе Филиала ИВТ РАН создан "Научно-образовательный комплекс (НОК) по подготовке кадров и развитию фундаментальных исследований в области нетрадиционных возобновляемых источников энергии" с привлечением вузов Республики Дагестан и ряда академических институтов России, а также с участием "Ветрополигона" АО "Дагэнерго" РАО "ЕЭС России".

НОК был создан в рамках реализации Федеральной целевой программы России "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2005 гг." и получил поддержку Министерства высшего образования РФ и Российской академии наук.

Сегодня можно подвести некоторые итоги его работы:

– действует система обучения и подготовки кадров, включающая специализированный лицей, упомянутые выше вузы, отраслевые институты и институты РАН, производственные предприятия;

– созданный "Научно-образовательный комплекс по подготовке кадров и развитию фундаментальных исследований в области нетрадиционных возобновляемых источников энергии" позволяет обеспечить тесное взаимодействие проводимых в Филиале ОИВТ РАН научных исследований в области НВИЭ с образовательным процессом в ДГУ, ДГТУ и специализированном физико-техническом лицее. В НОК входят кафедры и лаборатории ДГУ, ДГТУ и исследовательские лаборатории Филиала ОИВТ РАН, оснащенные уникальным оборудованием;

– ведется подготовка учащихся в Махачкалинском физико-техническом лицее при ДНЦ РАН с усиленной подготовкой по физике, математике и чтением курсов лекций по нетрадиционным источникам энергии;

– проведены совместные научные исследования в области возобновляемых источников энергии с зарубежными специалистами;

– организована подготовка и обучение студентов и учащихся в области НВИЭ в ДГУ, ДГТУ и физико-техническом лицее, с проведением совместных научных исследований на базе экспериментальных установок Филиала ОИВТ РАН во время практики, открыта аспирантура по подготовке научных кадров в области НВИЭ, выполняются курсовые и дипломные проекты;

– ведется научно – исследовательская работа в соответствии с учебными программами ВУЗов; с организацией работы летней научной школы “Нетрадиционная энергетика”, в которой ежегодно принимают участие более 20 школьников старших классов ФТЛ и городских школ из различных районов Дагестана, а также студенты младших курсов ДГУ; проводятся научные семинары различного уровня, включая международные.

Необходимо сказать несколько слов о Махачкалинском физико-техническом лицее ДНЦ РАН (ФТЛ ДНЦ РАН). В лицей по Республиканскому конкурсу, принимаются в 8-11 классы более 60 человек. Лицей имеет современную компьютерную технику и выход в INTERNET. ФТЛ ДНЦ РАН оснащён, современным экспериментальным оборудованием, на котором учащиеся получают навыки проведения научных исследований на современном уровне. В лицее поставлены лабораторные практикумы: исследование оптических характеристик покрытий фацет концентратора солнечного излучения и зеркал гелиостатов; исследование теплотехнических характеристик преобразователей солнечной энергии в тепловую энергию; исследование теплофизических свойств веществ, претерпевающих фазовый переход.

Создание такого специализированного лицея по нетрадиционной энергетике - это первая ласточка в России.

Проект предусматривает обмен специалистами между "Международным научно-исследовательским и образовательным центром по нанотехнологии, высокотемпературному использованию солнечной энергии и экологии" и зарубежными образовательными и научными центрами, занимающимися подготовкой высококвалифицированных кадров в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики.

Проведение совместных научно-исследовательских и проектных работ со специалистами из зарубежных стран, как на территории Центра, так и в зарубежных научных центрах и исследовательских институтах и высших учебных заведениях позволят целенаправленно проводить исследования в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Результатом реализации проекта будет подготовка инженеров-исследователей и выпускников высших учебных заведений России, Республики Дагестан, Каспийского и Кавказского регионов, зарубежных стран, подготовка высококвалифицированных преподавательских кадров, а также переподготовка и повышение квалификации специалистов в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики и дальнейшее развитие новых форм обучения с использованием зарубежной практики. Одновременно предполагается создание постоянно действующих международных семинаров, школ молодых ученых по подготовке специалистов в области нетрадиционной и возобновляемой энергетики и расширение географии взаимного обмена учащимися и преподавательскими кадрами.

Литература:

1. *Амадзиев А.М., Алишаева О.М., Изабакаров А.И., Магомедова Н.А., Мейланов А.Ш., Пархаданов М.М.* Экономические аспекты оценки нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Вестник Дагестанского Научного Центра, № 7, 2000 г.
2. *Амадзиев А.М., Пархаданов М.М., Магомедова Н.А., Мейланов А.Ш.* Об экономической эффективности нетрадиционных источников энергии // Международный конгресс «Энергетика 3000» , Обнинск, 2000 г
3. *Магомедова Н.А.* Концепция развития возобновляемой энергетики РД как составляющая часть инновационной экономической политики // Вест. Москва. Региональная экономика: теория и практика 2010 г. №3. Ст. 32-35.
4. *Магомедова Н.А.* Проблемы перспективы сбалансированного развития южного региона // Вест. Махачкала. РППЭ 2010г. №1. Ст-21-24.
5. *Магомедова Н.А.* Стратегия привлечения возобновляемых энергоресурсов в развитие потенциала энергетики как составная часть инновационной политики региона // Вест. Махачкала. РППЭ, , 2011г. №1. Ст.87-91.

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ КИЗЛЯРСКОГО РАЙОНА ДАГЕСТАНА

Мамаев К.Ш.[1], Шабанова З.Э.[2], Каймаразов А.Г.[2]

[1]Дагестанский государственный технический университет;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 70.
[2]Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а.

Представлены результаты исследования состава и свойств низкопотенциальных вод (НПВ) артезианского бассейна Кизлярского района Республики Дагестан по данным экспедиционных работ 2009-2011 гг., проведенных при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт от 15.06.2009г. № 02.740.11.0059). Обсуждаются вопросы состояния НПВ и перспектив их освоения на различные народно-хозяйственные нужды, в том числе для создания технологических систем теплоснабжения реализуемой с использованием теплонасосных технологий и для обеспечения населения качественной питьевой водой.

Одной из наиболее острых социально-экономических проблем, связанных с реализацией народнохозяйственных задач в Северном Дагестане, является обеспечение населения качественной питьевой водой.

В виду недостаточно развитой инфраструктуры, удаленности населенных пунктов и поселений северных территорий республики от источников централизованного энерго- и водоснабжения, использование в качестве питьевых скважинных вод артезианского бассейна Северо-Дагестанской низменности (СДН) сегодня и на ближайшую перспективу является практически единственной возможностью водообеспечения большинства из них.

Наряду с задачами обеспечения потребностей населенных пунктов в воде указанный тип подземных вод СДН используются также для развития отгонного (пастбищного) животноводства и оазисного земледелия.

Кизлярский район, на территории которого нами в 2009-2011гг. проводились экспедиционные работы при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках исследовательского проекта «Разработка эффективных технологий комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья» (госконтракт от 15.06.2009г. № 02.740.11.0059), является одним из крупных районов Северного Дагестана. На его территории площадью 3048 км^2 в более чем 80 селах и поселениях проживает свыше 60 тысяч жителей.

Характеризуя состояние земельных угодий района, следует отметить, что на его территории, а также на территориях граничащих с ним Тарумовского, Ногайского и Бабаюртовского районов расположена большая часть аридных зон Республики Дагестан.

В частности, в указанных районах сильнозасоленные почвы и солончаки занимают от 35 до 55 % всех площадей, а незасоленные земельные площади отсутствуют вообще при общей тенденции к постоянному увеличению территорий с высокой степенью засоленности [1].

Явления прогрессирующего засоления усиливают, в том числе, и рыбохозяйственные пруды, постоянно поддерживающие высокий уровень грунтовых вод, что способствует повышению засоления почв.

Такое же негативное воздействие способны оказывать и бесконтрольно

изливающиеся скважинные воды артезианского горизонта.

Поэтому, в связи с перспективами дальнейшего освоения ресурсов подземных НПВ региона и необходимостью рационального и экологически безопасного их использования, весьма актуальной представляется задача по комплексной оценке и прогнозу экологической обстановки в местах добычи подземных вод при длительной эксплуатации скважин, а также необходимость разработки действенных мер по уменьшению нагрузки на окружающую среду.

В Кизлярском районе нами были обследованы скважины более 20 населенных пунктов в ходе полевых экспедиционных работ, проведенных в 2009-2011 гг.

Говоря о техническом состоянии скважин, можно отметить случаи их ненадлежащего обслуживания, приводящего в результате бесконтрольного излива вод к заболачиванию территорий (см. рис. 1,2). Отсутствие профилактических мероприятий на скважинах привело в ряде населенных пунктов к заиливанию коллекторов-сборников. Также имело место пескование эксплуатационных скважин (см. рис. 3).

Воды исследованных скважин по составу макрокомпонентов относятся к гидрокарбонатно-натриевому и сульфатно-натриевому типам (см. табл. 1 и 2) и в целом соответствуют требованиям, предъявляемым к водам хозяйственно-питьевого назначения.

В тоже время установленные в составе НПВ загрязнители, наиболее токсичными из которых являются соединения мышьяка [2], указывают на необходимость создания и внедрения технологии водоподготовки, в первую очередь, в отношении вод, перспективных для их использования в теплонасосных системах теплоснабжения.

Для большинства скважинных вод отмечены концентрации, заметно превышающие значение ПДК для мышьяка: 50 мкг/дм^3 [3].

Из обследованных нами населенных пунктов Кизлярского района наиболее загрязненными оказались питьевые воды в с. Кардоновское (скв. 4Т, 357 мкг/дм^3), в с. Брянск (скв. 1926г., 295мкг/дм^3), совхозе «Кизлярский», отделение 2 (222 мкг/дм^3).

Анализ почвенных вытяжек на участках самоизливающихся скважинных вод – стационарный пункт гидродинамического и экологического мониторинга в с. Кардоновка Кизлярского р-на РД (скв. № 4Т; см. рис. 4), указывает на достаточно высокую засоленность исследованных почв: величина плотного остатка солей достигает 0,5-2,0 % (см. табл. 3). Таким образом, по степени засоленности их следует отнести к солончакам, а по типу засоления – к содовому хлоридно-сульфатному химизму.

Проведенная почвенно-мелиоративная оценка исследованных поверхностных горизонтов для расчета показателя угнетения растений позволяет сделать однозначное заключение – настоящее состояние земельных участков, прилегающих к указанной скважине, исключает возможность их использования для возделывания плодово-ягодных и садовых культур – критерий угнетенности почв, равный 6, превышен значительно.

Результаты исследования на участках самоизлива уровней загрязнения грунта соединениями мышьяка до глубины 150 см позволяют квалифицировать экологическую ситуацию как чрезвычайно опасную или близкую к ней по всем четырем лимитирующим показателям, а именно, транслокационному, водному, воздушному и общесанитарному. Отмечено превышение содержания мышьяка в почвах над ПДКп и ОДКп для указанного загрязнителя.

Рис.1. Заболоченные участки в с. Серебряковка.

Рис.2. Затопление луговых угодий в окрестности скв.№900 (Цветковский пост).

Рис.3. Запескованная скважина с. Цветковка.

Рис.4. Скв. № 4Т с. Кардоновка.

Таблица 1. Состав скважинных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна (Кизлярский район) (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, 2009-2011 гг.).

№	Район отбора скважинных вод	Сухой ост, мг/л	Жестк. мг-экв/л общая	pH	Cl^-, мг /л	SO_4^{2-}, мг /л	HCO_3^- мг /л	Ca^{2+} мг /л	Mg^{2+} мг /л	$Na^+ + K^+$	F^- мг /л	As, мкг/л ПДК,мкг /л
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Кардоновка, скв. № 4Т	1639	1,10	8,66	390,06	0,53	985,2	6,31	9,73	599,4	1,60	> 3
2	Кардоновка Зав. розлива вод	1666	1,36	6,15	404,24	5,50	1018,7	6,31	12,46	617,3	0,60	> 3
4	с. Аверьяновка . Окраина	716	0,67	8,64	29,79	56,40	610,0	8,02	3,28	260,8	0,40	> 2
4	с. Брянск 1926	1324	1,48	8,02	244,7	не/обн	1024,8	13,62	9,72	510,8	0,9	> 3
5	с. Брянск 1957	1320	1,66	8,27	237,6	1,0	994,3 (42,0)	13,22	12,15	491,3	0,78	> 2
6	с. Брянск 1981	1026	0,94	8,30	152,5	1,0	994,3 (42,0)	5,21	8,26	452,6	1,01	1
7	Крайновка (пов.вод)	368	4,72	8,03	17,73	60,2	204,4	67,33	16,52	8,74	0,20	н/обн
9	Крайновка, скв -1Т	1441	1,0	8,20	209,0	0,6	988,2 (30,0)	10,42	5,83	485,3	0,30	< 1
5	с.Сар-Сар	1004,4	1,29	6,68	69,5	4,40	988,0	8,01	10,8	463,7		> 1
6	с.Старотеречное	1712,0	1,9	8,11	334,0	0,49	1305,0	13,2	15,1	809,5		< 1
7	с.Александр-кая	1043,6	1,42	7,31	82,8	13,1	1024,0	7,01	13,0	517,4		> 3
8	с.Н.Серебряковка	825,6	1,44	7,99	66,6	25,2	878,0	6,61	13,5	430,0		> 1
9	с.Черняевка	962,8	1,27	7,55	53,0	19,6	915,0	7,01	11,2	437,6		< 1
10	с/х М.Гаджиева	1370,0	1,45	8,11	172,0	0,12	1281,0	4,80	14,7	683,2		> 4

Таблица 2. Состав скважинных вод Цветковской сельской администрации Кизлярского района РД.

№	Район отбора скважинных вод	Сухой ост., мг/л	Жестк. мг-экв/л общая	pH	Cl^-, мг /л	SO_4^{2-}, мг /л	HCO_3^- (CO_3^{2-}) мг /л	Ca^{2+} мг /л	Mg^{2+} мг /л	$Na^+ + K^+$ мг /л	F^- мг /л	As, мкг/л ПДК,мкг/л
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	с.Хуцеевка КНБ	1124,4	1,47	7,94	68,61	0,51	1170	12,02	10,58	486,3	1,01	> 1
2	с.Хуцеевка ЖНБ (зап. часть села)	850,4	0,87	8,02	56,64	0,40	933,3	8,61	5,35	393,6	1,14	> 6
3	Цветковка центр с.	869,0	1,02	8,02	52,65	3,00	970,0	7,52	7,84	403,4	1,36	> 2
4	Цветковка сев. сел.	765,6	0,64	8,16	52,65	49,8	646,6	3,11	5,90	306,7	1,17	> 2
5	Цветковка Ю-В сел.	799,0	0,67	8,30	51,06	42,9	677,1	4,91	5,11	290,1	1,2	> 1
6	Ст.Серебряковка,	761,0	0,89	8,15	38,29	54,2	725,0	7,015	6,57	340,0	1,07	> 2
7	Ст.Серебряковка, С-З	754	0,77	8,15	38,29	56,9	671,0	2,2	8,03	307,5	1,02	> 1
8	Цветковский пост, скв № 900	853	1,125	7,54	36,70	6,80	1000	4,01	11,25	404,0	0,60	> 3
9	Цветковский пост, скв № 1 АЮТ	773	0,76	8,18	31,91	55,1	683,2	4,4	6,57	307,5	1,15	> 1

Таблица 3. Состав водных вытяжек из образцов почв в зоне неконтролируемого излива скважинных вод (скв №4Т) с. Кардоновка. ((мг-экв / 100г почвы) / (массовая доля, %)) (по данных экспедиционных работ, октябрь 2009 г.).

Глубина отбора пробы, см	Плотный остаток (%)	Удельная электрическая проводимость, мСм/см	pH	Щелочность		Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+ (расч)	As, мг/кг
				CO_3^{2-}	HCO_3^-						
25	1,133	2,636	7,70	не/обн	0,86 0,0525	1,175 0,0417	11,519 0,5529	6,7 0,137	5,1 0,0622	(1,76) (0,041)	14,95
50	1,263	2,881	7,58	не/обн	1,26 0,0769	1,21 0,0430	10,61 0,509	8,02 0,164	3,54 0,043	(1,56) (0,036)	14,85
100	0,250	0,613	8,05	не/обн	1,28 0,0781	0,95 0,0337	0,813 0,0395	0,7 0,0143	2,0 0,024	(0,35) (0,008)	15,59
150	0,273	0,797	7,93	не/обн	1,06 0,0647	1,31 0,0465	1,984 0,0959	0,90 0,0184	2,20 0,0268	(1,25) (0,029)	15,07

Большинство исследованных НВП имеют на устье температуру от 21 до 27 ^{0}C, что вполне достаточно для их использования в качестве рабочего тела в теплонасосных системах теплоснабжения индивидуальных объектов жилого фонда, а также для создания объектов прудового хозяйства населенных пунктов, рыбохозяйственных комплексов, птицефабрик.

Наиболее привлекательными в этих целях представляются геотермальные воды с. Кардоновка (скв. № 4Т), используемые сегодня населением в бальнеологических целях. Поскольку температура этих вод составляет 45-47 ^{o}C, а дебит скважины при полном открытии устьевой задвижки достигает 1100 м^3/сут., их можно использовать на основе теплонасосных технологий для теплоснабжения и водоснабжения масштабного потребителя, а именно, жилых и административных зданий села, в том числе вновь построенной школы на 600 мест.

Относительно невысокая минерализация – 1700 мг/дм^3 – позволяет говорить о перспективах их хозяйственно-питьевого водопользования.

Вместе с тем высокое содержание токсичных и загрязняющих компонентов (мг/дм^3): фенолов – 0,091, и соединений мышьяка – 0,311, – а также значительный фактор цветности вод (240 – 320 градусов) создают проблемы для

прямого использования кардоновских вод в указанных целях.

Проблема цветности, обусловленная высоким содержанием гумусовых кислот, которая делает невозможным использование в питьевых целях НПВ ряда скважин Цветковской и Кардоновской сельских администраций, нами успешно решена в ходе создания технологий очистки вод с использованием трековых мембран.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 02.740.11.0059 от 15.06.2009 г.).

Литература:

1. *Мирзоев Э.М.-Р., Алишаев М.Г.* Теоретические основы рассоления почв дождеванием и освоение трудномелиорируемых земель Дагестана / Махачкала, 1990 – 168 с.
2. *Каймаразов А.Г., Шабанова З.Э., Камалутдинова И.А., Ахмедов К.М.* Идентификация и количественное определение мышьяксодержащих загрязняющих компонентов низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна // Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010. ИП Овчинников, типография АЛЕФ. С.295-307.
3. *Лурье Ю.Ю.* Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. – 448 с.

ЭЛЕКТРОСОРБЦИЯ ИОНОВ ЦЕЗИЯ ПРИ АНОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ

Кунжуева К.Г.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: mikamila@list.ru

Наряду с решением проблемы энергетики при использовании тепла земных недр, термальные воды, обладая практически неисчерпаемыми запасами, представляют интерес как источник ряда ценных компонентов, в частности цезия. В природных водах, по подсчетам Солодова [1] сосредоточено 35% мировых запасов цезия. Сегодня в разных странах из природных вод и рассолов в промышленных масштабах получают йод, бром, бор, литий и уран. Как сырье для химической и редкометальной отраслей промышленности природные воды, привлекают все большее внимание в связи с тем, что они имеют относительно низкую стоимость извлечения ценных химических соединений по сравнению с твердыми полезными ископаемыми.

Получение из любых источников соединений цезия является трудной задачей. Сложность технологии определяется, составом перерабатываемого сырья. Как правило, сырье комплексное, но бедное.

Одним из наиболее эффективных способов извлечения цезия является сорбционный метод. В качестве сорбентов наибольшее применение нашли активированные угли, сорбционные свойства которых обусловлены их высокоразвитой поверхностью, микропористой структурой, высокой степенью поверхностной активности. Высокая электропроводность АУ позволяет использовать в качестве дополнительного фактора, увеличивающего их сорбционную емкость, электрический потенциал. И, хотя исследования в этой области ведутся в ряде мировых научных школ, практически не изученными являются закономерности адсорбции ионов щелочных металлов (исключение составляют только ионы лития) на углеродных материалах (УМ), протекающей при наложении потенциала.

Как показали исследования, катионы цезия, так же как и катионы щелочноземельных металлов, адсорбируются как в процессе катодной [2], так и в процессе анодной поляризации сорбента.

Целью данной работы является исследование адсорбции ионов цезия при анодной поляризации углей КМ-2, ОКМ-2 (получен окислением угля КМ-2 азотной кислотой), ФКМ-2 (получен обработкой угля КМ-2 фосфорной кислотой) и сульфоугля.

Поляризацию сорбента проводили в электрохимической ячейке с разделенными анодным и катодным пространствами в растворах солей цезия, приготовленных на фоне боратного буфера с pH≥11. Токоподводом служил графитовый стержень, в качестве анода использовали графит. Адсорбцию ионов Cs^+ оценивали по убыли их в растворе. Анализ содержания этих ионов до и после адсорбции проводили методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии.

Обработка угля КМ-2 азотной и фосфорной кислотами осуществлялась по методикам, приведенным в [3-5].

Определение сорбционной емкости активированных углей проводилось в динамических условиях, скорость подачи растворов составляла 40-45 $см^3$/ч при массе сорбента 2г.

В таблицах 1 и 2 приведены характеристики исследуемых углей.

Из табл. 1 видно, что обработка угля КМ-2 азотной кислотой приводит к некоторому уменьшению удельной поверхности, суммарного объема пор и объема микропор, аналогичная картина наблюдалась и в работе [6], и что сульфоуголь является непористым сорбентом.

Таблица 1. Текстура исследуемых активированных углей.

АУ	S, $м^2/г$	Σ V, $см^3/г$	$V_{ми}$, $см^3/г$	$V_{ме+ма}$, $см^3/г$
Сульфоуголь	4,5	-	-	-
КМ-2	1260	0,836	0,346	0,490
ОКМ-2	1040	0,795	0,231	0,564
ФКМ-2	1296	0,900	0,320	0,580

По-видимому, данное явление может быть связано с тем, что окисление АУ азотной кислотой ведет к увеличению на его поверхности количества кислородсодержащих групп кислотного характера, которые могут прочно фиксироваться на входе и на стенках пор, тем самым, ограничивая объем пор, доступных для адсорбции N2, в результате чего удельный объем микропор угля ОКМ-2 уменьшается на ~ 30% по сравнению с углем КМ-2. В табл.2 приведен элементный состав поверхности исследуемых углей.

Таблица 2. Элементный состав (масс.%) поверхностей сульфоугля, углей КМ-2 и ОКМ-2.

Уголь	C	O	F	Al	Ca	S	Si
Сульфоуголь	60,21	31,03	-	0,64	0,36	6,41	1,35
КМ-2	87,29	5,87	6,29	-	-	0,55	-
ОКМ-2	80,36	19,35	-	-	-	0,59	-
ФКМ-2	93,77	5,58	0,27	-	-	-	-

Так как активированные угли характеризуются широким спектром электронных состояний атома углерода, разорванные связи на поверхности угля могут связывать такие элементы, как: кислород, водород, серу, галогены, азот и др. [7]. Наличие на поверхности активированных углей таких элементов, как: Al, Ca, Si, может служить указанием на то, что в процессе предобработки углей применялась каталитическая активация с использованием данных неорганических добавок [7].

Достаточно высокий уровень содержания кислорода в образцах сульфоугля и угля ОКМ-2 свидетельствует о наличии большого количества кислородсодержащих поверхностных групп.

Зависимости величин адсорбции Cs^+ от плотности тока на аноднополяризованных углях представлены на рис.1, из которого видно, что адсорбционные кривые имеют сложный характер с максимумами и минимумами [8].

На рис.2 представлена зависимость величин адсорбции (при оптимальных значениях i для каждого угля) ионов Cs^+ на исследуемых углях от времени в статических условиях.

Анализ данных рис.2 с позиций уравнения Лагергрена, показал, что на зависимости $\lg (\Gamma_\infty - \Gamma) - t$ для всех углей наблюдается несколько линейных участков с разными наклонами (для угля КМ-2 таких участков -2, а для остальных углей - 3).

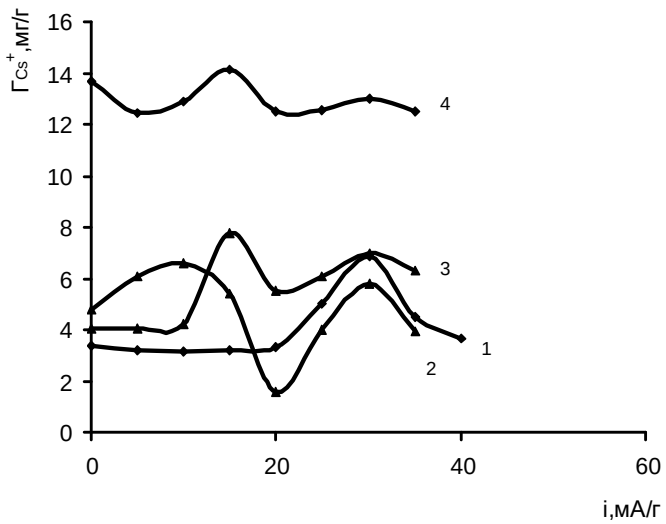


Рис.1. Зависимость адсорбции Cs^+ от плотности тока на углях: КМ-2(1); ОКМ-2(2); ФКМ-2(3); сульфоугле (4).

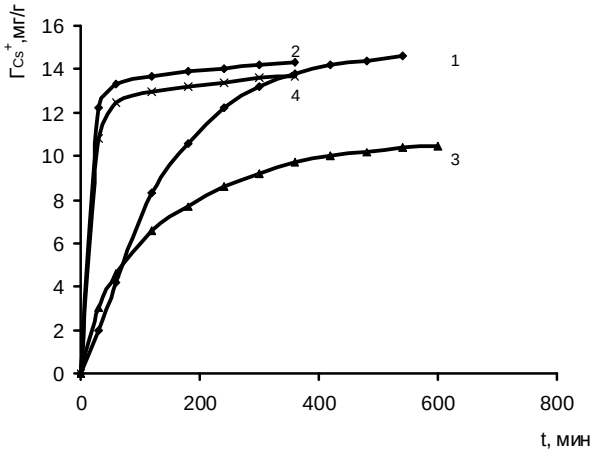


Рис.2. Зависимость величин электросорбции ионов Cs^+ от времени на углях КМ-2 (1); ОКМ-2 (2); ФКМ-2 (3) и на сульфоугле (4).

Константы скорости адсорбции, рассчитанные на разных участках, приведены в табл.3.

Таблица 3. Константы скорости адсорбции ионов Cs^+.

Уголь	K_{ad}, мин$^{-1}$		
	1 участок	2 участок	3 участок
КМ-2	$0{,}80\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-2}$	-
ОКМ-2	$2{,}40\cdot10^{-2}$	$0{,}60\cdot10^{-2}$	$1{,}22\cdot10^{-2}$
ФКМ-2	$0{,}77\cdot10^{-2}$	$0{,}55\cdot10^{-2}$	$0{,}79\cdot10^{-2}$
Сульфоуголь	$2{,}70\cdot10^{-2}$	$0{,}55\cdot10^{-2}$	$0{,}79\cdot10^{-2}$

На рис.3 и 4 представлены зависимости адсорбции ионов Cs^+ от их концентрации в растворе. Из рис.3 видно, что на угле КМ-2 в изученном интервале концентраций ($5\cdot10^{-4}$-$2\cdot10^{-2}$ М/дм^3) адсорбция Cs^+ подчиняется логарифмической изотерме Темкина.

Фактор неоднородности, рассчитанный из экспериментальных данных с помощью уравнения $\theta = A + \frac{1}{f}\ln c$, составил 33, что может свидетельствовать, по

аналогии с платиной [9], о том, что в данном случае, на сорбцию оказывает влияние, как собственная неоднородность поверхности, так и силы отталкивания адсорбированных частиц, причем роль неоднородности поверхности выше.

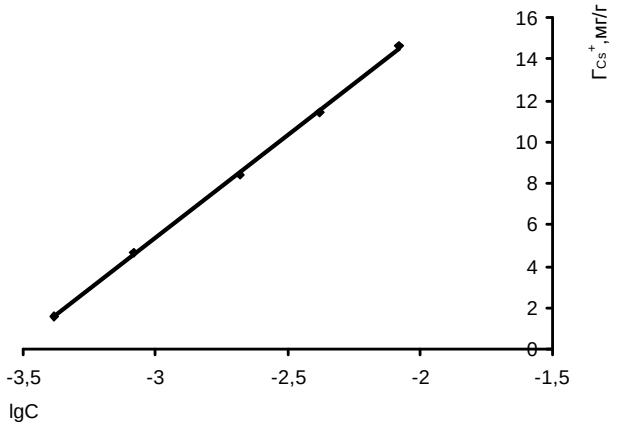


Рис.3. Зависимость электросорбции ионов Cs^+ от концентрации на угле КМ-2.

На рис.4 представлены зависимости адсорбции ионов Cs^+ от концентраций этих ионов в растворе на углях ОКМ-2, ФКМ-2 и сульфоугле.

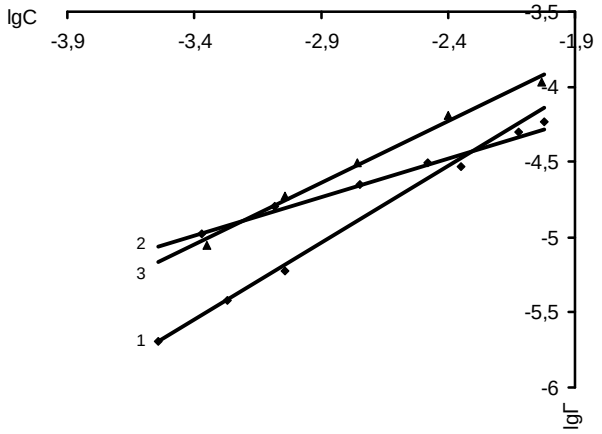


Рис.4. Зависимость электросорбции ионов Cs^+ от концентрации на углях ОКМ-2 (1); ФКМ-2 (2) и на сульфоугле (3).

Адсорбция ионов Cs^+ на данных углях подчиняется изотерме Фрейндлиха. Из прямой в координатах $lgГ$-lgC_p (рис.4) определены константы К и n в уравнении Фрейндлиха, которые приведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры уравнения Фрейндлиха.

Уголь	LgK	n
ОКМ-2	-2,20	1,00
ФКМ-2	-3,16	1,76
Сульфоуголь	-2,37	1,33

Зависимости адсорбции ионов Cs^+ от температуры приведены на рисунке 5. Из рисунка видно, что только в случае угля КМ-2 адсорбция ионов цезия растет, в остальных же случаях в исследуемом интервале температур наблюдается два типа сорбции, с преобладанием химической адсорбции. Из этих зависимостей по уравнениям $\Gamma = KC_p^{1/n}$ и $\ln K_d = \Delta S^0/R - \Delta H^0/RT$, рассчитаны термодинамические параметры сорбции ионов Cs^+, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5. Термодинамические параметры сорбции ионов Cs^+ на различных углях.

Уголь	ΔH^0, кДж·моль$^{-1}$	ΔS^0, кДж·К$^{-1}$·моль$^{-1}$	ΔG^0, кДж·моль$^{-1}$			
			298К	303К	315К	323К
КМ-2	12,1883	0,1247	-24,9723	-25,5958	-27,0922	-28,0898
ОКМ-2	33,2400	0,1853	-21,9794	-22,9000	-25,1295	-
ФКМ-2	37,8105	0,1773	-	-	-18,0390	-19,4574
Сульфоуголь	18,2822	0,1454	-	-	-27,5188	-28,6820

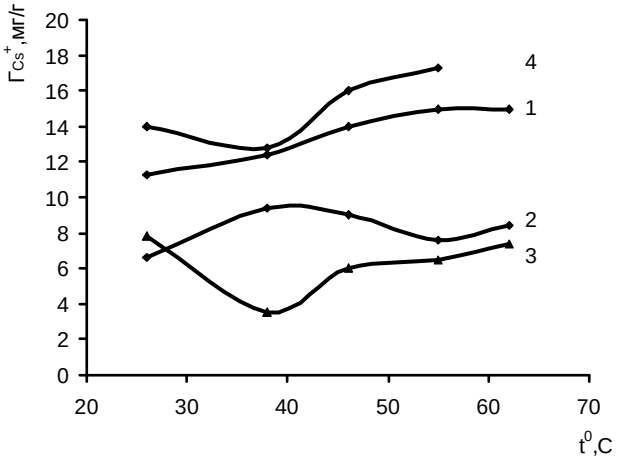


Рис. 5. Зависимость электросорбции ионов Cs^+ от температуры на углях: КМ-2 (1); ОКМ-2 (2); ФКМ-2(3); сульфоугле(4).

Значения сорбционных емкостей исследуемых углей , определенных в динамических условиях, приведены в таблице 6.

Таблица 6. Сорбционные емкости аноднополяризованных углей по ионам Cs^+.

Уголь	Сорбционная емкость АУ по ионам Cs^+ мг-экв/г	
	Адсорбция без поляризации	Адсорбция при анодной поляризации
КМ-2	0,220	1,320
ОКМ-2	0,275	1,600
ФКМ-2	0,074	1,300
Сульфоуголь	0,190	1,890

Как видно из таблицы 6, сорбционная емкость аноднополяризованных углей по ионам цезия возрастает по сравнению с неполяризованными сорбентами. Связь адсорбированных ионов Cs^+ с поверхностью углей прочная, десорбция практически отсутствует.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством образования и науки Российской Федерации (госконтракт № 14.740.11.0803) и Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 09-03-96506-р_юг_а).

Литература:

1. *Солодов Н.А.* Проблемы геологии редких элементов. –М.: Наука, 1978.304 с.
2. *Кунжуева К.Г.* Электросорбция ионов цезия при катодной поляризации активированных углей // Мат. Ш Школы молодых ученых им. Э.Э.Шпильрайна “Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов”. Махачкала 2010. С.184-189.

3. *Seron A., Benaddi H., Beguin F., Frackowiak E., Bretelle J.L., Thiry M.C. and other.* Sorption and desorption of lithium ions from activated carbons// Carbon. 1996. V. 34. N 4. P. 481-487.
4. *Frackowiak E.* Electrochemical polarization of activated carbons for the reversible sorption of lithium ions//Fuel 1998. V. 77. N 6. P. 571-575.
5. *Alfarra A., Frackowiak E., Beguin F.* Mechanism of lithium electrosorption by activated carbons// Electrochim. Acta. 2002. V. 47. P.1545-1553.
6. *Leyva Ramos R., Bernal Jacome L.A., Mendoza Barron J.,Fuentes Rubio L., Guerrero Coronado R.M.* Adsorption of zinc (II) from an aqueous solution onto activated carbon // J. Hazardous Materials. 2002. V. B 90. P. 27-38.
7. *Rivera-Utrila J., Ferro-Garcia M.A.* Study of cobalt adsorption from aqueous solution on activated carbons from almond shells // Carbon. 1997.V.25. N 5. P.645-652.
8. *Кунжуева К.Г., Свешникова Д.А., Гафуров М.М., Рамазанов А.Ш.* Исследование электросорбции ионов рубидия и цезия на активированном угле // Мат. IV Всероссийской конференции “Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах ФАГРАН-2008 ”. Воронеж 2008.
9. *Казаринов В.Е., Андреев В.Н.* Исследование неоднородности поверхности методом радиоактивных индикаторов// Электрохимия. 1975. Т.10. № 2. С.196-204.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

СТАЦИОНАРНАЯ КОНВЕКЦИЯ ОКОЛОКРИТИЧЕСКОГО ГАЗА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСА В ПОРИСТОМ ТОНКОМ КОЛЬЦЕВОМ ЦИЛИНДРЕ В ТЕПЛОПРОВОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Махмудова М.М., Рамазанов М.М.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН;
Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: Mukamay-ipg@mail.ru

Большинство исследований по естественной конвекции жидкостей и газов основано на приближении Буссинеска, которое предполагает лишь слабую их сжимаемость [1]. Однако для околокритических жидкостей оно неприемлемо. Околокритические жидкости, т.е. жидкости с параметрами из окрестности термодинамической критической точки фазового перехода «жидкость-пар», отличаются сильной сжимаемостью и другими аномальными свойствами, что привлекает к ним повышенное внимание исследователей. Эти аномальные свойства приводят к интересным результатам при изучении гидродинамики и теплопереноса в рассматриваемых средах. Одно из явлений характерных для тепломассопереноса в таких жидкостях в нестационарных условиях называют поршневым эффектом или адиабатическим нагревом [2-5].

В [4] обнаружено определенное подобие тепловых и динамических полей при стационарной конвекции околокритической жидкости Ван-дер-Ваальса и совершенного газа с модельными параметрами, найденными с помощью калибровочных формул. Исследований, относящихся к течению рассматриваемых жидкостей в пористых средах, очень мало. Можно отметить работу [5], в которой получены результаты качественно схожие с чистой жидкостью [4]. Большую роль при изучении свойств тепломассопереноса в околокритических жидкостях сыграло развитие прямых методов численного решения как двухмерных, так и трехмерных задач Навье – Стокса для сжимаемых сред [6].

Из [7,8] следует, что конвекция в совершенном газе отсутствует, если адиабатический температурный градиент превосходит заданный. Критерий возникновения конвекции в сжимаемом совершенном газе, опираясь на линеаризованную систему уравнений Навье – Стокса, предложен Джеффри [9]. Но при этом спектральная задача не решалась, которая собственно и определяет критическое число Рэлея. Такая спектральная задача в прямоугольной области как для совершенного газа, так и для газа Ван-дер-Ваальса решена в [10]. Однако задача решалась в приближении линейного равновесия. Вопрос о свойствах критических чисел Рэлея и Рэлея - Дарси вне пределов указанного приближения требует дополнительных исследований.

Исследование этого вопроса в рамках рассматриваемой простейшей модели - одна из целей данной работы. Критическое число Рэлея часто находится из численного решения нелинейной задачи путем экстраполяции [10-12]. Для

лучшего понимания тонкостей, связанных с возникновением конвекции в сжимаемом вязком теплопроводном газе и особенно вблизи критической точки, важно по возможности иметь аналитические решения. В этой связи, полученные ниже решения, могут быть полезны.

1. Постановка задачи. Насыщенная газом Ван-дер-Ваальса пористая среда заполняет тонкий зазор между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой длины, расположенными в теплопроводном пространстве. Газ находится в состоянии, близком к термодинамической критической точке. Рассматривается двумерная задача в плоскости, ортогональной оси цилиндров (фиг.1). Средний радиус цилиндров обозначим r_0, а толщину зазора hr_0 ($h<<1$). На бесконечности задан вертикальный, направленный вдоль силы тяжести, постоянный градиент температуры. Предполагаем, что полная масса газа M в пористом кольце (контуре) задана. Требуется определить зависимость критического числа Рэлея- Дарси, определяющего порог возникновения усредненного по сечению кольца движения, и характеристик стационарной конвекции над этим порогом от сжимаемости газа, заданного вдали от контура градиента температуры и параметра близости к критической точке.

Среднюю плотность газа в контуре, определяемую заданной массой газа M, полагаем равной критической плотности. Коэффициенты переноса и проницаемость считаем функциями лишь параметра τ – относительного отклонения средней температуры от критической, изохорную теплоемкость газа - постоянной и независящей от τ. Все указанные параметры и другие термодинамические коэффициенты вдали от критической точки совпадают с соответствующими значениями для совершенного газа. Такой подход, предложенный в [4, 5], удобен для сравнения с совершенным газом и выявления эффектов связанных с сильной сжимаемостью и другими аномальными свойствами в окрестности критической точки.

Для приближенного решения поставленной задачи, достаточно рассмотреть систему уравнений, усредненную по сечению кольца, т.е. гидравлическое приближение. Можно показать, что гидравлическое приближение в данной задаче справедливо с точностью до величин порядка $h<<1$. Таким образом, как и в [13] полагаем, что все величины внутри контура зависят от одной пространственной координаты: угла φ.

Обозначая коэффициенты, относящиеся к совершенному газу, дополнительным индексом «i» , введем следующие характерные масштабы: r_0 - длины, $\mu_i/(\rho_c r_0)$ - скорости, T_c -температуры (T_c -критическая температура), $\rho_c r_0^{\,2}/\mu_i$ - времени, ρ_c – плотности (ρ_c - критическая плотность газа), $P_0 = R\rho_c T_c$ - давления.

В результате систему уравнений, описывающую конвекцию в рассматриваемых условиях и включающую уравнения Дарси, неразрывности, баланса энергии и уравнение состояния, запишем в безразмерном виде

$$\frac{\varepsilon_i \delta\gamma_i \,\mathrm{Pr}_i\, Q}{f_0(\tau) Rah\rho} + p' + \varepsilon_i \gamma_i \rho \cos\varphi = 0, \quad Q = \rho w = const$$

$$\frac{C_p}{C_{pi}} QT' = \frac{1}{\mathrm{Pr}_i}\left(\left[\frac{\partial T_n}{\partial r}\right] + \frac{\lambda_m h}{\lambda_n}\left(\left\langle\frac{\partial T_n}{\partial r}\right\rangle + T''\right)\right) - \varepsilon_i(\gamma_i - 1)\beta_T T_c T Q\cos\varphi \qquad (1.1)$$

$$p = \frac{3\rho T}{3-\rho} - \frac{9\rho^2}{8}, \quad \Delta T_n = 0$$

$$Ra = \frac{k_i \rho_c^2 C_{pi} g \beta_{Ti} Gr_0{}^2}{\mu_i \lambda_n}, \ \mathrm{Pr}_i = \frac{\mu_i C_{pi}}{\lambda_n}, \ b = \frac{C_m}{\rho_c C_{pi}}, \ b_1 = \frac{C_n}{\rho_c C_{pi}}$$

$$\varepsilon_i = \frac{g r_0}{\gamma_i R T_c}, \ \delta = \frac{Gr_0}{T_c}, \ \beta_{Ti} = \frac{1}{T_c}$$

Здесь Q - массовый расход газа; ρ - плотность газа; p - давление в газе; T - температура среды в контуре; T_n - температура среды вне контура; C_p - удельная изобарическая теплоемкость газа; β_T - коэффициент теплового расширения; R - удельная газовая постоянная; $[f] = f^+ - f^-$ – скачок функции f на контуре; $\langle f \rangle = (f^+ + f^-)/2$; штрих означает производную по угловой координате φ; Ra, Pr_i - числа Релея- Дарси и Прандтля, определенные по параметрам вдали от критической точки; G - величина заданного градиента температуры; γ_i - показатель адиабаты для совершенного газа; ε_i - критерий гидростатической сжимаемости для совершенного газа; δ - характерный перепад температуры в безразмерном виде; T^0 - температура в начале координат при нулевом массовом расходе газа; τ - параметр близости к критической точке. Верхним индексом «0» обозначены значения, взятые при критической плотности и температуре T^0.

В качестве граничных условий потребуем непрерывность температуры на границах кольца, периодичность величин T, p внутри кольца по φ, сохранение полной массы газа в кольце, ограниченность температуры в начале координат и равенство ее градиента заданной величине на бесконечности.

Граничные условия: $[T_n]_{r=1\pm 0} = T$; $\lim\limits_{r\to\infty}(T_n - 1 - \tau + \delta r \sin\varphi) = 0$

$$(T, p)(\varphi + 2\pi) = (T, p)(\varphi),$$

$$\int_0^{2\pi} \rho d\varphi = 2\pi \qquad (1.2)$$

2. Устойчивость гидравлического равновесия. Если $\lambda_m \neq \lambda_n$, механическое равновесие невозможно и в кольце будет иметь место некоторое исходное стационарное движение, обусловленное кривизной кольца. При этом, как следует из уравнения неразрывности и симметрии задачи, массовый расход газа через сечение кольца $Q = 0$. Если Ra превысит критическое значение Ra_c, указанное движение потеряет устойчивость и в кольце установится циркуляция газа с $Q \neq 0$. Требуется приближенно вычислить это критическое Ra_c, учитывая, что толщина кольца мала.

В связи со сказанным, назовем решение системы (1.1), (1.2) при $Q = 0$ не механическим равновесием, а гидравлическим равновесием. Под словом же

конвекция будем понимать усредненное по сечению кольца движение, т.е. решение указанной системы уравнений при $Q \neq 0$.

Как было отмечено выше, гидравлическое приближение справедливо с точностью порядка h. Это значит, что точное решение после усреднения по сечению кольца отличается от решения в гидравлическом приближении лишь на величину порядка h. Это относится, в частности, и к указанному выше исходному движению по отношению к гидравлическому равновесию. В этом и заключается смысл гидравлического равновесия. Поскольку критическое число Ra_c есть характеристика интегральная, то можно показать, что в данной задаче с точностью порядка h оно будет определяться гидравлическим равновесием. Этим определяется физический смысл найденного ниже числа Ra_c.

В [13] в случае совершенного газа и постоянных теплофизических коэффициентов было показано, что в данной задаче неустойчивость гидравлического равновесия возможна только относительно монотонных возмущений. Здесь ограничимся рассмотрением монотонных возмущений и найдем критерий возникновения конвекции из условия существования стационарного решения. Из (1.1), (1.2) для распределений p_0, T_0, ρ_0 при гидравлическом равновесии получим систему уравнений

$$p_0' + \varepsilon_i \gamma_i \rho_0 \cos\varphi = 0, \qquad p_0 = \frac{3\rho_0 T_0}{3-\rho_0} - \frac{9\rho_0^{\,2}}{8} \tag{2.1}$$

$$\Delta T_{n0} = 0 \tag{2.2}$$

Представим решение системы (1.1), (1.2) в виде

$$T_n = T_{n0} + Q_0 \,\mathrm{Pr}_i\, T_{n1}$$
$$p = p_0 + Q_0 p_1, \qquad T = T_0 + Q_0 \,\mathrm{Pr}_i\, T_1, \qquad \rho = \rho_0 + Q_0 \rho_1 \tag{2.3}$$
$$Q = Q_0, \qquad Q_0 = const << 1$$

Подставляя (2.3) в систему (1.1), (1.2) в линейном приближении относительно Q_0 (после сокращения на Q_0), получим систему

$$p_1' + \varepsilon_i \gamma_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T \cos\varphi p_1 + \frac{\varepsilon_i \delta \gamma_i \,\mathrm{Pr}_i}{f_0(\tau) Rah \rho_0} + \varepsilon_i \gamma_i \,\mathrm{Pr}_i \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p \cos\varphi T_1 = 0$$

$$T_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi\right)$$

$$T_{n1} = \sum_{n=1}^{\infty} r^N \left(a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi\right), \;\; r \le 1,\; N = n;\;\; r \ge 1,\; N = -n \tag{2.4}$$

$$a_n = \frac{\delta}{2\pi n(1 + 0.5\lambda(\tau) nh)} \int_0^{2\pi} \frac{C_p}{C_{pi}} (1-K) \cos\varphi \cos n\varphi d\varphi; \;\; K = \frac{\varepsilon_i (\gamma_i - 1) \beta_T T_c T_0 C_{pi}}{\delta C_p}$$

$$b_n = \frac{\delta}{2\pi n(1 + 0.5\lambda(\tau) nh)} \int_0^{2\pi} \frac{C_p}{C_{pi}} (1-K) \cos\varphi \sin n\varphi d\varphi; \;\; \lambda(\tau) = \frac{\lambda_m(\tau)}{\lambda_n}$$

Из условия периодичности p_1 для критического числа Ra_c получим выражение

$$f_0(\tau)Ra_c h=\frac{I_1}{I_2},\qquad I_1=\int_0^{2\pi}\frac{1}{\rho_0}\left(\exp(\varepsilon_i\gamma_i\int_0^{\varphi}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T\cos\varphi d\varphi\right)d\varphi$$

$$I_2=-\frac{1}{\delta}\int_0^{2\pi}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p T_1\cos\varphi\left(\exp(\varepsilon_i\gamma_i\int_0^{\varphi}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T\cos\varphi d\varphi\right)d\varphi \qquad (2.5)$$

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T=\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_T(\rho_0(\varphi),T_0(\varphi)),\quad \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p=\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p(\rho_0(\varphi),T_0(\varphi))$$

$$f_0(\tau)=\frac{k(\tau)\mu_i}{k_i\mu(\tau)}$$

Здесь $T_0=T_0(\varphi)$, $\rho_0=\rho_0(\varphi)$ распределения температуры и плотности при гидравлическом равновесии, определяемые уравнениями (2.1)-(2.2).

Таким образом, если известны зависимости коэффициентов переноса и проницаемости от параметра τ, формулы (2.5) с соответствующим уравнением состояния дают аналитическое решение задачи определения критического числа Рэлея для газа Ван-дер-Ваальса в рассматриваемом приближении.

3. Стационарная конвекция над порогом устойчивости. Рассмотрим задачу (1.1), (1.2) при условиях, когда физические свойства газа мало меняются в пространстве. При этом для упрощения, полученных выражений в уравнении энергии отбросим член с множителем $h<<1$, однако при необходимости он может быть учтен без принципиальных трудностей.

Будем искать решение уравнений (1.1), (1.2) в виде рядов по малому параметру α, полагая предварительно $\delta=\alpha\tau$, $\varepsilon_i\gamma_i=\beta\alpha\tau$ и фиксируя τ и β

$$p=p_0+\alpha p_1+\alpha^2 p_2+\ldots,\qquad \rho=1+\alpha\rho_1+\alpha^2\rho_2+\ldots$$
$$T=1+\tau-\alpha\tau\sin\varphi+\alpha\tau(A\sin\varphi+B\cos\varphi)+\ldots \qquad (3.1)$$

$$T_n=1+\tau-\alpha\tau r\sin\varphi+\alpha\tau r^m(A\sin\varphi+B\cos\varphi)+\ldots\ (r\ge 1,\ m=-1;\ r\le 1,\ m=1)$$

$$C_p=C_p^0+\ldots,\qquad \beta_T T_c T=\beta_T^0 T_c T^0+\ldots$$

$$C_p^0=\frac{\gamma_i-1+\gamma_i\tau}{\gamma_i\tau}C_{pi},\qquad \beta_T^0 T_c=\frac{2}{3\tau},\qquad T^0=1+\tau$$

Здесь A и B постоянные, а p_0, p_1, ρ_1, ρ_2 функции φ, надлежащие определению.

В результате с точностью до величин более высокого порядка малости относительно α получим

$$p=\frac{3}{8}+\frac{3}{2}\tau-\varepsilon_i\gamma_i\sin\varphi,\quad \rho=1+\frac{4\delta\xi}{9\tau}\sin\varphi-\frac{2\delta}{3\tau}(A\sin\varphi+B\cos\varphi)$$
$$T=1+\tau-\delta\sin\varphi+\delta(A\sin\varphi+B\cos\varphi)\ -$$

$$Q^2 = \frac{h}{\mathrm{Pr}^2}\left(Ra_r(1-K) - Ra^*\right) = \frac{h(Ra^s - Ra^*)}{\mathrm{Pr}^2}$$

$$Nu_s = 1 + \frac{Nu-1}{1-K} = 1 + \frac{Ra^s - Ra^*}{Ra^s} \qquad (3.2)$$

$$A = \frac{(Ra^s - Ra^*)(1-K)}{Ra^s}, \quad B = \frac{2\sqrt{h(Ra^s - Ra^*)}(1-K)}{Ra^s h}, \quad \xi = \frac{3}{2} - \beta$$

Здесь $Ra^s = Ra_r(1-K)$ - модифицированное число Рэлея, $Ra^* = 4/h$ - критическое число Рэлея-Дарси в приближении Буссинеска, Nu_s - модифицированное число Нуссельта, введенное в [12].

Таким образом, выражения (3.2) дают решение нелинейной стационарной задачи в условиях малого пространственного изменение свойств газа.

При тех же условиях для совершенного газа получим решение

$$p = 1 + \tau - \varepsilon_i \gamma_i \sin\varphi, \quad \rho = 1 + \frac{\delta(1-\beta)}{1+\tau}\sin\varphi - \frac{\delta}{1+\tau}(A_1 \sin\varphi + B_1 \cos\varphi)$$

$$T = 1 + \tau - \delta\sin\varphi + \delta(A_1 \sin\varphi + B_1 \cos\varphi)$$

$$Q^2 = \frac{1}{\mathrm{Pr}_i^{\,2}}\left(\frac{1}{1+\tau} Rah(1-K_i) - 4\right) = \frac{h\left[Ra_i^s - Ra^*(1+\tau)\right]}{\mathrm{Pr}_i^{\,2}(1+\tau)} \qquad (3.3)$$

$$Nu_s = 1 + \frac{Ra_i^s - Ra^*(1+\tau)}{Ra_i^s}, \quad A_1 = \frac{\left[Ra_i^s - Ra^*(1+\tau)\right](1-K_i)}{Ra_i^s}$$

$$B_1 = \frac{2\sqrt{h(1+\tau)[Ra_i^s - Ra^*(1+\tau)]}(1-K_i)}{Ra_i^s h}$$

Здесь $Ra_i^s = Ra(1-K_i)$ - модифицированное число Рэлея-Дарси для совершенного газа, т.е. число Джеффри.

При этом параметры, входящие в (3.2) и (3.3), связаны соотношениями

$$Ra_r = \frac{2 f_0(\tau)}{3}\frac{\gamma_i - 1 + \gamma_i\tau}{\gamma_i \tau^2} Ra, \quad \mathrm{Pr} = \frac{\gamma_i - 1 + \gamma_i\tau}{\gamma_i \tau}\mathrm{Pr}_i, \quad K = K_i \frac{2\gamma_i(1+\tau)}{3(\gamma_i - 1 + \gamma_i\tau)} \qquad (3.4)$$

4. Обсуждение результатов. Критерий возникновения конвекции совершенного газа был предложен Джеффри [9] на основе линеаризованной системы уравнений Навье - Стокса. При этом спектральная задача не решалась. Критерий Джеффри получается, если в соответствующем критерии в случае приближения Буссинеска в числе Рэлея заданный градиент температуры заменить разностью между ним и адиабатическим градиентом. Полученное таким образом число называется числом Джеффри [10]. Отмеченная спектральная задача, как для совершенного газа, так и для газа Ван-дер-Ваальса была решена в [10]. Однако решение найдено в приближении линеаризации механического равновесия, полагая, что физические свойства газа мало меняются по пространству. В [13] рассмотрена стационарная конвекция совершенного газа в тонком пористом кольце в теплопроводной плоскости. Показано, что при малых значениях ε и δ приближение линейного равновесия справедливо с точностью второго порядка по этим параметрам, однако, если эти параметры не малы, приближение линейного равновесия не приемлемо. Это еще больше относится к рассматриваемому здесь

случаю конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса. Аналитическое выражение критического числа Рэлея- Дарси для произвольных значений параметров в рамках рассматриваемой модели дает формула (2.5). В таблице 1, по формуле (2.5) найдены критические значения приведенного модифицированного числа Рэлея-Дарси Ra_c^s / Ra^* для различных значений параметров задачи. В случае приближения линейного равновесия указанные критические значения не меняются и равны единице.

Таблица №1 Критические значения приведенного модифицированного числа Рэлея - Дарси Ra_c^s / Ra^* для различных значений параметров задачи/

α	$\tau = 10^{-6}$	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
			$\xi = 0.01$			
0.1	1.062	0.999	0.993	0.993	0.996	0.997
0.99	3.237	1.147	0.473	0.247	0.269	0.413
			$\xi = 0.1$			
0.1	3.460	1.498	1.062	0.999	0.994	0.996
0.99	42.354	10.926	3.208	1.128	0.511	0.411

В [4] в случае чистой жидкости разработана методика выявления эффектов связанных с сильной сжимаемостью при конвекции околокритического газа, основанная на том, что критерии, входящие в безразмерную систему определяются по параметрам вдали от критической точки и полагаются равными параметрам для совершенного газа. Как показали результаты расчетов [4], стационарная конвекция характеризуются не указанными критериями, а реальными критериями, учитывающими аномальные свойства газа вблизи критической точки. Показано так же, что если рассмотреть совершенный газ, в котором критерии равны соответствующим реальным критериям в газе Ван-дер-Ваальса, то тепловые и динамические характеристики стационарной конвекции околокритического газа и указанного модельного совершенного газа практически совпадают. Однако отклонения плотности от критического значения для обеих моделей газа существенно различаются, что связано с сильной сжимаемостью околокритического газа. Аналогичные выводы для конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса и модельного совершенного газа в пористом прямоугольнике на основе численных расчетов сделаны в [5]. В [4, 5, 12] предложены формулы перехода от модельных критериев, входящих в систему уравнений, к реальным определяющим свойства конвекции. При этом в этих работах расчетные значения параметров были таковы, что физические свойства газа мало менялись по пространству.

В данной работе при аналогичных условиях в рамках приведенной модели получены аналитические решения нелинейной стационарной задачи для газа Ван-дер-Ваальса и совершенного газа. В случае газа Ван-дер-Ваальса решение дается формулами (3.2), а для совершенного газа (3.3). Сравнение этих решений совершенно наглядно подтверждает отмеченные выводы [4, 5, 12]. Действительно, в систему уравнений (1.1) , которая решалась, входят критерии Ra, Pr_i, K_i, а в ее решение (3.2) - реальные критерии соответственно Ra_r, Pr, K, которые связаны равенствами (3.4), предложенными и названными в цитированных работах калибровочными. Кроме того, если в решении для совершенного газа (3.3) заменить исходные критерии Ra, Pr_i, K_i реальными

критериями для около критического газа Ван-дер-Ваальса Ra_r, Pr, K, то, из сравнения (3.2) с (3.3), распределение температуры, массовый расход газа, число Нуссельта и градиент давления в обеих моделях в первом приближении совпадают (с учетом малости τ). В то же время отклонения плотности от критического значения в обоих решениях (3.2) и (3.3) существенно отличаются. И, наконец, в соответствии с выводами [12], как видно из (3.2), (3.3) , зависимость модифицированного числа Нуссельта $Nu_s(Ra^s)$ не зависит от сжимаемости и совпадает с зависимостью $Nu(Ra)$ для приближения Буссинеска. Отметим, что подробный математический вывод приведенных здесь и других формул дан в работе [14].

Заключение. Рассмотрена задача о стационарной конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом, тонком кольце в теплопроводной плоскости с заданным на бесконечности градиентом температуры. Рассмотрен общий случай, когда свойства газа могут существенно меняться в пространстве. Аналитическими методами с точностью до величин порядка толщины кольца, получен критерий возникновения усредненного по сечению кольца движения. В приближении малости изменения физических свойств газа по пространству найдены аналитические решения задачи над порогом устойчивости гидравлического равновесия для газа Ван-дер-Ваальса и совершенного газа. Из приведенных результатов следует, что конвекция в случае, когда свойства среды существенно меняются в пространстве, мало изучена.

Литература:

1. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
2. *Onuki A., Ferrell R.A.* Adiabatic heating effect near the gas - liquid critical point // Physica A. 1990. V. 164. P. 245-264.
3. *Zappoli B., Juonet A., Amiroudine S., Mojtabi A.* Thermoacoustic heating and cooling in near-critical fluids in the presence of a thermal plume//J. Fluid Mech. 1999. V. 388. P. 389-409.
4. *Полежаев В. И., Соболева Е.Б.* Тепловая гравитационная конвекция околокритической жидкости в замкнутой области с боковым подогревом// Изв. РАН. МЖГ. 2001. №3. С 143-154.
5. *Соболева Е.Б.* Эффекты сильной сжимаемости в естественно -конвективных течениях в пористых средах с околокритической жидкостью// Изв. РАН. МЖГ. 2008. №2. С 57-69.
6. *Горбунов А.А., Полежаев В.И.* Метод возмущений и численное моделирование конвекции для задачи Рэлея в жидкостях с произвольным уравнением состояния/ Препринт №897. М.:ИПМех РАН, 2008. 50с.
7. *Schwarzschild K.* Uber das Gleichgewicht der Sonnenatmosphere// Gott. Nach. 1906.Bd. 41. S. 1-24.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
9. *Jeffreys H.* The instability of a compressible fluid heated from bellow// Proc. Cambr. Phil. Soc. 1930. V.26. №2. P. 170-172
10. *Горбунов А.А., Никитин С.А., Полежаев В. И.* Об условиях возникновения конвекции Рэлея-Бенара и теплообмене в околокритической среде// Изв. РАН. МЖГ. 2007. №5. С 30-46.

11. *Полежаев В. И.* Течение и теплообмен при естественной конвекции газа в замкнутой области после потери устойчивости гидростатического равновесия// Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. №5. С 124-129.
12. *Полежаев В.И., Соболева Е.Б.* Конвекция Рэлея-Бенара в околокритической жидкости вблизи порога устойчивости // Изв. РАН. МЖГ. 2005. №2. С.48-61
13. *Рамазанов М.М.* Конвекция совершенного газа в пористой среде между двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами большой длины// Изв. РАН. МЖГ. 2010. №2. С. 84-96.
14. *Рамазанов М.М.* Аналитическое исследование стационарной конвекции околокритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом тонком кольцевом цилиндре в теплопроводном пространстве // Изв. РАН. МЖГ. 2012 (утверждена в печать)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ВЕРХНИХ СЛОЕВ ЗЕМЛИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Шабанова М.Р., Ахмедов Э.Н., Ахмедова Г.М.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: meil-sha@yandex.ru

На основе уравнения теплопроводности в производных дробного порядка по времени, разработана математическая модель нелокального переноса тепла для задачи о бегущих температурных волнах (задача без начальных условий). Установлена зависимость характерных значений глубины проникновения и времени запаздывания температурных волн в поверхностных слоях земли от параметра нелокальности по времени. Исследована зависимость температуропроводности и параметра нелокальности от глубины на основе данных по измерению распределения температуры в верхних слоях земли.

Большое внимание в геотермии уделяется изучению теплофизических свойств осадочных горных пород, знание которых оказывается необходимым при практическом освоении геотермальной энергии. Осадочные горные породы являются сложными пористыми многофазными средами, характеризуемые широкими вариациями как механических (петрофизических) параметров, так и минералогического состава. В настоящее время, несмотря на накопленный экспериментальный материал и многочисленные теоретические построения, изучения теплофизических свойств осадочных пород весьма далеки от завершения. Исследование теплофизических параметров осадочных пород и выявление общих закономерностей явлений тепломассопереноса затруднено изменчивостью механических параметров минералогического состава и делает невозможным сопоставление экспериментальных данных разных авторов, приводимых без подробного описания изученных образцов. Это затрудняет обобщение материала и выявление закономерностей взаимосвязи тепловых свойств с составом и структурой породы, знание которых необходимо не только для проведения геотермических исследований, но и для понимания физической природы теплопереноса в сложных геофизических средах. Это приводит к необходимости создания адекватных количественных моделей процессов тепломассопереноса и проведения дальнейших экспериментальных исследований теплофизических свойств осадочной толщи литосферы. Отметим, что, несмотря на накопленный экспериментальный материал и многочисленность теоретических построений, в изучении теплофизических свойств сложных пористых многофазных сред, которыми являются большинство осадочных горных пород, недостаточное внимание уделяется такой важной теплофизической характеристике среды, как ее температуропроводность [1–5]. Это связано с тем, что большинство распространенных ныне методов теплофизических исследований (стационарные, импульсные методы, метод подвижного источника и т.д.), находящих применение в геотермии, позволяют непосредственно измерять лишь величину теплопроводности. В связи с этим рассмотрим важную для прикладных аспектов задачу о бегущих температурных волнах (задача без начальных условий). Математический аппарат интегродифференцирования дробного порядка позволяет в зависимости от решаемой задачи применить соответствующую производную дробного порядка. В случае задачи без начальных условий, когда условия не влияют на распределение температуры в

момент наблюдения, ставится задача нахождения решения уравнения теплопроводности, удовлетворяющего граничному условию одного из трех типов, заданных для всех $\tau > -\infty$. Уравнение теплопроводности в производных дробного порядка для задачи без начальных условий принимает вид

$$\frac{\partial^{\alpha} \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \tau^{\alpha}} - D\frac{\partial^{2} \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \xi^{2}} = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^{\alpha} \mathrm{T}(\xi,\tau)}{\partial \tau^{\alpha}} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)}\frac{\partial}{\partial \tau}\int_{-\infty}^{\tau}\frac{\mathrm{T}(\xi,z)}{(\tau-z)^{\alpha}}dz \qquad (2)$$

Здесь $0 < \xi < \infty$, $T(\xi,\tau)-$ температура, $D = at_0/x_0^2-$ безразмерный коэффициент температуропроводности, $a = \lambda / c_p\rho-$ коэффициент температуропроводности, λ – коэффициент теплопроводности, c_p – удельная изобарная теплоемкость, $\rho-$ плотность вещества, $0 < \alpha \le 1; \tau = t/t_0, \xi = x/x_0$ – безразмерные время и координата; t_0, x_0- характерные время и масштаб; (2) - производная Лиувилля учитывает память (нелокальность по времени).

Рассмотрим случай граничного условия первого типа $T(0,\tau) = \varphi(\tau)$.

Получено общее решение в виде [6]

$$T(\xi,\tau) = \frac{2D}{\pi}\int_{0}^{\infty} dk \cdot k\sin(k\xi)\int_{-\infty}^{\infty}\frac{d\omega}{2\pi}\exp(-i\omega\tau)\frac{\varphi_F(\omega)}{D\cdot k^2 + (i\omega)^{\alpha}}, \qquad (3)$$

где $\varphi_F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \exp(-i\omega\tau)\varphi(\tau)$. Рассмотрен случай, когда $\varphi(\tau) = \tilde{T}_0\cos(\Omega\tau)$, где Ω - частота изменения температуры, тогда решение принимает вид:

$$T(\xi,\tau) = \tilde{T}_0\exp\left(-\xi\sqrt{\Omega^{\alpha}/D}\cdot\cos(\pi\alpha/4)\right)\cdot\cos\left(\Omega\tau - \xi\sqrt{\Omega^{\alpha}/D}\cdot\sin(\pi\alpha/4)\right). \qquad (4)$$

При $\alpha = 1$ решение (4) переходит в известное решение [7]:

$$T(\xi,\tau) = \tilde{T}_0\exp\left(-\xi\sqrt{\Omega/2D}\right)\cdot\cos\left(\Omega\tau - \xi\sqrt{\Omega/2D}\right). \qquad (5)$$

Как видно из (4) и (5) учет эффектов памяти приводит к перенормировке характерного масштаба затухания и времени запаздывания температурных волн.

Для характерного масштаба затухания температурных волн имеем $l = \tilde{x}_0/\sqrt{2}\cdot\cos(\pi\alpha/4)$, где $\tilde{x}_0 = \sqrt{2a^2/\omega}$ - характерный масштаб затухания при отсутствии учета эффектов памяти (α=1). Для характерного времени запаздывания температурных волн имеем: $t_з = \tilde{t}_0\cdot\sqrt{2}\sin(\pi\alpha/4)$, где $\tilde{t}_0 = \sqrt{1/(\omega\cdot a^2)}$ - характерное время запаздывания температурных волн без учета эффектов памяти. Глубина проникновения тепла в почву зависит от периода колебаний температуры на поверхности и параметра нелокальности

$$T(\xi,\tau) = \tilde{T}_0\exp(-\xi\sqrt{\Omega/2D})\cdot\cos(\pi\alpha/4).$$

Так, отношение глубины проникновения тепла ξ_1 и ξ_2 для колебаний с частотами Ω_1 и Ω_2 при учете нелокальности по времени оказывается равным $\xi_2/\xi_1 = (\Omega_2/\Omega_1)^{\frac{\alpha}{2}}$. Для суточных и годичных колебаний имеем $\xi_2/\xi_1 = (365)^{\frac{\alpha}{2}} = (19.1)^{\alpha}$. Таким образом глубина проникновения годовых колебаний оказывается зависящей от параметра нелокальности по времени. При

$\alpha < 1$ характерная длина затухания увеличивается, а характерное время запаздывания уменьшается.

Описание процессов переноса тепла на основе дифференциальных уравнений дробного порядка позволяет естественным образом учесть нелокальность по времени. Дифференциальные уравнения в производных дробного порядка имеют более широкий, зависящий от параметра α класс решений. В частном случае (α=1) полученное решение совпадает с ранее известным. В остальных случаях мы имеем новый класс решений, асимптотическое поведение которых качественно отличается от ранее известных решений. Важно то, что функциональный вид полученных решений определяется значением показателя производной дробного порядка α и, тем самым, он становится новым параметром теории для интерпретации экспериментальных данных.

Предлагается новый метод определения температуропроводности на основе полученного решения и данных измерения распределения температуры в поверхностных слоях Земли. Метод расчета заключается в определении значений безразмерной температуропроводности и параметра нелокальности α. Подставляя заданные значений ξ_i, τ_i и экспериментально определенного значения температуры $T(\xi_i, \tau_i)$ в формулу, определяем значения параметров D, α. На рис.1 приведены результаты экспериментальных и расчетных данных распределения температуры в верхних слоях Земли. Экспериментальная кривая (сплошная кривая) взята из работы [8] и соответствует результатам режимных наблюдений на геотермической станции (г. Избербаш 10.05.1959 г.). Пунктирная и точечная кривые соответствуют расчетным кривым по формуле:

$$T(\xi,\tau) = T_0 + \tilde{T}_0 \exp\left(-\xi\sqrt{\Omega^\alpha / D}\cdot\cos(\pi\alpha/4)\right)\cdot\cos\left(\Omega\tau - \xi\sqrt{\Omega^\alpha / D}\cdot\sin(\pi\alpha/4)\right) \quad (6)$$

где T_0 среднесуточная температура поверхности земли.

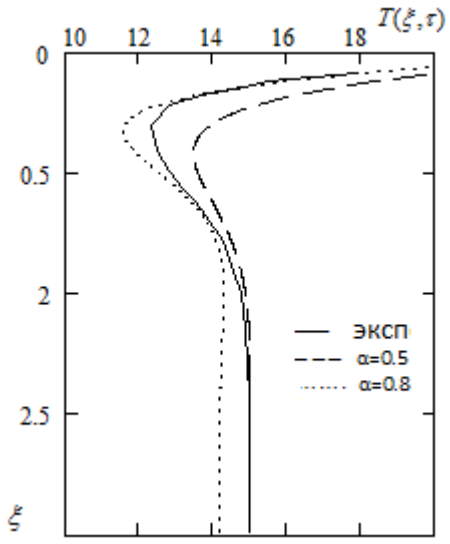


Рис. 1 Экспериментальные и расчетные данные распределения температуры.

На рис.2 приведены результаты расчета температуропроводности как функции координаты. В отличие от традиционного расчета в данном случае мы рассчитываем зависимость температуропроводности от координаты.

Температуропроводность вычисляется по формуле $a = D \cdot x_0^2 / t_0$. Коэффициент D рассчитывается и его значения приведены на рис. 2. Параметр

$x_0 = 10$м, для характерного параметра времени, поскольку рассматриваются годичные колебания, то t_0 равен году.

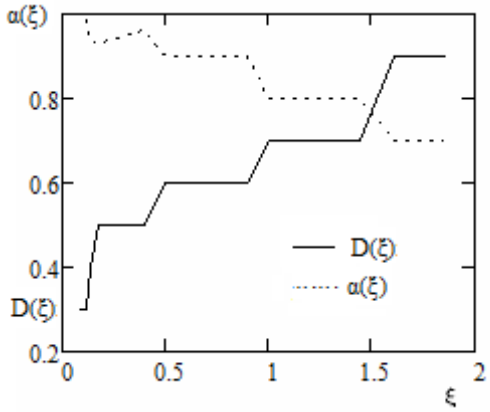


Рис.2 Расчетные значения температуропроводности и параметра нелокальности по времени.

Имеем $a = D \cdot x_0^2 / t_0 = D \cdot 3.17 \cdot 10^{-7} (м^2 / сек)$. В соответствии с расчетами получается, что температуропроводность изменяется в пределах $0.16 \cdot 10^{-7} - 0.3 \cdot 10^{-7} (м^2 / сек)$, что соответствует результатам других авторов [9]. Кроме того, температуропроводность в данном случае увеличивается с глубиной. Как видно на рис. 2. с глубиной меняется параметр нелокальности по времени α. Это соответствует тому, что свойства почвы изменяются вглубь. Таким образом, предлагаемый метод анализа экспериментальных данных на основе однопараметрического семейства решений позволяет получить новые результаты из ранее известных экспериментальных данных.

Литература:

1. *Вавилов В.П.* Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
2. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. 544 с.
3. *Власов А.Б.* Расчет эксплуатационных показателей надежности контактных соединений с помощью тепловизионного контроля. Электротехника, №8. 2002. – С. 30-35.
4. *Власов А.Б.* Исследование нестационарных тепловых процессов в диэлектрике с помощью тепловизора // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. Т.6. №1, 2003. – С. 29-34.
5. *Власов А.Б.* Исследование коэффициента Температуропроводности электроизоляционных материалов с помощью тепловизора // Известия Российского Государственного педагогического университета им. А.И.Герцена, Естественные и точные науки. 2004, 4(8). – С. 134-143.
6. *Мейланов Р.П., Шабанова М.Р.* Особенности решений уравнения теплопереноса в производных дробного порядка.// ЖТФ. – 2011г.– Т.81.–№7.– С. 1–6.
7. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.
8. *Амирханов Х.И., Суетнов В.В., Левкович Р.А., Гаирбеков Х.А.* Тепловой режим осадочных пород. Махачкала, 1972. 230 с.
9. *Фролов Н.М.* Температурный режим гелиотермозоны. Москва, 1966. 156 с.

ЧИСЛЕННОЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Мирошник О.О., Кирюхин А. В., Рычкова Т. В.

Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН; Россия, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа 9; e-mail: LeL89@yandex.ru

Эксплуатация Мутновского геотермального месторождения, осуществляемая с 2000 г с расходом отбора теплоносителя до 500 кг/с (600 МВт) сопоставима с энергетической мощностью близрасположенных активных вулканов Мутновского (8 км, 190 МВт без учета фумарольной деятельности) и Горелого (10 км, 100 МВт). Эксплуатация сопровождается усилением сейсмической активности (данные КФ ГС РАН) и исчезновением прилегающих термопроявлений (Воиновские и В-Жировские горячие источники).

Для анализа состояния Мутновского геотермального резервуара и эффекта эксплуатации на прилегающие вулканические массивы осуществлена сборка модели-96 (Kiryukhin A.V. Modeling Studies: the Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics. 1996.V. 25. № 1. P. 63-90) с использование пре- и постпроцессора программы TOUGH2 – PetraSim v.5.0. Выполнен анализ геологической информации и подготовлена цифровая геологическая карта Мутновского геотермального месторождения и прилегающих территорий по данным геологического картирования вулканов Мутновский и Горелый М 1:25000 (О.Б. Селянгин, 2010); Мутновского месторождения парогидротерм М 1:50000 (Писарева М.В. 1987) и Жировского вулкана М 1:50000 (Самылов Н., 1989). Подготовлены исходные данные для дополнительной калибровки модели: расходы и энтальпии добычных и инжекционных скважин (1987-2006 гг), термограммы полученные в период эксплуатации.

Выполнено прямое моделирование с использованием пре-постпроцессора TOUGH2 – программы PetraSim v.5.0, по естественному состоянию и истории эксплуатации 1984-2006 гг. и сопоставление с фактическими данными. Осуществлена трехмерная визуализация текущих характеристик резервуара - распределения температуры, давления и фазового состояния.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ЮЖНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ И АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКЕ КРЫМ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Тарасова В.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва, Фрунзенская наб.,119146;
e-mail: veroxy91@mail.ru

Развитие ветровой энергетики как одного из направлений производства энергии с использованием возобновляемых источников является в настоящее время наиболее динамичным. Ежегодные темпы роста установленных мощностей ветровых станций в мире в последние годы не снижаются ниже 20%, что выше, чем в традиционных отраслях энергетики. В Российской Федерации только в последние
5 − 10 лет в связи в первую очередь с государственными инициативами началось осуществление ряда проектов в области ветроэнергетики. Они в основном относятся к подготовительной стадии (ветомониторинг) строительства ветроэнергостанций (ВЭС), и только одна крупная ВЭС находится в настоящее время в стадии строительства: Дальневосточная ВЭС на о. Русский и о. Попова.

В то же время не только страны Европейского Союза, США, Китай, Индия – признанные лидеры в области возобновляемой энергетики, – но и страны СНГ в последние годы демонстрируют серьезный прогресс в области освоения технологий возобновляемой энергетики. В частности, Украина в определенном смысле выдвинулась в лидеры по развитию на своей территории ветровой и биоэнергетики. При этом достаточно большое количество автономных ветроустановок и сетевых ВЭС действуют на территории Автономной Республики Крым, находящейся в непосредственном соседстве с регионами Юга России.

В связи с вышеизложенным актуальным является рассмотрение опыта соседнего государства – и конкретно АР Крым – в области возобновляемой (и, в частности, ветровой) энергетики; анализ методов, использованных для продвижения ветроэнергетических проектов; сравнение природных и социально-экономических стимулов развития энергетики на ВИЭ в Крыму и регионах Юга России.

Для проведения характеристики выбранных регионов были приняты в качестве наиболее значимых критериев следующие:

- физико-географические характеристики (с основным акцентом на метеорологические данные о скоростях ветра, рельефе, типе подстилающей поверхности);
- социально-экономические характеристики (с основным акцентом на масштабы развития ведущих отраслей промышленности/сельского хозяйства, состояние энергетического комплекса; демографическую ситуацию);
- экологическое состояние региона.

Оценка ресурсов ветровой энергии представляется достаточно сложной задачей в связи с временной и пространственной неравномерностью ветра и, следовательно, необходимостью иметь достаточную фактическую основу для проведения расчетов. Рассмотрим применяемые в настоящее время подходы к определению валового (природного) потенциала ветровой энергии региона.

Следует отметить, что для исчерпывающего описания ветропотенциала используют широкий набор параметров ветра, включающий до двух десятков характеристик [Николаев В.Г., Ганага С.В…, 2008]. Их можно разделить на несколько типов.

1. Климатические характеристики, позволяющие оценить ветроэнергетический потенциал региона:
   - повторяемость средних скоростей ветра;
   - длительность ветровых периодов и периодов затишья;
   - средние годовые, месячные, среднесрочные скорости и направления ветра;
   - вертикальные профили скоростей ветра в приземном слое атмосферы (до 100-200 м);
   - характеристики суточного и годового хода скоростей ветра;
   - повторяемость направлений ветра
2. Параметры, определяющие рабочие характеристики ветроэнергетических установок (ВЭУ) и выбор оптимальных режимов их работы:
   - продолжительность ветра со скоростями, ниже номинальной скорости ветра данного типа ветроустановки;
   - продолжительность ветра со скоростями, выше номинальной скорости ветра данного типа ветроустановки;
   - данные о скоростях ветра выше заданного предельного значения (буревой скорости ветра)
3. Характеристики ветра, используемые при проектировании и расчетах прочности и устойчивости работы ВЭУ:
   - интенсивность атмосферной турбулентности;
   - максимальные скорости и порывы ветра;
   - оценка их продолжительности и повторяемости для всего диапазона рабочих высот ВЭУ.

В представленной работе были рассмотрены только климатические характеристики, необходимые для оценки ветроэнергетического потенциала региона.

На основе собранных из различных источников данных о скоростях ветра (метеоизмерения, климатические базы данных) и повторяемости его на различных высотах можно говорить о достаточно близких их значениях для рассматриваемых регионов (таблица 1): большинство значений средней скорости на высотах флюгерных измерений метеостанций варьируется в диапазоне 4,0 – 5,0 м/с. Данные климатического моделирования (NASA SSE) также дают для рассматриваемых регионов достаточно близкие значения (таблица 2). Среднегодовые скорости ветра, как указывалось выше, не являются точной характеристикой ветропотенциала, но как некоторый инструмент сравнения территорий (в первом приближении) может быть использован.

Что касается рельефа и некоторых характеристик подстилающей поверхности, то, если рассматривать все указанные области РФ как единое целое, можно видеть, что они включают в себя равнинные территории (Ростовская область, Ставрополье, северная часть Краснодарского края), предгорья (район Кавказских минеральных вод Ставрополья), горные территории (Большой Кавказ на территории Краснодарского края), побережья морей (Азовского и Черного). Территория АР Крым также омывается водами Черного моря и характеризуется

достаточно широким разнообразием форм рельефа: северная равнинная территория (Степной Крым) и южная горная (Горный Крым).

Таблица 1. Средняя годовая скорость ветра по данным метеостанций

Регион	Метеостанция	Средняя годовая скорость ветра, м/с (метеоданные)
Ростовская область	Миллерово (высота 9,8 м)	4,6
	Ростов-на-Дону (10,2 м)	4,0
	Таганрог, маяк (11,7 м)	4,3
Краснодарский край	Приморско-Ахтарск (12,0 м)	3,9
	Тихорецк (11,0 м)	4,4
	Краснодар, маяк (10,5 м)	2,7
	Красная поляна (13,9 м)	1,7
	Сочи оп, ст, (15,1 м)	2,6
Ставропольский край	Арзгир (8,3 м)	2,9
	Ставрополь (11,0 м)	4,0
	Невинномысск, маяк (10,0 м)	3,5
	Пятигорск (11,0 м)	3,3
АР Крым	Клепинино (14,0 м)	3,9
	Симферополь (11,0 м)	4,6
	Феодосия, (13,0 м)	4,5
	Караби-Яйла (6,0 м)	5,9
	Севастополь (20,0 м)	4,5
	Ялта (11,0 м)	2,8
	Ай-Петри (11,0 м)	5,4

Таблица 2. Сравнение среднегодовой повторяемости (%) скорости ветра по разным источникам данных: Краснодарский край, Сочи оп, ст. и Автономная Республика Крым, Феодосия

Градации скорости ветра		0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17
Повторяемость, метеоданные (высота 10м)	Сочи	51,3	28,5	12,0	4,2	2,3	0,7	0,2	0,6	0,2
	Феодосия	21,5	29,7	22,2	11,8	11,8	1,7	0,9	0,3	0,1
Градации скорости ветра (преобразованное разбиение диапазона, NASA SSE[1])		0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17
Повторяемость, NASA SSE (высота 50 м)	Сочи	9,3	20,5	31,5	20,1	10,5	6,0	1,5	0,75	0
	Феодосия	6,6	17,5	26,5	22,3	16,0	9	2	1	0

Одним из основных аспектов при изучении и сравнении регионов с точки зрения возможности и необходимости развития ветроэнергетики является рассмотрение социально-экономических характеристик Ростовской области, Краснодарского и Ставропольского краев Российской Федерации (РФ) и

[1] NASA SSE - база данных NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Автономной Республики Крым Украины. Перечисленные регионы РФ имеют высокую численность и плотность населения (таблица 3), возрастающую в летний период, что связано со значительным рекреационным потенциалом местности. Одним из важнейших условий развития рекреационной инфраструктуры является хорошая экологическая ситуация на территории. Все это приводит к необходимости энергообеспечения на основе наиболее экологически чистых технологий.

Таблица 3. Плотность населения, человек/км^2

Регион	Плотность населения
Ростовская область	42
Краснодарский край	67,9
Ставропольский край	40,9
АР Крым	81,8 На территории курортных южнобережных горсоветов плотность составляет до 100 чел. на км^2

Все рассмотренные российские регионы являются крупными промышленными центрами. Кроме того, благоприятные агроклиматические условия и земельно-почвенные ресурсы определили масштабное сельскохозяйственное производство на всех территориях, включая республику Крым.

С точки зрения анализа потребностей в дополнительной выработке электроэнергии в регионах информативными являются приведенные ниже энергобалансы. Из сводной таблицы 4, которая была построена на основе данных об энергобалансах регионов, видно, что энергодефицитными являются Краснодарский край и АР Крым. При этом Краснодарский край, имеет самую высокую и продолжающую расти численность населения среди рассмотренных регионов.

Таблица 4. Разность выработанной и потребленной в регионе электроэнергии (млн. кВтч)

Регион	Электробаланс (+ - избыток выработки энергии; − - дефицит энергии)
Ростовская область	+4222,9
Краснодарский край	-11255
Ставропольский край	+6530
АР Крым	-3271,1

Генерация электроэнергии осуществляется в основном на теплоэлектроцентралях (Ставрополье, Ростовская область, АР Крым) и частично на ГЭС (Краснодарский край, Ставропольский край). В то же время по оценкам [Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). – М.: «ИАЦ Энергия», 2007. – 272 с.] валовой ветроэнергетический потенциал Краснодарского края составляет 5016 млрд. кВтч., что показывает перспективность использования ветровой энергии для покрытия дефицитного энергобаланса. В целом для Южного и Северокавказского Федеральных округов по данным Института «Ростовтеплоэлектропроект» (2006г.) валовой ветроэнергетический потенциал составляет 69,6 трлн. кВтч/год, технический ветровой потенциал – около 14 трлн. кВтч/год, экономический ветровой потенциал – 0,7 трлн. кВтч/год. Согласно прогнозам, дефицит электроэнергии в указанных регионах до 2030 года составит

порядка 114 трлн. кВтч/год; таким образом, с использованием современных ВЭУ, за счет экономического потенциала, можно будет обеспечить до 250 млрд. кВтч/год электроэнергии.

Что касается Украины, можно сказать, что Автономная Республика Крым не только обладает значительным ветроэнергетическим потенциалом, но и эффективно его использует. На сегодняшний день в Крыму ветроэнергетике уделяется большое значение, идет ее интенсивное развитие, активно используются уже существующие ветровые электростанции, создаются новые проекты, развиваются мощности и украинских производителей ветроагрегатов, привлекаются иностранные фирмы-инвесторы при наличии реальной государственной поддержки.

На 1 декабря 2009 года суммарное производство электроэнергии ветроэлектростанциями республики составило 26,2 млн. кВтч, а с начала эксплуатации с учётом 2009 года — 270,6 млн. кВтч.

Действующие объекты ветроэнергетики на территории Автономной Республики Крым представлены ниже на рисунке 1.

Таким образом, рассмотренные российские регионы и АР Крым характеризуются целым рядом сходных параметров, определяющих возможность и целесообразность осуществления проектов ветровой энергетики:

- наличие природных ресурсов (средние годовые скорости ветра в основном 4,0 – 5,0 м/с);
- дефицитный в ряде случаев электробаланс (Ростовская область: +4222,9 млн. кВтч; Краснодарский край: –11255 млн. кВтч; Ставропольский край: +6530 млн. кВтч; АР Крым: –3271,1 млн. кВтч)
- растущие энергетические потребности;
- достаточно высокий уровень выбросов в окружающую среду, в том числе от энергетических объектов (максимальные выбросы в атмосферу среди рассмотренных регионов – в Краснодарском крае; минимальные – в республике Крым).

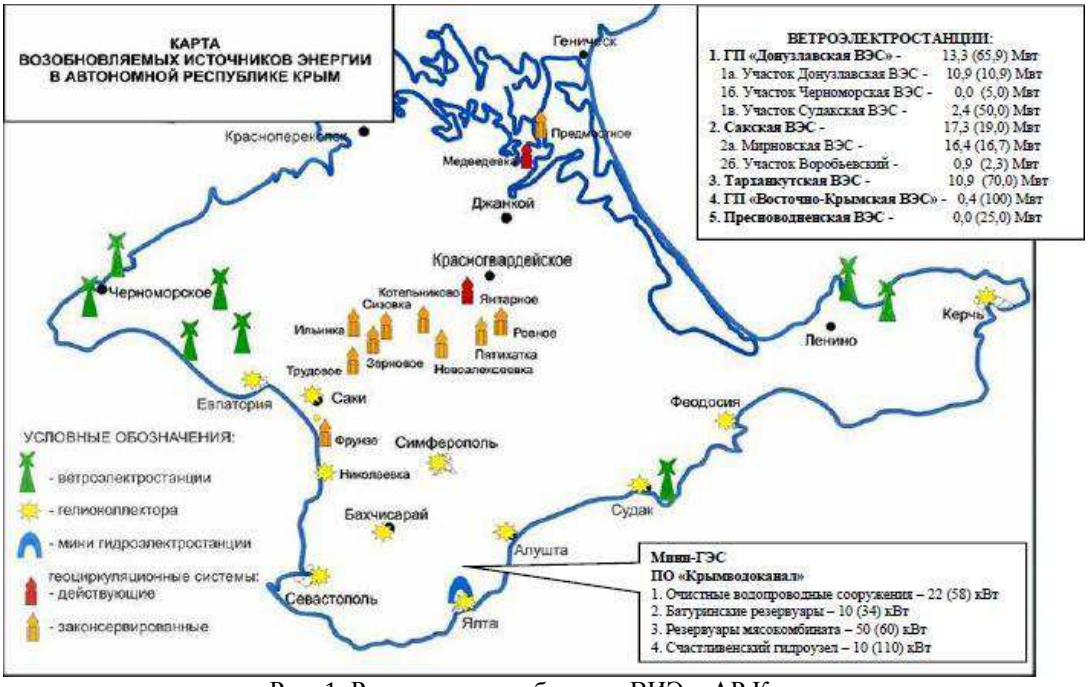


Рис. 1. Расположение объектов ВИЭ в АР Крым.

В рассматриваемых российских регионах в настоящий момент нет действующих сетевых ветростанций; ведутся (или проведены) исключительно проекты ветромониторинга, те предпроектные разработки на площадках Ейск, Темрюк, Анапа, Приморск, Порт Кавказ, Обнинская, Кочубей и другие.

В Автономной республике Крым развитие ветроэнергетики осуществляется на основе развитой законодательной базы Украины; в настоящее время эксплуатируются 522 ВЭУ, общей мощностью 60,3 МВт; начинается реализация проектов строительства ветропарков общей мощности 1000 МВт.

Исследования проводились при финансовой поддержке Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационой России» на 2009-2013 годы».

ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ СОЛЕВЫХ СИСТЕМ

Зейналов М.Ш., Алхасов Б.А., Вердиева З.Н., Саидова С.К., Вердиев Н.Н.

Филиал объединенного института высоких температур РАН;
Махачкала, Россия; 367030, ул. Ярагского, 75; e-mail: verdieva_zaura@mail.ru, muhspec@rambler.ru

Одним из главных недостатков возобновляемых источников энергии является периодичность существования их во времени, этот пробел можно устранить аккумулированием избыточной энергии. Для аккумулирования тепловой энергии применяются теплоёмкостные аккумуляторы. В качестве теплоаккумулирующих материалов, в таких аккумуляторах используют кирпич, грунт, гравий, т.е. охлаждение и нагревание происходит без фазовых превращений. Преимуществом таких систем является легкодоступность, долговечность, дешевизна теплоаккумулирующего материала и простота конструкции теплового аккумулятора. Главным недостатком теплоемкостных аккумуляторов является малая плотность накапливаемой энергии, необходимость перегрева теплоаккумулирующего материала, переменная температура отбора тепла.

Высокой плотностью аккумулирующей энергии обладают вещества с фазовым переходом плавление – кристаллизация, к тому же отбор тепла при их использовании, происходит при заданных температурах, к ним относятся: кристаллогидраты неорганических солей, эвтектические смеси водно-солевых, солевых, оксидных, оксидно-солевых и металлических систем.

Кристаллогидраты неорганических солей рекомендуются использовать для аккумулирования низкопотенциального тепла, так как обладают достаточными значениями энтальпий фазовых переходов. Существенным недостатком кристаллогидратов, является склонность к переохлаждению и инконгруэнтный характер плавления. При кристаллизации кристаллогидратов происходит расслаивание твердой и жидкой фаз с выпадением в осадок твердофазных продуктов. В результате твердая фаза осаждается на теплопередающую поверхность и снижается эффективность теплообмена, далее с ростом числа циклов "плавление-кристаллизация" уменьшается энтальпия фазового перехода.

Из анализа литературных источников следует, что наибольшей энтальпией фазового перехода обладают вещества при переходе из жидкого в газообразное состояние. Использование фазового перехода жидкость-газ в тепловых аккумуляторах не нашло широкого практического применения, так как это связано с многократным увеличением объема теплового аккумулятора.

К теплоаккумулирующим материалам предъявляют ряд требований: высокие значения скрытой теплоты фазового перехода; заданная температура плавления и кристаллизации; высокая теплопроводность и теплоемкость в твердой и жидкой фазах; низкий коэффициент теплового расширения; сравнительная дешевизна; незначительное переохлаждение при кристаллизации; нетоксичность, и т.д.

Проведенный нами анализ ранее исследованных солевых систем, показывает, что величина энтальпии фазового перехода эвтектических смесей находится в зависимости от содержания в них компонентов с большими значениями энтальпий фазовых переходов.

С целью подбора энергоемких теплоаккумулирующих фазопереходных материалов (плавление-кристаллизация), для аккумулирования среднепотенциального тепла, нами выбраны две трехкомпонентные взаимные системы, сформированные из гидроксидов, нитратов**,** нитритов нитратов лития и натрия.

Система Li, Na // NO_2, NO_3 [1]. Диагональное сечение $LiNO_2$ – $LiNO_3$ стабильное, перевальная эвтектическая точка при 133 ºС и 35 экв.%. $NaNO_3$. Поверхность ликвидуса системы состоит из полей кристаллизаций $NaNO_3$, $NaNO_2$ и твердых растворов $LiNO_2$ – $LiNO_3$. Эвтектика при 126 ºС и 55экв.% $LiNO_2$, 33 экв.% $NaNO_3$ и 12 экв.% $NaNO_2$.

Система Li, Na // OH, NO_3 [1]. Система исследована разными авторами. Во всех случаях стабильным диагональным сечением является LiOH – $NaNO_3$, перевальная эвтектическая точка при 293 ºС и 92,5 экв.% $NaNO_3$. В системе образуются шесть тройных нонвариантных точек, три из которых являются эвтектическими. Для изучения теплофизических свойств выбрана эвтектическая точка плавящаяся при 160 ºС и содержащая 33 экв.% LiOH, 53 экв.% $LiNO_3$ и 14 экв.% $NaNO_3$.

Выбор объекта исследований обоснован тем, что в исследуемые системы входят литиевые соединения, обладающие наибольшими значениями энтальпий фазовых переходов и нитраты, нитриты способствующие предотвращению коррозии.

Данные по однокомпонентным системам приведены в таблице.

Таблица. База данных по однокомпонентным системам.

Соединение	М масса, г/моль	Температура плавления, К	Температура плавления, С	Энтальпия плавления, Дж/кг	Лит-ра
$LiNO_3$	68,9442	526	253	370	[2]
$LiNO_2$	52,9448	495	222	174	
$NaNO_2$	68,9958	557	284	216	
$NaNO_3$	84,9952	579,5	306,5	177	
LiOH	23.9479	744	471	1080	
NaOH	23.9479	1017	744	160	

В результате проведенного обзора по материалам пригодным для аккумулирования тепловой энергии, выбраны две трехкомпонентные взаимные системы для изучения теплофизических свойств эвтектических смесей локализованных в этих системах.

Литература:

1. Диаграммы плавкости солевых систем: Справочник (тройные взаимные системы) // В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: Химия, 1977. 392 с.
2. Термические константы веществ./ Справочник под ред. Глушко В.П. и др. М.: АН СССР. 1968.

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ТАРУМОВСКОГО РАЙОНА ДАГЕСТАНА

Мамаев Г.С.[1], Камалутдинова И.А.[2], Каймаразов А.Г.[2], Апандиев Р.Б.[2]

[1] Дагестанский государственный технический университет; Махачкала, Россия; 367030, пр.И.Шамиля, 70
[2] Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр.И.Шамиля, 39а; e-mail: kaymarazov@mail.ru

Представлены результаты исследования состава и свойств низкопотенциальных вод (НПВ) артезианского бассейна Тарумовского района РД по данным экспедиционных работ 2009-2011 гг., проведенных при поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт от 15.06.2009г. № 02.740.11.0059). Обсуждаются вопросы состояния НПВ и перспектив их освоения на различные народно-хозяйственные нужды, в том числе для хозяйственно-питьевого водопользования. Как наиболее значимая отмечается проблема загрязнения питьевых скважинных вод соединениями мышьяка и фенолами.

Тарумовский район Республики Дагестан представляется одним из наиболее перспективных регионов в плане вовлечения геотермальных ресурсов в топливно-энергетический баланс республики с частичной заменой традиционных органических топлив в системах энерго- и теплоснабжения населения. На его территории вскрыты горизонты с различными по энергетическому потенциалу и запасам гидротермальными ресурсами.

Так, в окрестностях административного центра – с. Тарумовка, разведано уникальное месторождение высокопараметрических гидротерм осадочного бассейна, характеризующееся аномально высоким пластовым давлением: до 71 МПа, эффективной мощностью коллекторов до 3,5 м, температурами, достигающими на глубине 5500 м 198 ^{0}С [1]. На трех скважинах, пробуренных на термальные воды, опробованы водоносные горизонты на глубинах от 5382 м до 5479 м и получены фонтаны паротермальной воды с дебитами до 1600 м^3/сут (через 42мм штуцер) и широким спектром ценных компонентов, позволяющим рассматривать разведанные ГТВ в качестве энергосырьевых ресурсов для строительства ГеоЭС и организации производства неорганических солей и материалов.

Апшеронскому водоносному горизонту региона приурочены среднепотенциальные ресурсы с температурами на забое до 60-65 ^{0}С, весьма привлекательными для организации систем горячего водоснабжения и отопления на подземных водах.

Не менее актуальна проблема освоения низкопотенциальных вод ввиду возможности обеспечения населения одновременно и теплом и качественной питьевой водой на основе внедрения экологически чистых, малозатратных, а, следовательно, быстроокупаемых энергетических технологий, ориентированных, в том числе и на децентрализованного потребителя.

Последнее обстоятельство может играть решающую роль в пользу освоения НПВ района, если учесть размеры его территории и плотность населения.

Тарумовский район, расположенный на севере Республики Дагестан в пределах Прикаспийской низменности, является вторым по величине (после Ногайского района) среди районов республики. Площадь его территории

составляет 3111 км². Северная граница района, являясь административной границей Республики Дагестан с Республикой Калмыкия, проходит по р. Кума. С востока район омывается водами Каспийского моря, на западе он граничит с Ногайским, а на юге – с Кизлярским районами.

И если население южных территорий района (с.Тарумовка, с.Калиновка, с.Раздолье и др.) не испытывает нехватку воды, то в северных засушливых зонах района скважинные воды артезианского бассейна по сути являются единственным источником вод не только хозяйственно-питьевого, но и технического назначения.

В связи с общей аридизацией климата наблюдается уменьшение дебита источников поверхностных вод и увеличение процессов испарения грунтовых вод, что способствует падению уровня последних во времени. Это приводит к усилению процессов вторичного засоления почвогрунтов, сокращению площадей, занятых луговыми почвами, (пастбищными угодьями). В Тарумовском районе сильнозасоленные почвы и солончаки занимают более 50%, а незасоленные земельные площади (лугово-болотные почвы) составляют чуть более 7% всех площадей при общей тенденции к постепенному увеличению территорий с высокой степенью засоленности [2].

Поэтому внедрение эффективных научно-обоснованных технологий землепользования, мелиорации угодий с использованием артезианских вод позволит воспрепятствовать дальнейшему опустыниванию территорий района.

В ходе полевых экспедиционных работ, проведенных в 2009-2011 гг., обследовано свыше 50 скважин большей части населенных пунктов и поселений Тарумовского района, вплоть до северной границы района (республики), в том числе, в с. Тарумовка (10 скважин), в крупнейшем населенном пункте района – с. Кочубей и на территории, прилегающей к одноименной железнодорожной станции (12 скважин), в ст. Александро-Невская (2 скважины), в с. Калиновка (3 скважины), с. Карабаглы (1 скважина), ст. Коктюбей (2 скважины), в усадьбе колхоза им. Максима Горького (2 скважины), в с. Новогеоргиевка (2 скважины), в с. Новодмитриевка (3 скважины), в с. Новороmановка (1 скважина), в с. Раздолье (2 скважины), в с. Таловка (4 скважины), в с. Юрковка (1 скважина).

Отмечая санитарно-техническое состояние скважин и прилегающих территорий, следует указать на отдельные случаи неконтролируемого излива вод, результатом которого стало подтопление и заболачивание территорий в окрестностях скважин (см. рис. 1,2).

Рис. 1. Затопление территорий в окрестностях с. Кочубей (Тарумовский р-н, РД).

Рис. 2. Заболачивание территорий в окрестностях с. Новороmановка (Тарумовский р-н, РД).

По составу макрокомпонентов НПВ Тарумовского р-на относятся к гидрокарбонатно-натриевому и сульфатно-натриевому типам вод (см. табл. 1) и в целом соответствуют требованиям, предъявляемым к водам хозяйственно-питьевого назначения.

В тоже время наиболее токсичными загрязнителями, установленными в составе НПВ Северо-дагестанского артезианского бассейна, являются соединения мышьяка [3]. Это указывают на необходимость разработки целевых технологий водоподготовки, ориентированных, в первую очередь, на очистку от указанного токсиканта вод, перспективных для использования в теплонасосных системах теплоснабжения.

Для многих скважинных вод Тарумовского района отмечены концентрации, заметно превышающие значение ПДК для мышьяка: 50 мкг/дм^3.

Из обследованных нами населенных пунктов Тарумовского района наименее благоприятная ситуация в связи с загрязнением питьевых вод соединениями мышьяка складывается в селах Новогеоргиевка (202 мкг/дм^3) и Новороmановка (215 мкг/дм^3), расположенных на удалении 12 км друг от друга. В три и более раз превышают значение лимитирующего показателя величины концентрации As в НПВ с. Раздолье, с. Калиновка, с. Тарумовка (скв. № 13-Т), кутана колхоза им. К.Маркса (30-й км трассы Кочубей – Артезиан).

Однако наиболее тяжелое положение с обеспечением населения качественной питьевой водой имеет место в селе Таловка и в станице Александро-Невская, в которых во всех скважинных водах содержание мышьяка превышает значение ПДК(As). В этих населенных пунктах Тарумовского района в первую очередь должны быть созданы установки и комплексы для очистки от мышьяка вод, предназначенных для хозяйственно-питьевого водопользования. По нашему мнению в них вполне может быть реализована технологическая схема, апробированная нами для очистки НПВ артезианских скважин Кизлярского района.

По-видимому, наиболее оптимальным решением по предотвращению бесконтрольного затопления и заболачивания территорий может быть создание объектов прудового хозяйства для рыборазведения, в том числе ценных пород

рыбы, создания птицеферм водоплавающей птицы и водоемов для орошения земельных угодий (пастбищное и бахчевое земледелие, садоводство, виноградарство и др.).

Примерами такой организации водопользования служат водоемы с низкопотенциальными артезианскими водами, созданными в населенных пунктах Тарумовского района: с. Новогеоргиевка и ст. Коктюбей (см. рис. 3,4).

Рис. 3. Водоем НПВ (скв. 26-Т) в станице Кокбюбей (Тарумовского р-на, РД).

Рис. 4. Пруд в центре села Новогеоргиевка (Тарумовского р-на, РД).

Таблица 1. - Состав скважинных вод Тарумовского района Республики Дагестан.

№	Район отбора скважинных вод	Сухой ост., мг/л	Жесткость мг-экв/л общая	pH	Cl^-, мг /л	SO_4^{2-}, мг /л	HCO_3^- (CO_3^{2-}) мг /л	Ca^{2+} мг /л	Mg^{2+} мг /л	$Na^+ + K^+$	F^- мг /л	As, мкг/л ПДК,мкг/л
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, август-сентябрь 2009 г.)											
1	с. Калиновка нов скв.	646	0,60	8,06	37,23	30,6	475,8	5,57	3,90	204,5	0,3	> 3
2	с. Калиновка стар. скв.	640	0,97	7,91	21,28	27,5	442,2	8,22	6,81	171,4	0,3	не/опр
3	с. Карабаглы арт у трассы	640	1,00	8,79	25,88	36,6	451,4	8,82	6,81	181,5	1,2	> 2
4	с. Тарумовка централ. скв.	495	1,06	7,76	23,76	38,0	366,0	10,42	6,57	147,2	0,8	> 2
5	с. Тарумовка (лимонад.скв.)	536	0,75	7,99	26,95	42,8	420,9	7,52	4,64	179,4	0,2	> 3
6	с. Раздолье	588	0,82	8,10	25,18	44,8	549,0	4,81	7,08	225,9	0,3	> 3
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, октябрь 2009 г.)											
1	Новогеорг-ское глав.скв.	666	1,04	8,86	85,00	3,65	607,0 (51,0)	7,61	7,53	260,6	1,3	> 1
2	Новогеорг-ское малая скв.	581	1,02	8,04	72,70	38,5	530,7 (30,0)	8,01	7,53	242,2	1,05	> 4
3	Таловка, 2 км от ДК	733	1,18	7,81	30,14	25,9	623,7	10,42	8,01	240,8	0,70	> 3
4	Таловка,налево 1 км от гл. скв	616	1,02	8,19	33,68	19,8	610,0 (18,0)	9,21	6,80	237,8	0,75	> 3
5	Таловка,скв.ДК	733	1,00	8,11	49,64	34,6	579,5 (13,5)	12,02	4,86	244,3	1,02	> 2
6	Новороmановка	604	1,14	8,14	79,78	33,2	570,4 (27,0)	11,62	6,80	256,5	1,20	> 4
7	с.Александро-Невская	715	0,88	7,77	35,46	41,4	469,7	11,62	3,64	200,0	0,62	> 3
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, март 2010 г.)											
2	с.Кочубей, скв. у клуба	737,6	1,00	8,66	30,9	2,45	657,3 (45,8)	6,81	8,03	310	_	> 2
3	с.Кочубей, скв. ул. Степная	676,0	0,66	8,24	33,0	1,34	729,0	5,61	4,62	307,5	_	> 3
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, июнь 2010 г.)											
4	с.Тарумовка, скв № 1-АЗС	551,2	0,92	8,05	28,72	49,9	555,0	12,42	3,65	246,2	1,07	< 1
	скважины Тарумовского района (по результатам экспедиционных работ; ноябрь, 2010 г.)											
11	с.Кочубей, нов.скв.	782,0	0,91	7,21	52,9	0,52	616,0	5,00	7,90	299,0		> 1
12	с. Юрковка	695,6	1,99	8,48	16,1	15,2	878,0	12,6	16,5	368,8		> 1
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, март 2011 г.)											
	с. Алекс.-Невск.											
1	скв у администс	528	0,86	7,90	30,65	44,4	454,4	7,4	5,95	202,0		> 2
2	скв на окр. села	607	0,34	8,34	36,22	40,2	457,5	1,4	3,28	244,8		> 2
	скважинные воды Тарумовского района (по данным экспедиции ИПГ ДНЦ РАН, июнь 2011 г.)											
2	с/х им.Горького скв на окраине	747	0,8	8,24	47,36	23,9	616,1	8,81	4,37	273,5		>1
4	с.Новодмитриев ,скв на ферме	492	1,1	8,01,	52,9	30,6	378,2	7,61	8,75	207,1		> 1
9	на Коктюбей скв. 26-К	744	1,12	7,93	52,9	14,8	976	4,8	10,7	410		> 2
	трасс. на Артезиан											
12	скв на 35-ом км	1075	1,4	8,11	80,8	20,2	1033,9	6,41	13,13	448		> 2
15	скв №2 к. К.Марк	1181	2,0	8,08	64,1	42,8	1070	8,81	18,9	448		> 3
16	скв №3 к. К.Марк	1194	1,78	8,15	150,5	30,6	884,4	8,01	16,58	432		> 2

НПВ Тарумовского района с температурами 20-40^{0}С могут быть использованы в качестве первичного источника тепла в системах теплоснабжения на основе тепловых насосов. В зависимости от мощности теплового насоса и дебита скважины такие системы способны обеспечить теплом как отдельные помещения, дома коттеджного типа, фермерские постройки, так и этажные (административные и производственные) здания, многоквартирные дома, школы, больницы населенных пунктов и поселений района.

Другими интересными направлениями освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов, которые могут быть опробованы и внедрены на скважинах Тарумовского района, являются разработанные в Институте проблем геотермии теплоэнергетические технологии «догретых» низко- и слаботермальных вод в результате теплообмена с водами глубокозалегающих горизонтов. «Догретые» до температур 50-60 ^{0}С эти воды могут быть использованы, например, в системах напольного отопления, а в межотопительный период – для восстановления теплового поля вокруг скважин [1,4].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 02.740.11.0059 от 15.06.2009 г.).

Литература:

1. *Алхасов А.Б.* Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 376 с.
2. *Мирзоев Э.М.-Р., Алишаев М.Г.* Теоретические основы рассоления почв дождеванием и освоение трудномелиорируемых земель Дагестана / Махачкала, 1990 – 168 с.
3. *Каймаразов А.Г., Шабанова З.Э., Камалутдинова И.А., Ахмедов К.М.* Идентификация и количественное определение мышьяксодержащих загрязняющих компонентов низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна // Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010. ИП Овчинников, типография АЛЕФ. С.295-307.
4. *Алхасов А.Б.* Энергоэффективные технологии освоения ВИЭ Дагестана // Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Махачкала, 2010. ИП Овчинников, типография АЛЕФ. С.52-65.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ ИОНОВ МЫШЬЯКА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИРОДНОЙ ГЛИНОЙ

Азизов А.А., Омарова С.О., Исаханова А.Т.

Дагестанский государственный университет; г.Махачкала, Россия, 367025, ул. Батырая 4.

Обсуждаются методические аспекты количественного определения анионов мышьяковых кислот в подземных водах. Показана целесообразность использования термически обработанного природного материала - цеолита в качестве сорбента для решения экологических проблем, связанных с очисткой природных вод от ионов мышьяка.

Ресурсы пресных подземных вод являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения для населения городов и населенных пунктов сельских районов Северного Дагестана. А они содержат в высоких концентрациях мышьяк, который оказывает негативное влияние на состояние здоровья человека, поскольку он является токсикантом, вызывающий повышенную частоту онкозаболеваний и др. [1].

Присутствующий в природных водах он может иметь естественное происхождение (выщелачиваться из различных руд) или техногенное. Неорганические соединения мышьяка содержат его в форме As (V) и As (III).

Имеются различные формы удаления мышьяка, в том числе сорбционные. Применяемый для сорбционного удаления из природных вод активированный уголь отличается высокой стоимостью.

Одним из перспективных направлений в системах очистки природных вод является сорбционная очистка с использованием природных минералов [2]. Основная практическая задача заключается в подборе природных сорбентов, сочетающих невысокую стоимость и достаточную степень очистки.

Для исследования сорбционной способности в работе использовали природный материал – цеолит Левашинского происхождения. Он представляет собой в основном смесь оксидов кремния, алюминия и железа (SiO_2 : Al_2O_3 : Fe_2O_3 = 8 :1 :0,25).

Для оценки возможности использования природного цеолита в технологии обезвреживания и очистки водных растворов от мышьяка была предварительно проведена работа на модельных мышьяк содержащих растворах в статическом режиме. Контролировали остаточную концентрацию мышьяка фотометрическим методом в виде мышьяк-молибденовой сини прямым методом или методом отгонки. При первом методе контроля мешает кремний и фосфор. Они образует комплексы с молибдатом аммония, поэтому необходимо вводить в раствор концентрированную HClO4, которая не дает образоваться комплексному соединению кремния или проводить метод отгонки.

Степень очистки рассчитывали по формуле:

$$A = (C_0 - C_к) \cdot 100 / C_0 ,$$

где: C_0 - начальная концентрация As(V) или As(III); $C_к$ - конечная концентрация As(V) или As(III) в фильтрате.

Были установлены основные параметры, влияющие на процесс очистки от мышьяка, обработанных глиной.

Для сравнения были взяты глины разной активации. Работа проводилась на модельных растворах, содержащих арсенат натрия. Наибольший процент извлечения пятивалентного мышьяка показывает цеолит, обработанный водой и

выдержанный при температуре 200^0С, по сравнению цеолитами, обработанными кислотой или содой. Дальнейшая работа проводилась с цеолитом обработанным водой.

Степень извлечения мышьяка максимальна при использовании цеолита массой 1 грамм и выше.

Очистка растворов от мышьяка также зависит от кислотности раствора. Сорбция ионов мышьяка протекает в основном в слабокислой и нейтральных средах. Очистку от мышьяка предпочтительней проводить в интервале pH 6-8.

Была изучена кинетика сорбции ионов мышьяка на цеолите. Из полученных результатов видно, что основная масса токсиканта на 80-90 % удаляется за первые 20-30 минут.

Изучено также влияние температуры на процесс очистки от мышьяка. Установлено, что процессы очистки хорошо проходят при комнатной температуре. После 30^0С степень извлечения мышьяка начинает заметно снижаться.

Полученные данные свидетельствуют о том, что степень очистки имеет достаточно высокое значение, что говорит об эффективности этой глины для удаления ионов мышьяка из воды.

Оптимальные условия извлечения мышьяка цеолитом использованы для очистки пробы воды скважины №1, расположенной на территории г. Кизляра. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты анализа модельного мышьяксодержащего раствора и воды из скважины города Кизляра (метод отгонки); $m_{гл}$ = 1 г, V = 100 мл, τ =1 час.

№	Объект анализа	Оптическая плотность	С, мг/л
1	Модельный раствор до обработки после обработки	 0,328 0,053	 0,100 0,015
2	Вода из скважины №1 г.Кизляра до обработки после обработки	 0,250 0,030	 0,065 0,010

Общее содержание мышьяка в не загрязненных природных водах составляет 0,001-0,05 мг/л. В загрязненных водах может содержаться от 0,1 до 1 мг/л, в грунтовых – до 0,7 мг/л.

Для анализа была взята вода, содержащая 0,1 мг/л мышьяка (модельный раствор) объемом 100 мл, и такой же объем воды из скважины №1, находящейся на территории города Кизляра, которые были обработаны цеолитом в течение одного часа.

Полученные данные приведены в таблице 1, которые показывают, что остаточная концентрация мышьяка в воде после обработки устанавливается в обоих случаях ниже ПДК [3].

Сравнение степеней извлечения мышьяка показало, что данным цеолитом лучше извлекается пятивалентный мышьяк, а не трехвалентный. Воду обрабатывали цеолитом и одновременно гипохлоритом натрия для окисления трехвалентного мышьяка и перевода его в пятивалентный мышьяк, который лучше извлекается.

Конечный продукт должен быть утилизируем, иначе он будет затратным и нецелесообразным. Так как отработанный цеолит является техногенным продуктом, то необходимо было извлечь из него соединения мышьяка.

Для выщелачивания применили водные растворы едкого натрия (0,01-1 М NaOH). Выявлено, что наиболее подходящей для десорбционной смеси является 0,05 М NaOH. Более 85 % мышьяка, поглощенного цеолитом, было десорбировано менее чем за 1 час.

После удаления мышьяка цеолит можно повторно использовать или в качестве сорбента, или стройматериала.

Литература:

1. Госдоклад о санитарно – эпидемиологической обстановке в РД за 2005 г. Махачкала, 2006.с.8-14.
2. *Шакирова В.В.* Исследование сорбции ионов кадмия природной и модифицированной глиной Астраханской области // Материалы 4-й международной конференции. Астрахань. 2010, с. 177-180.
3. Гост 4.52 – 89. Вода питьевая. Метод определение массовой концентрации мышьяка.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛИТИЯ ИЗ ПРИРОДНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН С РЕШЕНИЕМ НЕКОТОРЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Атаев Д.Р., Рамазанов А.Ш.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Махачкала, Россия; 367030, пр.И.Шамиля, 39а; e-mail: ataev.d@mail.ru, a_ramazanov_@mail.ru

Изучено влияние природы щелочного реагента на сорбционные свойства свежеосажденного аморфного гидроксида алюминия. Установлено, что гидроксид алюминия синтезированный действием гидроксида аммония на хлорид алюминия, обладает более высокой сорбционной активностью по ионам лития, и полученный литий алюминиевый концентрат обладает улучшенными седиментационными и фильтрационными характеристиками. Предложена технологическая схема, предусматривающая очистку природной воды от ионов Fe, Mg, органических веществ, и извлечение лития в виде товарной продукции.

Известно, что природные воды Дагестана, которые в больших количествах (несколько млн. кубов в год) попутно добывают с нефтью и сбрасываются на поля фильтрации (Южно-Сухокумское, Махачкала-Таркинское месторождения) из-за высокой минерализации, повышенного содержания токсичных неорганических и органических ингредиентов, представляют реальную угрозу для окружающей среды. Поэтому, в современных экологических условиях, утилизация этих вод является вынужденной и актуальной проблемой, в процессе решения которой разрабатываются многие важные вопросы освоения природных вод как ценного гидроминерального сырья [1]. Воды республики Дагестан, относящиеся к хлоридно-натриево-кальциевому типу, оценены как перспективный источник Li, Na, Rb, Cs, Mg, Sr, Br, I и B.

При переработке природной воды возникает необходимость в очистке воды от катионов Fe, Mg. Удаление этих катионов из воды можно осуществить термическим, ионообменным и реагентным методами [2]. Наиболее приемлемым для природной воды является последний, так как он применим к водам с любой жесткостью и солевым фоном. В нашем случае в качестве реагента-осадителя используется гидроксид натрия. Осаждение выше перечисленных катионов происходит при pH 10,5-11,0, после чего методом фильтрации осадок отделяется от жидкой фазы. Параллельно с этими компонентами извлекаются и органические вещества, что приводит к еще большей степени очистки природной воды.

Для извлечения лития из природной воды разработана методика, в основе которой лежит хемосорбция лития аморфным гидроксидом алюминия, что сопровождается образованием мало растворимого соединения лития и алюминия с общей формулой [3, 4]:

$$Li_n x * 2n Al(OH)_3 * m H_2O,$$

где x- OH^-, Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-} и др.

На хемосорбцию лития аморфным гидроксидом алюминия оказывает влияние pH, температура, природа и концентрация фонового электролита [5].

В качестве щелочных реагентов, для получения аморфного гидроксида алюминия использованы гидроксиды натрия, аммония и кальция. Сорбция лития осуществлялась в реакторе с мешалкой при температуре 293 ^oC, при pH 8,5 – 9,5 (рис.1). При этом навеска свежеосажденного ГОА вводилась в 1,5 л природной воды из расчета обеспечения в реакционной среде мольного отношения Li^+ к Al^{3+} равного 1:2, с последующим отделением осадка и промывкой его дистиллированной водой в отношении Т:Ж 1:5.

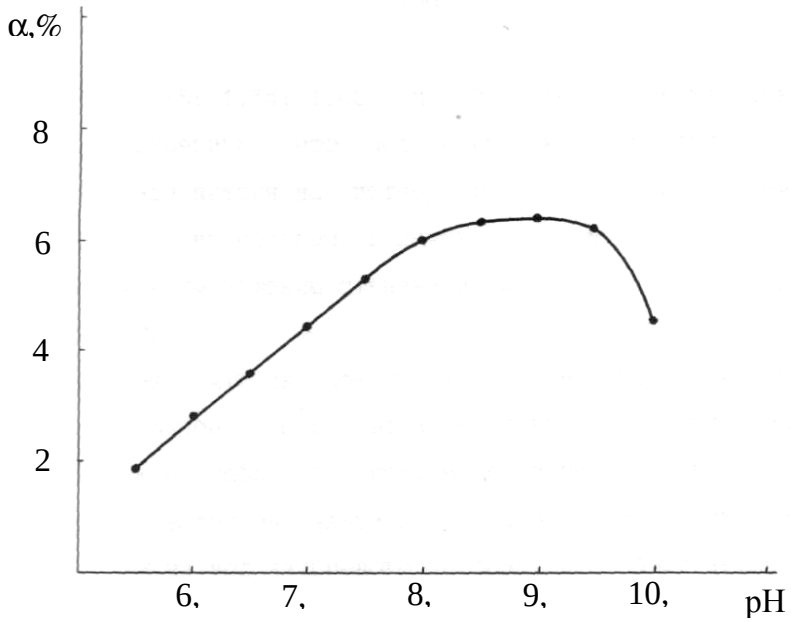


Рис. 1. Зависимость степени сорбции лития аморфным $Al(OH)_3$ из 1,5 М раствора NaCl от pH.

Установлено, что степень извлечения лития выше, при использовании гидроксида натрия и аммония для получения аморфного гидроксида алюминия, что может быть обусловлено более высокой скоростью установки оптимального значения pH, равного 8,5 – 9,5. По-видимому, высокая степень извлечения ионов лития в случае быстрой установки оптимального значения pH можно объяснить образованием гидроксида алюминия менее упорядоченного строения, с большой активной поверхностью, структурные особенности которого обеспечивает повышенную сорбционную ёмкость по ионам лития [6].

В связи с наблюдением более высокой степени извлечения лития при использовании для синтеза сорбента гидроксидов натрия и аммония, дальнейшие исследования по получению литий алюминиевых концентратов (ЛАК) проводили использованием этих реагентов. Выявлено, что средняя скорость седиментации ЛАК полученного действием гидроксида аммония на раствор хлорида алюминия в 5-6 раза больше, чем у концентрата полученного действием гидроксида натрия. При этом объем конечного отстоя (рис. 2) осадка ЛАК полученного действием гидроксида аммония составляет 5,6 %, а гидроксида натрия 16,7 % от общего объема суспензии.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что ЛАК полученный использованием гидроксида аммония менее обводнен захватом маточного раствора и соответственно более обогащен литием. Так полное высушивание ЛАК, полученных действием гидроксидов аммония и натрия, наступает за 1,5 и 6 часов соответственно при 105 ^{0}C. Содержание лития в ЛАК полученном с использованием гидроксида аммония составляет 15,8 мг/г, против с 9,1 мг/г при использовании щелочи натрия.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что ЛАК, полученный при использовании в качестве щелочного реагента гидроксида аммония, имеет лучшие технологические характеристики.

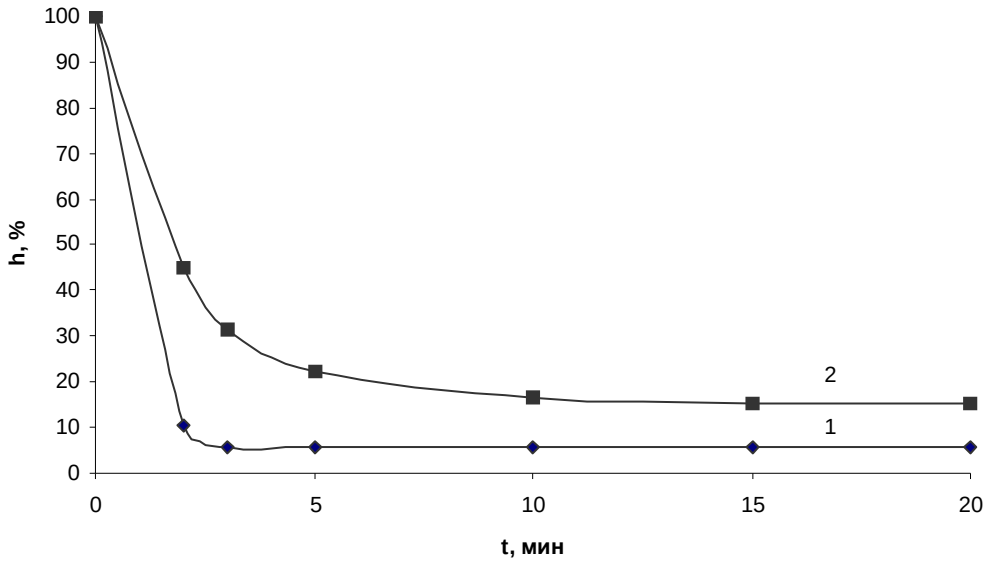


Рис. 2. Зависимость скорости седиментации ЛАК от выбора реагента осадителя:
1 - гидроксид аммония; 2 - гидроксид натрия.

Предложена технологическая схема, согласно которой природная вода очищается от ионов Fe, Mg и органических веществ, литий извлекается в виде товарной продукции, очищенный раствор хлорида натрия может быть использован для получения поваренной соли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-03-96506-р_юг_а) и Минобрнауки (госконтракт № 14.740.11.0803).

Литература:

1. *Рамазанов А.Ш.* Химико – технологические проблемы комплексного использования геотермальных вод Дагестана // Стандартизация геотермических исследований в тектонических активных районах. Махачкала, 1987. –С. 164-168.
2. Комплексная переработка минеральных вод. - Киев: Наук. думка, 1984.-284 с.
3. *Frenkel M., Glasner A., Sarig S.* Crystal modification of freshly precipitated aluminium hydroxide by lithium ion intercalation // J. Phys. Chem. – 1980. – 84. – P. 507 – 510.
4. *Данилов В. П., Лепешков И.Н.* Двойные гидроксосоединения алюминия с одно и двух валентными металлами // Xll Менделеевский съезд по общей и прикладной химии : Неорганическая химия и технология неорганических веществ. – М. Наука, 1981. – С.29.
5. *Рамазанов А.Ш.* Закономерности хемосорбции ионов лития аморфным гидроксидом алюминия из хлоридных вод // Химия и технология воды. 1991. – 13, №2. – С.141 – 145.
6. *Атаев Д.Р., Рамазанов А.Ш.* Зависимость степени извлечения ионов лития из геотермальной воды от способа синтеза аморфного гидроксида алюминия // IV Международная конференция: Фундаментальные и прикладные проблемы получения новых материалов: исследования, инновации и технологию, г. Астрахань 2010 г. – С.182 – 184.

ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ СЕРОВОДОРОДА В ПРИРОДНОЙ ВОДЕ

Гусейнов У.М.[1], Омарова З.М.[2], Гусейнов М.А.[2]

[1] Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Россия, 367030, г.Махачкала, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: ullubiy73@mail.ru
[2]Дагестанский Государственный университет; Россия, 367025, г.Махачкала, ул. М.Гаджиева, 43а

Приведен анализ известных методов очистки природных и сточных вод от сероводорода. Изложены принципы фотоэлектрохимического метода обезвреживания вредных органических веществ, апробированного на кафедре экологической химии и технологии химфака ДГУ.
Обсуждаются результаты исследования возможности использования фотоэлектрохимического метода для окисления сероводорода в природных водах, в качестве которых были опробованы геотермальные воды Талгинского месторождения. Экспериментально установлены оптимальные режимы окисления сероводорода (плотность тока, продолжительность процесса) до состояния элементной серы. В сериях опытов достигнуты степень очистки 90,6% и остаточное содержание сероводорода: 1,8 мг/дм^3, что позволяет рекомендовать метод для предочистки различных типов вод от указанного загрязнителя.

Подземные и поверхностные сероводородные воды могут быть использованы в бальнеотехнике, для водоснабжения населенных мест, производственных предприятий и сельского хозяйства для теплофикации, при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и т.д.

При использовании сероводородных вод для тех или иных целей к ним предъявляются различные требования. Так, при использовании сероводородных вод для лечения наличие в них сероводорода и повышенная минерализация расцениваются как положительные факторы, а в случае использования тех же вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении необходимо отсутствие в них сероводорода и регламентация общей минерализации и т.д.

Сравнительно широкое применение природные сероводородные воды получили в курортной практике водолечения (Мацеста, Горячий Ключ, Ейск, Пятигорск, Талги, Кемери, Любен Великий, Чаплинский источник на Чукотке, Хилово и др.).

По физико-химическим и биологическим свойствам многие подземные сероводородные воды могут быть отнесены к категории лечебных минеральных вод. В практике курортно-санаторного лечения природные сероводородные воды чаще всего применяются в виде ванн. С помощью минеральных сероводородных вод в санаторно-курортной практике достаточно успешно ведется лечение болезней суставов, костей и мышц, артритов, полиартритов, нервной системы, сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения и др. Поэтому имеется перспектива дальнейшего» использования сероводородных вод для лечебных целей при условии высокоэффективной очистки и обеззараживания сточных вод, образующихся в достаточно больших количествах в водолечебницах.

Наличие определенного количества сероводорода в воде придает ей неприятный запах и привкус, вызывает коррозию металлических трубопроводов, способствует развитию серобактерий, которые стесняют сечение труб и загрязняют воду, наконец, в определенных количествах сероводород может оказывать отрицательное действие на состояние здоровья человека и животного. Следовательно, сероводород допустим в хозяйственно-питьевой воде в крайне

малых количествах. И все же в ряде районов из-за отсутствия других удовлетворительных водоисточников для водоснабжения населенных мест используют сероводородные воды.

К воде, применяемой в пищевой промышленности, предъявляются те же требования, что и к хозяйственно-питьевой, однако имеются отдельные производства, в которых сероводород может оказывать и положительные воздействия на ход технологического процесса. Так, например, при производстве спирта сероводород в воде в небольших количествах действует как антисептик, способствует чистоте брожения, понижает видимый отброд, в результате чего повышается выход спирта.

Результаты исследований по интенсификации существующих и разработке новых высокоэффективных методов и технологий очистки и обеззараживания природных и сточных сероводородных вод позволяют значительно расширить область их рационального использования для хозяйственно-питьевого и производственного водоснабжения.

Весьма перспективным является, расширение масштабов использования термальных подземных вод, в том числе и сероводородных, для теплофикации. Известно, что в таких странах, как Италия, Исландия, Новая Зеландия, Япония и др., тепло подземных вод широко применяется для теплофикации и других целей.

Природные сероводородные воды в ряде случаев могут быть использованы при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых для целей гидротранспорта и др.

Актуально стоит вопрос об изыскании новых нетрадиционных топливно-энергетических ресурсов. В глубоководных слоях сероводородной зоны Черного моря содержатся в значительных количествах такие газы, как сероводород, аммиак и метан. Эти газы с точки зрения специалистов-энергетиков рассматриваются в настоящее время как новые, нетрадиционные, возобновляемые топливно-энергетические ресурсы. Комплексное использование глубинных вод сероводородной зоны Черного моря позволит в недалеком будущем решить ряд важнейших народнохозяйственных задач:

- получение дополнительной тепловой и электрической энергии путем сжигания на специальных установках сероводорода и других горючих газов, извлеченных из морской воды;
- получение дешевой товарной серы, являющейся продуктом, сопутствующим процессу сжигания сероводорода;
- получение из морской воды дефицитных бактерицидных реагентов; электролитического гипохлорита, йода и брома, а также ряда цветных металлов и химического сырья, широко используемого в промышленности;
- обеспечение мероприятий по экологической защите и увеличению биологической продуктивности Черного моря в связи с извлечением из морской воды сероводорода и его утилизацией;
- утилизация морской воды для различных целей водопользования (устройство плавательных бассейнов, водолечебниц, благоустройство территорий и др.).

Наконец, наличие и использование надежных, высокоэффективных методов обработки и утилизации сероводородсодержащих сточных вод на ряде производств позволит осуществить оборотные, безотходные системы производственного водоснабжения, получить экологический и экономический эффекты, снизить стоимость выпускаемой продукции.

В литературе известны различные методы очистки природных вод от сероводорода [1,2]. Известны также исследования сотрудников кафедры экологической химии и технологии Даггосуниверситета по обезвреживанию фотоэлектрохимическим методом азокрасителей [3, 4].

Настоящая работа посвящена исследованию возможности окисления сероводорода в природной воде фотоэлектрохимическим методом.

Объектом исследования является геотермальная вода Талгинского месторождения.

По известной методике [5,6] определяли исходную концентрацию сероводорода в исследуемой воде. Она составила 16.6мг/л. Обезвреживание сероводорода проводили фотоэлектрохимическим методом на специальной установке – фотоэлектролизере (рис.1) с лампой дневного освещения. Исследовали зависимость степени обезвреживания сероводорода от продолжительности фотоэлектролиза. В качестве ячейки в работе использовалась фторопластовая емкость объемом 0,2 дм^3.

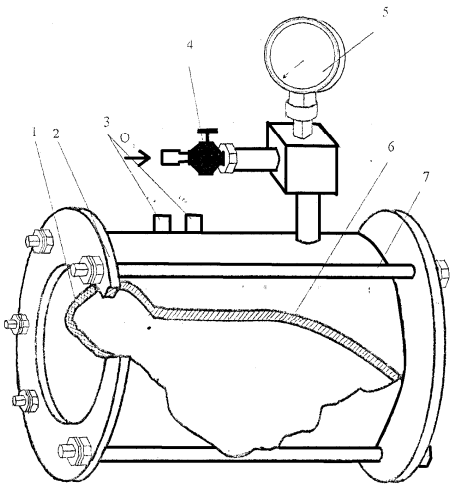


Рис. 1. Ячейка для фотоэлектрохимического окисления сероводорода.
1. кварцевое стекло; 2. бронзовая обечайка; 3. электроды; 5. манометр; 6. фторопластовая емкость; 7. болт.

Для фотоэлектролиза ячейку собирали с электродами Ti/TiO_2 в качестве фотоанода и платины – в качестве катода. Электроды замыкались во внешней цепи, и фотоэлектролиз протекал за счет генерирования фототока при облучении электродов путем небольшого дополнительного напряжения на электроды.

На аноде протекает процесс окисления воды с образованием газообразного кислорода по схеме:

$$2H_2O - 4\bar{e} \rightarrow O_2 + 4H^+,$$

который и окисляет растворенный в воде сероводород с образованием мелкодисперсной коллоидной серы:

$$2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O.$$

Исследовали зависимость степени обеззараживания сероводорода от плотности тока (при токе 0,001А/см^2 и 0,002А/см^2) и продолжительности фотоэлектролиза в интервале от 20 до 120 мин. Результаты экспериментов приведены на рисунке 2.

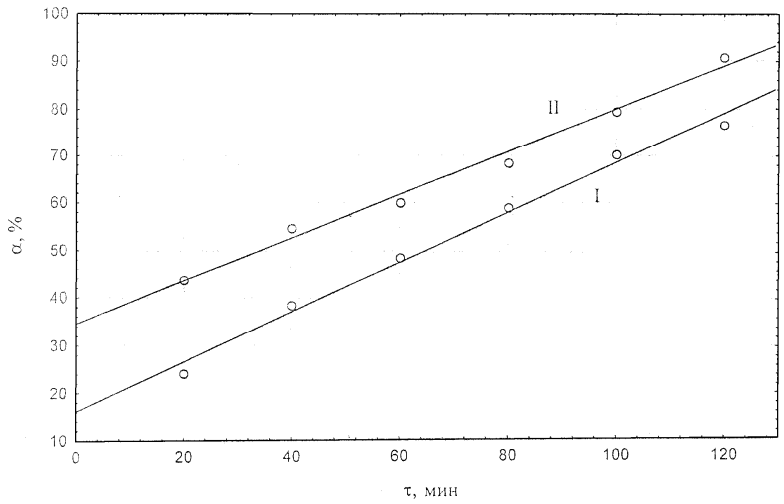


Рис. 2. Зависимость степени очистки воды от продолжительности облучения при плотности тока (А/см^2): I – 0,001; II – 0,002.

Из полученных данных видно что степень очистки воды от сероводорода увеличивается от продолжительности фотоэлектролиза в интервале 20-120 мин: от 24,2% до 76,5% при плотности тока 0,001А/см^2; и от 43,9% до 90,6%, при плотности тока 0,002 А/см^2.

Литература:

1. *Линевич С.Н.* Комплексная обработка и рациональное использование сероводородсодержащих природных и сточных вод. – М..: Строй-издатель. 1987 г.-88 с.
2. *Линевич С.Н.* Очистка природных и сточных сероводородных вод: (Учеб, пособие). – Новочеркасск. 1979. – 49 с.
3. *Адамадзиева Н.К., Алиев З.М., Исаев А.Б.* Фотоэлектрохимическое обезвреживание водных растворов азокрасителей и присутствие растворенного кислорода // Сборник докладов XXXIV Международной конференции «Информационные технологии в науке, образование, в телекоммуникации и бизнесе», Ялта, 2007. С.10-11.
4. *Алиев З.М., Исаев А.Б., Адамадзиева Н.К., Харламова Т.А.* Фотоэлектрохимическое окисление азокрасителей под давлением кислорода // Новости электрохимии органических соединений 2010. XVII Всероссийское совещание по электрохимии органических соединений с международным участием: тез. Докл. // ред. кол. В.П. Гультей, А.Б. Климник, А.Г. Кривенко. – Тамбов: Изд. ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. С.150-151.
5. *Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю.* Методы анализа природных вод.
6. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. Москва 1973.

О ВЛИЯНИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НА ОТЛОЖЕНИЕ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ НА ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Мамаева А.С., Ахмедов Г.Я.

Дагестанский государственный технический университет,
367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, просп. Шамиля, д. 70

Опыт эксплуатации геотермальных энергетических установок свидетельствует о том, что снижение надежности оборудования обусловлено, главным образом, разрушением конструкционных материалов под действием геотермального теплоносителя и образованием твердых отложений в элементах технологических схем, около половины всех повреждений вызвано коррозией и примерно пятая часть отложениями солей [1]. Образование небольшого (1 ÷ 4 мм) слоя отложений на поверхности теплообмена резко снижает коэффициент теплопередачи [2].

Исследования, проведенные в работах [2, 3], свидетельствуют о существенном влиянии температуры стенки теплообменной поверхности на формирование на ней отложений твердой фазы карбоната кальция $CaCO_3$. На основе этих исследований предлагаются устройства, в которых отсутствуют отложения $CaCO_3$ и в то же время отсутствуют потери, связанные с охлаждением стенки.

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 *а* показано распределение толщины отложений на внутренней поверхности внутренней трубы теплообменника при отсутствии вторичного теплоносителя – водопроводной воды. Отложения карбоната кальция равномерно распределены вдоль всей поверхности. С теплообменом (рис.1 *б*), то есть при наличии вторичного теплоносителя, проходящего противотоком через второй контур теплообменника, отложения распределяются неравномерно.

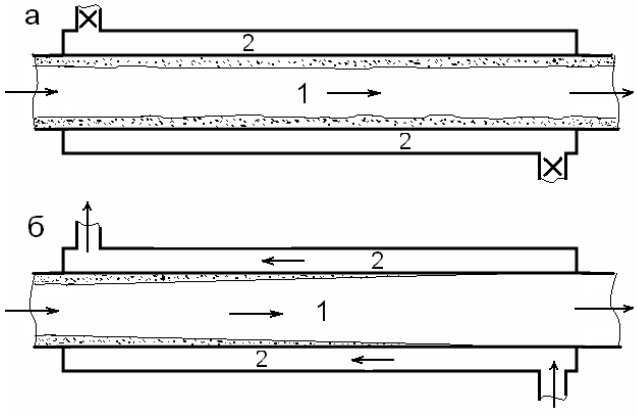


Рис. 1. Распределение отложений по длине теплообменника.

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.

Как известно, в присутствии углекислого газа CO_2 в геотермальной воде $CaCO_3$ растворяется в виде бикарбоната кальция

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca(HCO_3)_2.$$

При выходе на поверхность Земли парциальное давление CO_2 уменьшается и углекислотное равновесие в воде нарушается. Реакция смещается влево с образованием твердой фазы карбоната кальция. С другой стороны, при неизменном значении парциального давления углекислого газа в воде растворимость $CaCO_3$ растет с уменьшением температуры воды. При этом скорость кристаллизации $CaCO_3$ зависит от парциального давления углекислого газа и температуры **t** данного раствора. Установлено, что для каждой скважины существует линия равновесных значений общего давления **P** и температуры **t** геотермальной воды, при которых она не выделяет и не растворяет твердую фазу карбоната кальция [4]. Так, наблюдения показывают, что эксплуатация геотермального оборудования при значениях **P** и **t**, соответствующих значениям ниже равновесной линии, будет сопровождаться отложениями карбоната кальция. При этом, чем ниже будет расположена эта точка от равновесной линии, тем интенсивнее идут отложения.

С учетом того, что скорость кристаллизации пропорциональна общему пересыщению ($C-C_s$) по карбонату кальция, а C_s (равновесная концентрация для данной температуры) увеличивается с уменьшением температуры, снижение температуры стенки приводит к снижению скорости кристаллизации вплоть до полного отсутствия отложений при $C \le C_s$ (C – концентрация солеобразующего компонента в растворе) [5]. В связи с этим представляет практический интерес изменение распределения температуры стенки теплообменной поверхности при изменении коэффициента теплоотдачи в контурах теплообменника.

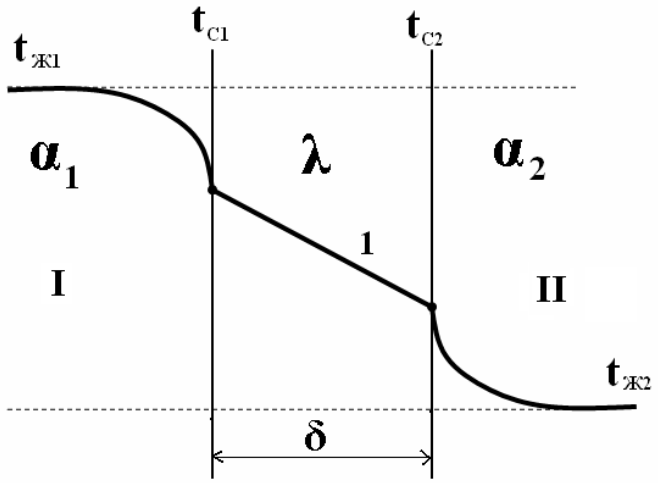


Рис. 2. Распределение температуры в окрестности стенки теплообмена.

Так, распределение температуры в окрестности стенки внутренней трубы, разделяющей геотермальную и водопроводную воду, показано на рис.2. При условии, что толщина стенки δ трубы намного меньше ее диаметра d, поверхность теплообмена можно принять за плоскую стенку. Тогда тепловые потоки от жидкости 1 к стенке1, от стенки 1 к стенке 2 и от стенки 2 к жидкости 2 можно написать соответственно в следующем виде

$$Q_1 = \alpha_1 (t_{Æ1} - t_{Ñ1}) F \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{\lambda}{\delta} (t_{Ñ1} - t_{Ñ2}) F \quad (2)$$

$$Q_3 = \alpha_2 (t_{Ñ2} - t_{Æ2}) F \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно в первом и во втором контуре; λ – теплопроводность стенки; δ – толщина теплообменной стенки, м; F – усредненная величина площади поверхности теплообмена; $t_{Ж1}$, $t_{Ж2}$, t_{C1}, t_{C2} – температура соответственно жидкости 1, жидкости 2, стенки 1 и стенки 2. В стационарном режиме теплообмена

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (4)$$

Совместное решение уравнений (1), (2), (3) позволяет найти температуру стенки теплообмена со стороны геотермальной воды, как в начале теплообменной поверхности, так и в конце

$$t_{Ñ1} = t_{Æ1} - \frac{1}{\alpha_1} \frac{t_{Æ1} - t_{Æ2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad . \quad (5)$$

Сопоставляя температуру стенки теплообмена при данном давлении в теплообменнике с равновесной температурой раствора воды, можно оценить склонность ее к отложениям карбоната кальция.

Естественно, что такое состояние теплообменника не может сохраниться как при суточной, так и при сезонной его эксплуатации. Изменение расхода теплоносителей в контурах теплообменника приводит к изменению коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2, что влечет за собой, как видно из (5), изменение температуры стенок теплообмена. При определенных условиях это может привести к образованию отложений на теплообменной поверхности. Часто на практике, как в традиционной, так и в возобновляемой энергетике такие перемены при эксплуатации различного теплообменного оборудования, к сожалению, не учитываются.

При интенсификации теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплоотдачи α_1 в первичном контуре (за счет турбулизации потока, то есть увеличения числа Рейнольдса) происходит следующее (рис.3). Линия распределения (линия 1) температуры в окрестности теплообменной стенки смещается вверх (линия 2). Несмотря на некоторое уменьшение температурного напора $t_{Æ1} - t_{Ñ1}$ тепловой поток Q_1 растет за счет увеличения коэффициента α_1. В то же время, учитывая (4), увеличение Q_2 объясняется увеличением только температурного градиента $(t_{Ñ1} - t_{Ñ2})/\delta$, т.к. остальные величины согласно уравнению (2) не меняются, а тепловой поток Q_3 растет только за счет увеличения температурного напора $t_{Ñ2} - t_{Æ2}$, т.к. коэффициент α_2 и площадь поверхности F не меняются. При этом изменившуюся температуру стенки 1 можно вычислить также по формуле (5). Как видно на рис. 3, при интенсификации теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплоотдачи

α_1 температура стенки 1 увеличилась. Увеличение температуры вблизи стенки 1 снижает растворимость углекислого газа в воде и уменьшает растворимость $CaCO_3$ в виде бикарбоната кальция, вследствие чего при $C \leq C_s$ возможны отложения $CaCO_3$ на этой стенке.

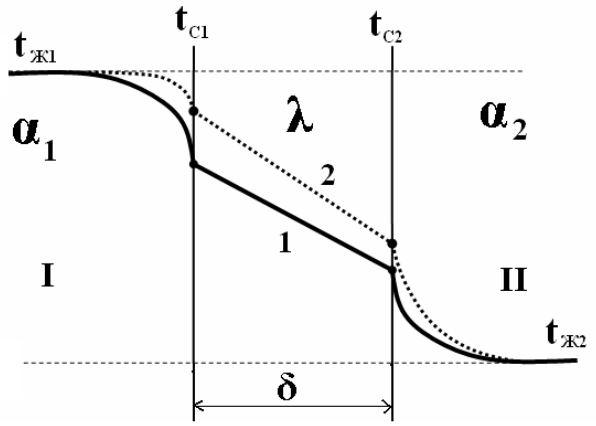


Рис. 3. Изменение распределения температуры в окрестности стенки внутренней трубы теплообменника при увеличении коэффициента теплоотдачи в контуре с геотермальной водой.

При интенсификации теплопередачи за счет увеличения коэффициента теплоотдачи α_2 во вторичном контуре (рис. 4) линия распределения (линия 1) температуры в окрестности теплообменной стенки смещается вниз (линия 2).

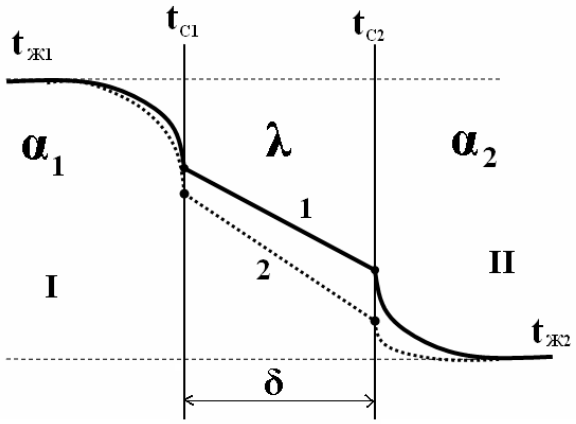


Рис. 4. Изменение распределения температуры в окрестности стенки внутренней трубы теплообменника при увеличении коэффициента теплоотдачи в контуре с нагреваемой водой.

Несмотря на некоторое уменьшение температурного напора $t_{Ñ2} - t_{Æ2}$ тепловой поток Q_3 растет за счет увеличения коэффициента α_2**.** В то же время рост Q_2 объясняется, как было описано выше, также только увеличением температурного градиента $(t_{Ñ1} - t_{Ñ2})/\delta$. Соответственно тепловой поток Q_1 растет за счет увеличения температурного напора $t_{Æ1} - t_{Ñ1}$, т.к. остальные величины согласно уравнению (1) не меняются. В данном случае, как видно из рис. 4, температура стенки 1 уменьшается, что влечет за собой увеличение растворимости $CaCO_3$. Если при этом концентрация $CaCO_3$ в растворе воды при температуре вблизи стенки1 равна или меньше концентрации насыщения, то кристаллизации карбоната кальция на этой стенке не будет.

В последнее время исследователей привлекает использование в геотермальной энергетике внутрискважинных теплообменников типа «труба в трубе», устанавливаемых в верхней части добычных или нагнетательных скважин. Они проще в исполнении, надежны в эксплуатации, капитальные затраты, связанные с их обустройством, не превышают затрат по изготовлению пластинчатых или кожухотрубных теплообменников. Экономическая целесообразность использования внутрискважинных теплообменников связана, прежде всего, с их массогабаритными и тепловыми характеристиками. Одним из способов решения данной задачи является интенсификация теплообмена за счет продольного оребрения теплообменной поверхности.

Оребрение теплообменной поверхности внутрискважинных теплообменников со стороны нагреваемой воды продольными ребрами позволяет увеличить площадь теплопередающей поверхности, вследствие чего растет общий тепловой поток от греющего теплоносителя к нагреваемому теплоносителю, циркулирующему за внешней оребренной поверхностью в коаксиальном зазоре теплообменника [6].

При интенсификации теплопередачи теплообменной поверхности стенки 2 за счет ее оребрения (рис.5, поз 3) увеличение теплового потока Q_3 согласно уравнению (3) происходит за счет увеличения площади F теплообменной поверхности.

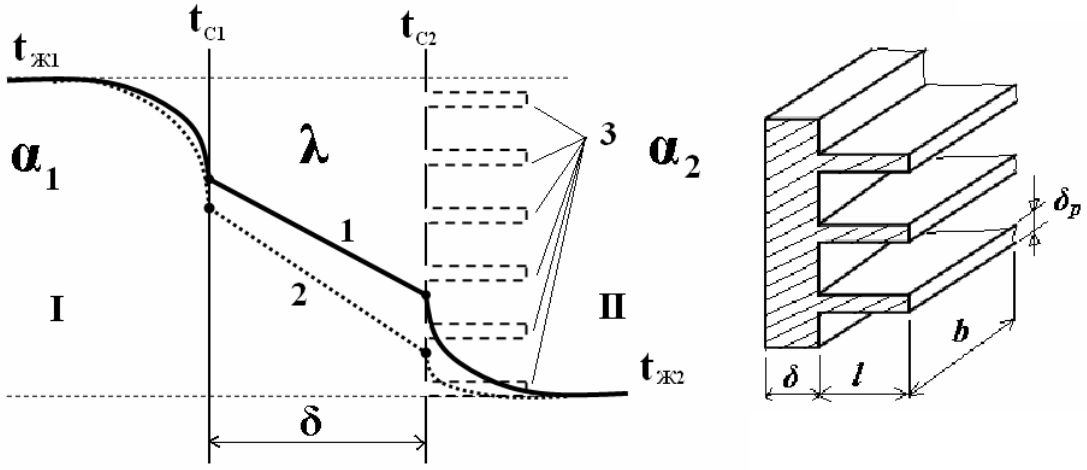


Рис. 5. Изменение распределения температуры в окрестности стенки внутренней трубы теплообменника при оребрении теплообменной поверхности в контуре с нагреваемой водой.

При этом коэффициент теплоотдачи со стороны оребренной поверхности $\alpha_2^{!}$ может быть рассчитан по следующей формуле [7]

$$\alpha_2^{!} = \alpha_{i} \left(1 + \frac{\alpha_{\delta}}{\alpha_{i}} E \frac{F_{op} - F}{F}\right), \qquad (6)$$

где $E = (t_p - t_{Æ2})/(t_{Ñ2} - t_{Æ2})$ - коэффициент эффективности ребра; t_p - средняя температура поверхности ребра; F_{op} - суммарная площадь оребренной поверхности стенки; F –площадь гладкой поверхности стенки; α_p – коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер; α_n – коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности стенки в промежутках между ребрами.

Для приближенных оценок можно полагать $\alpha_{ð} = \alpha_{ï} = \alpha_2$ и $E \approx 1$, тогда $\alpha_2^{!} = \alpha_2 \, \varepsilon_{ð}$, где $\varepsilon_{ð} = F_{op} / F \geq 1$ - коэффициент оребрения.

В данном случае $\boldsymbol{Q_1}$ и $\boldsymbol{Q_2}$ растут за счет роста температурного напора и градиента температуры соответственно. Снижение температуры стенки 1 увеличивает растворимость $CaCO_3$, что создает условия либо для снижения скорости кристаллизации $CaCO_3$, либо для ее полного прекращения.

Литература:

1. *Семенов В.Н.* Исследование поведения примесей многокомпонентного теплоносителя в тракте геотермальной электростанции // Теплоэнергетика.- №3.- 2006.- С. 17 – 22.
2. *Ахмедов Г.Я.* Работа геотермальных систем теплоснабжения в режиме без солеотложения//Промышленная энергетика.- №6.- 2010.- С. 54 - 59
3. *Ахмедов Г.Я.* Защита геотермальных систем водоподготовки от карбонатных отложений//Энергосбережение и водоподготовка.- № 6.- 2010.- С. 18 - 21
4. *Ахмедов Г.Я.* Проблемы солеотложения при использовании геотермальных вод для горячего тепловодоснабжения // Промышленная энергетика.- № 9.- 2009.- С. 50 - 54
5. *Ахмедов Г. Я.* Кинетика роста отложений карбоната кальция в геотермальных системах // Теплоэнергетика.- № 11.- 2009.- С. 13 -17
6. *Алхасова Д.А.* Исследование и гидродинамические расчеты внутрискважинных теплообменников с продольными ребрами. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд .техн. наук. Махачкала, 2009.
7. 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.

СОСТОЯНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ДАГЕСТАНЕ

Мкртумян А.В., Магомедов А.М.

Дагестанский государственный университета, Россия, 367025 г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д.43а, e-mail: abuk09@rambler.ru

Актуальность предлагаемой работы заключается в том, что в данный период развития человечества возникла необходимость в поиске новых энергоресурсов, способных удовлетворить потребности в энергии. К таковым относится солнечная энергия, основным преимуществом которой является её неисчерпаемость и экологичность. В связи с этим нужно провести анализ проблемы и предоставить потенциальным потребителям и разработчикам объективную информацию о реальных возможностях использования солнечной энергетики.

Дагестан, на сегодняшний день, имеет большой опыт по использованию нетрадиционной энергетики. При этом, несмотря на продолжительный опыт применения альтернативных энергоисточников в регионе, большинство существующих систем продолжает оставаться на стадии теоретических разработок.

В настоящее время можно выделить следующие технологии в области альтернативной энергетики, которые уже экономически целесообразно применять на практике:

– малые и микро-ГЭС – сооружение объектов малой и микрогидроэнергетики возможно практически во всех районах Дагестана, обладающих достаточными гидроэнергетическими ресурсами;
– солнечное отопление и горячее водоснабжение, их применение возможно практически на всей территории страны;
– геотермальные станции для теплоснабжения населенных пунктов;
– установки по энергетическому использованию биомассы на объектах деревообрабатывающей промышленности, в колхозах и частных хозяйствах;
– малые ветроэлектрические установки, которые могут быть использованы как в автономных энергосистемах, так и в составе гибридных ветро-дизельных или ветро-солнечных систем электроснабжения;
– фотоэлектрические станции для электроснабжения маломощных объектов и отдельных домов.

Такие технологии готовы к коммерческому внедрению и требуют для своего дальнейшего развития государственной поддержки. Основными потребителями продукции альтернативной энергетики являются:

– зоны с дефицитом энергосистем;
– зоны децентрализованного энергоснабжения;
– зоны неустойчивого энергоснабжения;
– владельцы загородной недвижимости, туристы.

Проблема дефицита энергосистем является актуальной сегодня для всей территории России.

Альтернативная энергетика способна разрешить данные сложности с обеспечением энергией.

В связи с тем, что стоимость 1 кВт установленной мощности альтернативной энергоустановки на сегодняшний день дороже, традиционной,

экономически целесообразным является их строительство в регионах, где без них невозможно разрешить проблему энергообеспечения.

Энергию, получаемую от ВИЭ, возможно использовать как для энергоснабжения удаленных от сетей централизованного электроснабжения автономных объектов, так и путем продажи ее в единую энергосистему.

При этом в первом случае экономическая эффективность может быть гораздо выше, чем строительство линий электропередач (ЛЭП), особенно в регионах с малой плотностью нагрузки. Более того, в последнее время наметилась тенденция сворачивания сетей централизованного электроснабжения в таких районах, потому что обслуживание и охрана протяженных и зачастую изношенных ЛЭП не выгодны для местных энергоснабжающих организаций. В таких условиях применение энергоустановок на базе ВИЭ является единственной альтернативой жидкотопливным генераторам.

В нашем регионе огромная часть территории находится вне централизованной системы энергоснабжения. В этой связи использование местных возобновляемых энергоресурсов позволит экономить существенные количества жидкого и твердого топлива, которые необходимо туда доставлять для обеспечения жизнедеятельности.

В удаленных регионах практически везде имеются достаточные ресурсы ВИЭ (ветра, малых рек, Солнца, биомассы и др.) для энергоснабжения маломощных, преимущественно сельскохозяйственных потребителей с плотностью электрической загрузки от 0,5 до 70 кВт/км2.

Примерно 20 % потребности в тепловой и электрической энергии владельцев садово-огородных участков можно покрывать за счет возобновляемых источников. Потребность в электроэнергии таких потребителей невелика – 1,5-2 кВт. Ее можно удовлетворить за счет небольших индивидуальных установок. В эту группу можно также включить туристов, охотников, пчеловодов, отдаленные технические службы наблюдения и связи. К выделенным сегментам потребителей можно прибавить поселения со сложной экологической ситуацией. Посредством альтернативной энергетики будут также решаться вопросы замены органического топлива.

В расчетной части данной работы мы использовали альтернативную энергию двух видов: солнечную и энергию ветра. Ниже приведены таблицы с усредненными данными за пятилетний период.

Солнечные характеристики метеорологической станции «Махачкала» (данные взяты в метеоцентре Республики Дагестан за 2003-2008 годы; широта местности 43º).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Продолжительность солнечного сияния (в часах)	69	73	112	178	243	246	286	272	202	156	87	68	1992
Среднемесячная температура воздуха, ºС	-2,2	-1,4	5,6	11,9	18,3	24,4	27,5	25,6	20,7	17,6	9,8	3,3	13,1
Уровни радиации на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2 (W)	79	79	106	146	186	211	210	188	145	100	60	50	1544

Как видно из приведенных данных, в целом регион обладает потенциалом достаточным для того, чтобы использование нетрадиционных источников энергии было целесообразным.

Проектов по использованию солнечной энергии для получения электричества в Дагестане единицы, ниже приведены небольшие локальные проекты. Общая установленная мощность солнечных электросистем составляет около 35 кВт.

Солнечные характеристики высокогорной метеорологической станции «Гуниб» (данные взяты в метеоцентре Республики Дагестан за 2003-2008 годы; широта местности 42º).

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Продолжительность солнечного сияния (в часах)	142	143	169	185	214	219	222	228	198	186	143	128	2177
Среднемесячная температура воздуха, ºС	-9,2	-3,4	1,6	10,9	17,3	23,4	25,5	24,6	19,7	15,6	8,8	2,3	11,3
Уровни радиации на горизонтальную поверхность, кВт·ч/м^2 (W)	70,5	95,5	150,9	143,3	179,4	222,1	199,2	192,2	150,3	103,7	71,0	62,9	1625

Средняя скорость ветра по месяцам за многолетний период (данные взяты в метеоцентре Республики Дагестан за 2003-2008 годы)

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
Скор. ветра	6,23	6,45	6,55	6,83	5,95	5,45	5,23	5,6	5,55	5,9	6,6	6,2	6,0

Наибольшее число проектов в области фотоэнергетики реализовано компанией ООО "Дагкремний" (www.dag-si.ru). На территории Дагестана ею были установлены:

- ФЭС на территории ДРКБ им. Кураева: мощность 14,4 кВт.
- ФЭС на территории ДНИИ "Волна": установленная мощность 10 кВт.
- РТПЦ Дубки: установленная мощность 640 Вт.
- РТПЦ Ахты: установленная мощность 1300 Вт.
- Жилой дом по улице им. Акушинского: мощность 500 Вт.
- Офис ООО " Дагкремний": установленная мощность 1 кВт.
- Министерство промышленности РД: установленная мощность 650 Вт.
- Предприятие "Унисервис": установленная мощность 2.2 кВт.
- КФХ Ямучу: установленная мощность 640 Вт.
- Жилой дом частного сектора в поселке Ленинкент: мощность 1 кВт.

Из данных, приведенных выше, можно сделать вывод, что внедрение солнечной энергетики в Дагестане набирает обороты. Заказы на установку солнечных модулей и их комплектующих поступают не только со стороны государства, но и со стороны частных предпринимателей и простых горожан. На фоне стабильно увеличивающихся цен на электроэнергию и нестабильной работы электросетей возникает целесообразность изменения привычных взглядов на

"традиционную" энергетику. При таких же темпах снижении цен на электроэнергию, получаемую с помощью солнечных модулей, приведет к всеобщему интересу и, следовательно, к интенсивному внедрению солнечной энергетики в Дагестане.

В настоящее время в России проводится ряд исследований, которые могут в перспективе снизить цену ФЭС:

– проект создания экологически чистого бесхлорного производства особо чистого поликремния алкоксилановым методом – благодаря его внедрению возможно существенно уменьшить стоимость исходного монокремния до 70 долл. (сейчас около 400);

– адаптация технологии производства солнечных элементов для переработки пластин меньшей толщины (до 250 мкм), что позволит получать с 1 кг монокремния 1 м2 СЭ;

– усовершенствование технологии производства солнечных элементов и солнечных модулей с целью увеличения среднего КПД до 16 % при значениях технологических коэффициентов выходов – 0.95.

Решение этих задач позволит уменьшить стоимость 1 Вт в солнечных модулях до 1,3 долл., а стоимость вырабатываемой ими электроэнергии до 10 центов за кВт/час. На решение этих задач требуется 5-7 лет и положительный результат способен значительно увеличить темпы роста сектора.

В реализации проекта в области солнечной энергетики можно выделить следующие этапы:

– выбор местоположения ФЭС или гелиосистемы;
– технико-экономическая оценка проекта;
– определение стоимости проекта;
– проектирование;
– строительство;
– эксплуатация.

Одним из важнейших этапов является выбор месторасположения солнце и ветроэнергетической станций. В данном случае необходимо учитывать:

– показатели солнечной радиации;
– состояние энергетики в регионе (показатели динамики стоимости электроэнергии, объем дефицита и др.);
– транспортную доступность;
– поддержку проекта местным населением и администрацией.

Стоимость проекта складывается из двух основных категорий – первоначальных капитальных и ежегодных эксплуатационных затрат.

В данной работе приводится технический и экономический расчет по использованию солнечной и ветровой энергетики в Дагестане.

Программа для вычисления вырабатываемой электроэнергии комбинированной системой солнечный модуль-ветрогенератор составлена следующим образом:

1. В колонках A3-A14 ставим 12 месяцев составляющие соответственно период времени от января до декабря
2. В колонках B3-B14 среднемесячное количество солнечных часов в сутки для территории города Махачкалы (по данным Гидрометцентра). В O3-O14 указываем значения уровня радиации на горизонтальную поверхность площадью 1м2. Также в колонках N3-N14 выставляем среднемесячную температуру воздуха.

3. В колонках С3-С14 вычисляем среднемесячное значение мощности, вырабатываемой модулем соответственной его характеристикам.

Суммарная мощность солнечных модулей Р рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{E_n}{E \cdot \eta_{ак} \cdot \eta_{инв} \cdot \eta \cdot (1 - \mathrm{T} \cdot 0{,}004)},$$

где: $\eta_{инв}$ – КПД инвертора (0,8 ... 0,93); $\eta_{ак}$ – КПД зарядно-разрядного цикла аккумулятора (0,5 ... 0,7); η – коэффициент, учитывающий потери на несоответствие, потери в проводах и на отражение стекла – 0,8; Т – среднемесячная температура в °С (величина со знаком); Е – дневная солнечная радиация, усредненная за месяц, кВт·ч/м2 в сутки.

Следовательно, необходимую величину En, находим путем умножения исходной мощности на знаменатель данной формулы. Так как данная формула составлена для 1 м2 солнечных модулей, то, следовательно, необходимо учесть значение общей площади фотоэлектрических модулей.

4. В колонках I3-I14 указываем среднесуточную скорость ветра по месяцам. В ячейке I15 находим среднегодовую скорость ветра по месяцам. В колонке М3-М14 указываем диаметр лопастей ветроустановки.
5. В колонках L3-L14 вычисляем мощность, вырабатываемую 2 кВт ветрогенератором по формуле

$$P = D^2 \cdot (V_{ном})^3 \cdot 1{,}64.$$

При выборе ВЭУ необходимо иметь в виду, что наиболее экономически эффективную отдачу мощности при ветровых условиях вашей местности можно получить при среднегодовой скорости ветра, которая будет равна номинальной.

Для Махачкалы Vср.год=Vном.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	№	Сред кол сол часов	Р СМ 0,6	Сумма	Р ВЭУ	Р СМ 1,2	Сумма	Р ВЭУ	Ср скор	Ср сут	Ср сут		
2	п/п	в сутки по мес.	(кВт/ч)	(кВт/ч)	(кВт/ч)	(кВт/ч)	(кВт/ч)	(кВт/ч)	ветра	Р	Р		
3	1	4,9	58,8	585,1	526,3	117,6	643,94	526,3	6,23	18,9	20,8	707	1,6
4	2	5,5	72,6	600,2	527,6	145,2	672,77	527,6	6,45	21,4	24,0	785	1,6
5	3	5,7	88,92	626,5	537,6	177,84	715,45	537,6	6,55	20,2	23,1	723	1,5
6	4	6,4	107,52	697,4	589,9	215,04	804,93	589,9	6,83	23,2	26,8	819	1,5
7	5	8	144	602,5	458,5	288	746,52	458,5	5,95	19,4	24,1	616	1,6
8	6	8,8	158,4	499,4	341,0	316,8	657,8	341,0	5,45	16,6	21,9	474	1,6
9	7	10,7	199,02	510,4	311,4	398,04	709,43	311,4	5,23	16,5	22,9	419	1,6
10	8	8,7	161,82	544,1	382,3	323,64	705,91	382,3	5,6	17,6	22,8	514	1,6
11	9	7	126	486,1	360,1	252	612,12	360,1	5,55	16,2	20,4	500	1,6
12	10	5,8	97,44	544,5	447,1	194,88	641,93	447,1	5,9	17,6	20,7	601	1,6
13	11	6,1	87,84	693,5	605,6	175,68	781,29	605,6	6,6	23,1	26,0	841	1,6
14	12	4,3	51,6	570,4	518,8	103,2	621,98	518,8	6,2	18,4	20,1	697	1,6
15			1354	6960,1	5606,2	2707,9	8314,1	5606,2	6,0	19,1	22,8		
16			0,6										

6. Параллельно переносим колонку L в колонку Е соответственно. В ячейке Е15 находим сумму Е3-Е14.
7. В D3-D14 находим сумму электроэнергии вырабатываемой солнечным модулем и ветрогенератором по формуле EN+CN=DN. В ячейке D15 находим сумму D3-D14.

8. В колонке F3-F14 находим мощность, вырабатываемую солнечным модулем 2 кВт (в 2 раза большим). В ячейке F15 находим сумму F3-F14.
9. В колонках G3-G14 находим суммарную мощность выработки электроэнергии солнечным модулем 2 кВт и ветрогенератором 2 кВт. В G15 вычисляем сумму мощностей G3-G14.
10. В колонках J3-J14 и K3-K14 находим среднесуточную выработку электроэнергии системой ветрогенератор 2кВт и солнечный модуль 1 кВт и соответственно 2 кВт. В ячейках J15 и K15 вычисляем среднесуточную мощность выработки электроэнергии соответственно каждому месяцу.
11. В ячейке C16 указываем число для возможности регулирования установленной мощности солнечного модуля. В ячейке M16 указываем суммарную площадь установленных модулей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТИВНЫХ ГОРИЗОНТОВ ТАРУМОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Ахмедов М.М. [1], Ахмедов К.М. [2]

[1] *Дагестанский государственный технический университет, пр-т И.Шамиля, 70а, Махачкала, 367030, Россия; e-mail: murada2008@rambler.ru*
[2] *Учреждение Российской академии наук Институт проблем геотермии ДНЦ РАН; Россия, 367030, г.Махачкала, пр-т И.Шамиля, 39а; e-mail: akhmedov60@yandex.ru*

На стадии проведении предварительной разведки на трех разведочных площадях Тарумовского месторождения теплоэнергетических вод экспериментально выявлены в естественных условиях наиболее оптимальные и стабильные режимы работы эксплуатационных скважин (водозаборных и нагнетательных) при функционировании наземного комплекса ГЦС.

Каждый участок месторождения был разбурен так, чтобы получить опытную или опытно-промышленную ячейку ГЦС, состоящую из одной водозаборной, одной нагнетательной и одной наблюдательной скважин одинаковой конструкции (рис.1).

Скважины располагаются, как можно ближе к потребителю и направление профиля нарастающих рядов определяется в сторону развития термоводозабора в соответствии с общей схемой разработки месторождения, производительность которого задается равной заявленной потребности.

Информация, полученная по данным промыслово-геофизических исследований скважин и лабораторных исследований образцов горных пород, не достаточно точно характеризует свойства пласта в целом или те свойства, которые могут резко изменяться по площади его распространения, так как объём исследуемой зоны составляет лишь незначительную долю всего пласта. В этом смысле существенное преимущество перед геофизическими и лабораторными методами изучения пластов имеют гидродинамические исследования, основанные на непосредственных измерениях дебитов, давлений, температуры. Используя формулы подземной гидродинамики, по данным опытных работ можно определить численные значения параметров, характеризующих гидродинамические свойства продуктивных горизонтов, а также определить особенности их строения (наличие неоднородностей, непроницаемых границ и т.д.).

В соответствии с принимаемой технологической схемой разработки продуктивных термоводоносных горизонтов с применением обратной закачки отработанного теплоносителя набор определяемых параметров существенно иной, чем при подсчете эксплуатационных запасов традиционным гидродинамическим методом.

Для рассматриваемой технологической схемы разработки водоносных горизонтов и установления по результатам разведочных работ значений гидрогеологических параметров, гидродинамические прогнозы не являются главными, хотя и необходимыми. Более существенное значение имеют емкостные и теплофизические параметры водоносных горизонтов. Эти параметры необходимы для тепловых прогнозов по охлаждению пласта в процессе закачки отработанного теплоносителя и оценки обеспеченности эксплуатационных запасов теплом, как по участкам, так и по месторождению в целом.

С целью облегчения схематизации геолого-гидрогеологических условий при подборе расчетных схем расширены понятия об однородности и

неоднородности водоносных горизонтов в граничных условиях. Уже на стадии детальных поисков уточнена методика определения расстояний от водозаборных скважин до нагнетательных и продолжительности выпусков при определении гидрогеологических параметров в условиях установившегося режима фильтрации [1].

Для подсчета эксплуатационных запасов тепловой мощности месторождения и обеспеченности эксплуатационных запасов емкостными запасами тепла по результатам разведочных работ определены следующие гидрогеологические параметры: эффективная мощность продуктивных горизонтов, водопроводимость и пьезопроводность. Лабораторными методами определены теплофизические параметры: для воды (теплоносителя) - теплоемкость и теплопроводность, для водовмещающих пород - теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность.

Эффективные мощности определены по интерпретации каротажных диаграмм. Усредненные значения эффективных мощностей по разведочным участкам и месторождения в целом приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Принятые значения эффективных мощностей продуктивных термоводоносных горизонтов

№№ пп	Эффективная мощность, м			
	Разведочные участки			Среднее по месторождению
	Юрковский	Большая Арешевка	Болгарский Хутор	
1	2	3	4	5
1	*Первый продуктивный горизонт в отложениях ср. миоцена*			
	23,5	33,0	39,0	32,0
2	*Второй продуктивный горизонт в отложениях ср. миоцена*			
	43,5	20,0	14,0	26,0
3	*Продуктивный горизонт в отложениях ср. плиоцена*			
	55,0	59,0	48,5	54,0

Теплофизические параметры определены и приняты по данным лабораторных исследований на пробах воды и образцах керна. При этом по теплоносителю (пластовой воде) получены значения достаточно близкие к стандартным величинам [6].

При определении теплоемкости водовмещающих пород получен большой разброс значений, а по разным участкам расхождения даже средних величин теплоемкости достигают порядка 100 Дж/кг·К. В качестве расчетной величины теплоемкости водовмещающих пород приняты данные по Юрковскому участку. Принятые значения теплофизических параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные значения теплофизических параметров теплоносителя и водовмещающих пород.

Параметры	Единица измерения	Вода (теплоноситель)	Водовмещающие породы	
			Водоносный комплекс	
			Средний миоцен	Средний плиоцен
1	2	3	4	5
Объемная масса (плотность)	$кг/м^3$	979	2111	2032
Теплоемкость	Дж/кг·К	4120	772	772
Теплопроводность	Вт/м·К	0,667	1,24	1,13
Температуропроводность	$м^2/с \cdot 10^{-6}$	-	0,815	0,835

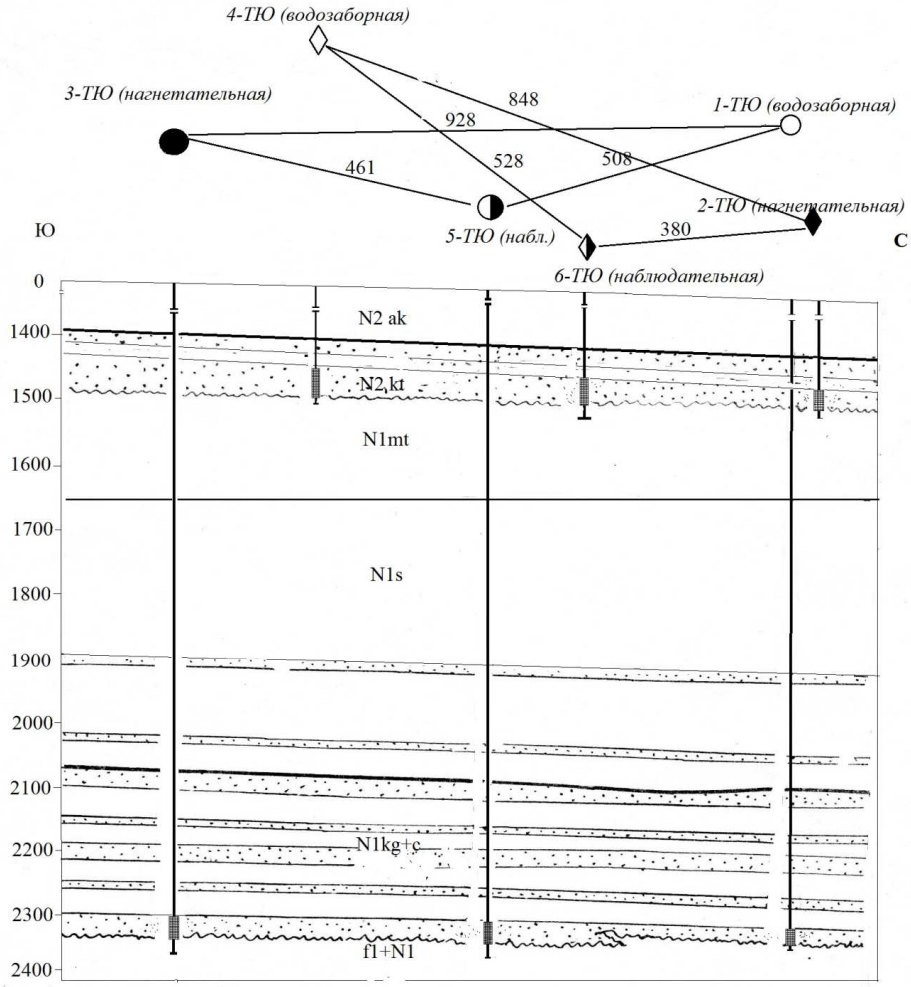


Рис. 1. Схема расположения скважин опытных ячеек ГЦС на участке Юрковка Тарумовского месторождения теплоэнергетических вод оборудованные на плиоцен среднемиоценовый термоводоносный комплекс.

Все разведочные скважины опробовались одиночными выпусками продолжительностью от 5 до 15 суток.

Во всех случаях учитывается экспериментальный характер каждого опыта, и необходимость получения от него максимум качественной информации путем правильного выбора способов бурения и оборудования скважин, использования точных контрольно-измерительных устройств, применения обоснованной методики расчета по схеме, наиболее полно отражающей особенности геолого-гидрогеологической обстановки, условия ведения опыта и требования проекта.

Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определялись по результатам кустовых опытных выпусков.

Основной характеристикой водопроницаемости горных пород является коэффициент фильтрации, который служит исходным параметром для всех фильтрационных расчетов. Коэффициент фильтрации может определяться опытными выпусками, нагнетаниями, геофизическими и лабораторными исследованиями. Наиболее надежным количественным методом определения этого коэффициента являются опытные выпуски (откачки).

Поскольку пробные и опытные выпуски являются наиболее распространенным видом гидрогеологических исследований, их необходимо проводить на всех стадиях разведки.

Опытные кустовые выпуски проводятся на кусте скважин, включающем центральную скважину, из которой выпускают воду, и наблюдательные, по которым фиксируют развитие депрессионной воронки в водоносном горизонте. Кустовые выпуски позволяют определить гидрогеологические параметры на большей площади и с большей точностью, чем одиночные, так как при их выполнении исключается влияние фильтра и призабойной зоны, а при расчетах не требуется принимать условное значение радиуса влияния. В большинстве случаев движение воды в терригенных породах подчиняется линейному закону фильтрации, так как радиус зоны турбулентности при выпусках весьма невелик, а ошибки в расчетах, не учитывающих ее, не превышают нескольких процентов [3].

При кустовых выпусках помимо коэффициента фильтрации могут быть определены коэффициент пьезопроводности, фильтрационная неоднородность и анизотропия пласта, характер формирования депрессионной воронки, степень взаимосвязи водоносных горизонтов, а при запуске индикаторов - действительные скорости фильтрации и водоотдача пород. Кроме того, кустовыми выпусками при необходимости можно определить опытным путем полное сопротивление фильтра и прискважной зоны, т.е. несовершенство скважины по характеру вскрытия водоносного горизонта [4, 5].

Особенно большое значение при опробовании глубоко залегающих водоносных горизонтов имеют результаты, полученные по данным снижения уровня в наблюдательных скважинах независимо от положения в них фильтра по отношению к центральной скважине, в качестве наблюдательных должны использоваться все разведочные скважины, пробуренные в радиусе влияния опытной скважины.

Точность получаемых в результате опытных выпусков характеристик водопроницаемости горных пород в первую очередь зависит от того, насколько удачно проведена схематизация природных условий, а также сделан выбор понижений и продолжительности выпусков.

При совместном определении коэффициентов фильтрации и пьезопроводности (уровнепроводности) продолжительность кустовой откачки увеличивают в напорных водах обычно до 10-15 сут. При этом продолжительность кустовой откачки должна обеспечить не только необходимые значения понижений в наиболее удаленных наблюдательных скважинах, но и достижение в них квазистационарного режима в течение времени, достаточного для построения временных и комбинированных графиков прослеживания.

Коэффициенты фильтрации и пьезопроводности для относительно однородного пласта, неограниченного в плане, можно определять методом графоаналитической обработки результатов откачки в том случае, если наступает квазистационарный режим фильтрации, т.е. при соблюдении условия

$$r^2/(4at) \leq 0{,}1 \qquad (1)$$

Для расчетов по центральной скважине это условие всегда соблюдается, а для расчетов по наблюдательным скважинам при кратковременных выпусках и малом значении коэффициента пьезопроводности оно может быть нарушено, и тогда следует пользоваться общей зависимостью для неограниченного пласта пользуясь формулой:

$$S = -\frac{Q}{4\pi Km} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \qquad (2)$$

где E_i – интегральная показательная функция, определяемая по таблице; r – радиус скважины (если определение производится по центральной скважине) или расстояние от центральной скважины до наблюдательной (если определение производится по наблюдательной скважине); a – коэффициент пьезопроводности; t – время, исчисляемое от начала выпусков.

В работе представлены результаты полученные по данным опытных работ проведенных в отложениях среднего миоцена и континентальной толщи плиоцена на одном из участков (Юрковка) Тарумовского месторождения теплоэнергетических вод.

Основные сведения по скважинами по исследуемым объектам приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные сведения по скважинам, оборудованным на среднемиоценовый термоводоносный комплекс.

№	Основные сведения	Разведочные скважины	
		центральная	наблюдательная
		1-ТЮ	5-ТЮ
1	Эффективная мощность водоносного горизонта, м	8,0	22,5
2	Диаметр эксплуатационной колонны, мм	168	168
3	Расположение водоприемной части скважины в пласте (интервал перфорации)	2285-2295 (открытий ствол)	2282-2306 (перфорированная колона)
4	Водовмещающие породы	песчаники плотные, мелкозернистые	
2	Расстояние до наблюдательной скважины, м	500	
	Режим водовыпуска скважины, дебит, дм^3/с	33,3 (при постоянном, максимальном расходе)	
	Температура воды на устье, ^{o}С	90-92	
4	Степень однородности пласта	однородный по простиранию и по мощности	
5	Гидравлический тип пласта	напорные воды	
6	Характер внешних границ пласта в плане	пласт неограниченный по простиранию, с кровли и подошвы перекрыт водоупорными глинами	
7	Режим подземных вод	напорный, температурный	
8	По степени и характеру вскрытия пласта	скважины совершенные	
9	Разновидность опытной откачки	кустовая	

Для получения представительного участка расчетного графика $S = f(lgt)$ общая продолжительность выпусков, судя по опыту [2], должна быть не менее чем в 5 раз больше контрольного времени. Расчеты эти ориентировочны, и общая продолжительность откачки корректируется в процессе опыта путем построения расчетного графика, начало прямолинейного участка, которого соответствует наступлению квазистационарного режима.

Пуск скважин на начальном этапе, как правило, сопровождается обильным выносом песка. Собственно выпуск был начат после полной очистки скважины от песка.

Скважину отрабатывали через 30мм штуцер с дебитом 33 дм^3/с. Продолжительность ступени 55 часов. Замеры дебита производились объемным

методом (мерная емкость объемом 25м^3 градуированный через 1м-замеряемый объем 6286 литров).

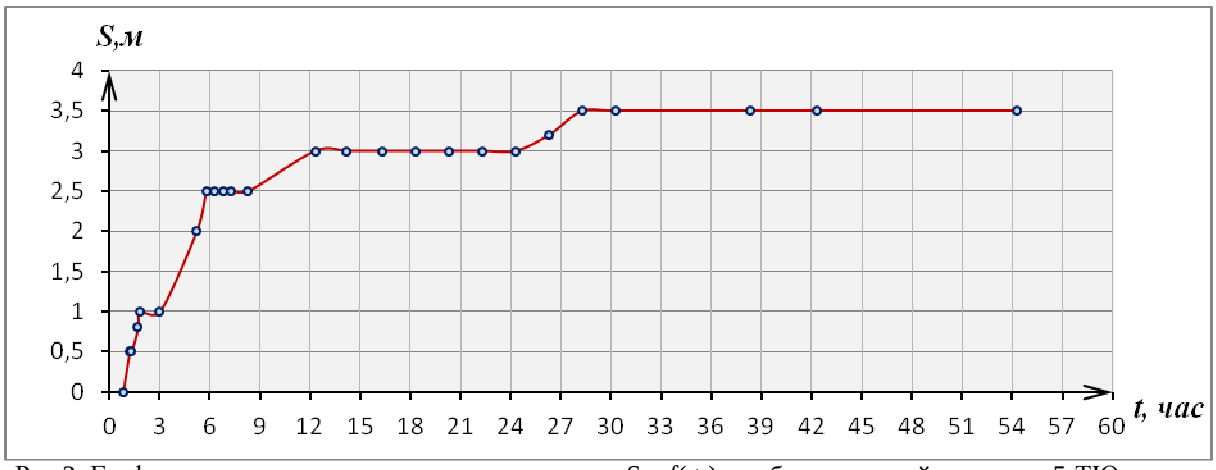


Рис.2. График прослеживания за снижением уровня S = f(t) в наблюдательной скважине 5-ТЮ.

В центральной скважине стабилизация параметров (давления, температуры, дебита) происходит практически после очистки скважины от песка т.е. в течение 2-4 суток.

Как видно из графика слежения за темпом снижения давления на устье наблюдательной скважины 5-ТЮ, при водовыпусках из центральной 1-ТЮ (находящейся на удалении 500 метров) стабилизация давления наступает через 28-30 часов после достижения фронта возмущения (рис.2).

Для определения коэффициентов фильтрации и пьезопроводности по данным выпусков в напорных водоносных горизонтах строится полулогарифмический график зависимости значения понижения S от времени, так называемый "график временного прослеживания" $S = f(lgt)$. Этот график выражается прямой (рис.3), уравнение которой имеет вид:

$$S = A + C * lgt \qquad (3)$$

где t - время, исчисляемое от начала выпуска; A - начальная ордината, определяемая как отрезок, отсекаемый на оси ординат; C - угловой коэффициент, который равен $tg\alpha$,

$$C = (S_2 - S_1)/(lgt_2 - lgt_1). \qquad (4)$$

Коэффициент фильтрации определяется по формуле:

$$Km = 0{,}183\ Q/C, \qquad (5)$$

где m - мощность водоносного пласта.

Формула (33) справедлива при расчетах как совершенных, так и несовершенных скважин.

Коэффициент пьезопроводности для совершенных скважин определяется по следующей формуле:

$$lga = 2\ lgr - 0{,}35\ A/C \qquad (6)$$

Из графика находим $A = 0{,}5$. Пользуясь формулой (4), определяем C по точкам M и N, взятым произвольно на прямой,

$$C = (2{,}5 – 1{,}5)/(1{,}0 - 0{,}5) = 1{,}0/0{,}5 = 2{,}0$$

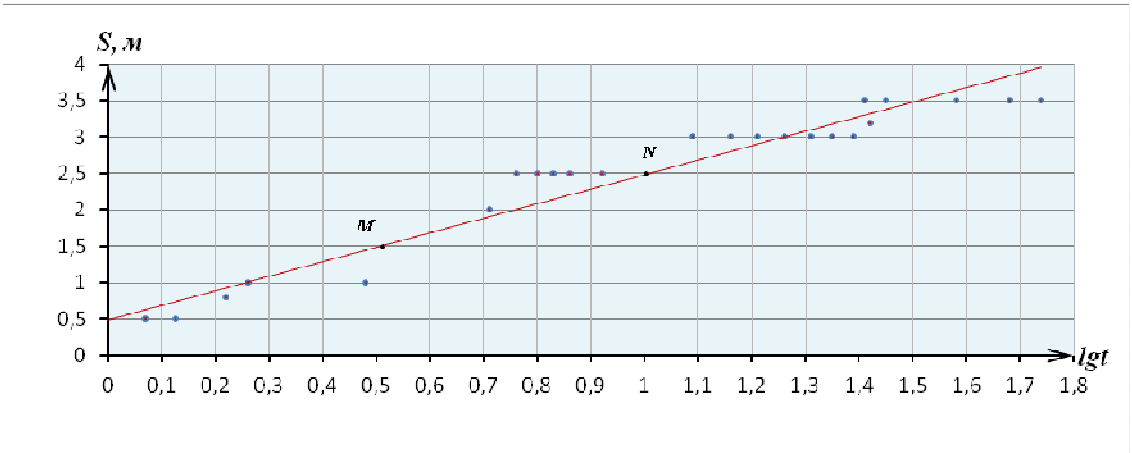


Рис.3. Преобразованный график прослеживания за понижением уровня S = f (lgt) в наблюдательной скважине 5-ТЮ.

Затем по формулам (5) и (6) определяем коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности:

$Km = 0{,}183 \cdot 2877/2{,}0 = 263$ м^2/ сут;

$lg\ a = 2 \cdot lg\ 500 - 0{,}35 + 0{,}5/2{,}0 = 5{,}39 - 0{,}35 + 0{,}25 = 5{,}29$

откуда $a = 4{,}6 \cdot 10^6$ м^2/сут.

Продолжительность наблюдений за восстановлением давления зависит от времени наступления стабилизации, что составило 14 часов с момента остановки центральной скважины т.е 75-80% продолжительности выпуска (рис.4).

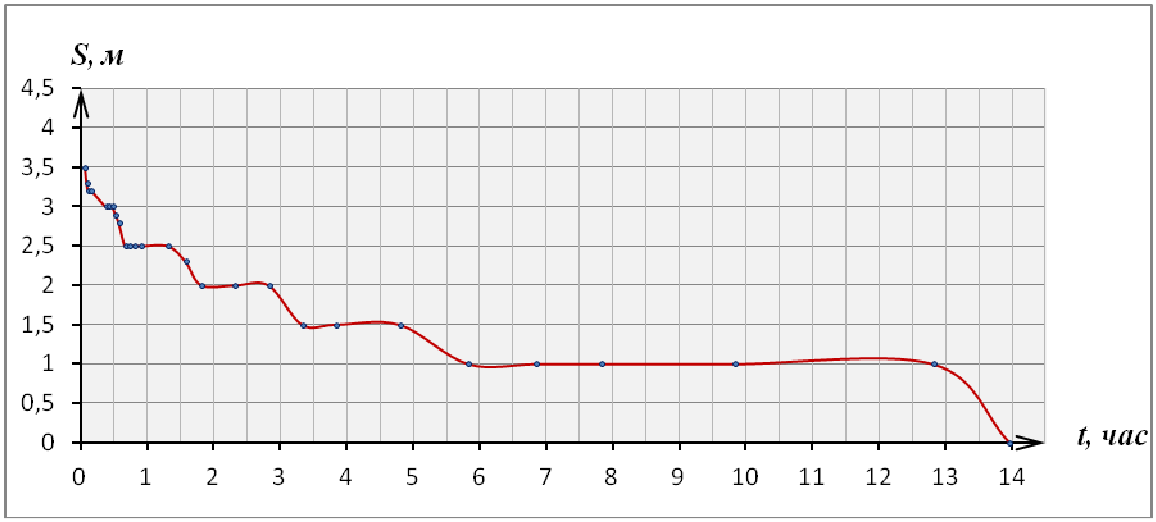


Рис.4. График прослеживания за восстановлением уровня S = f (t) в наблюдательной скважине 5-ТЮ.

Для расчета параметров использована зависимость (2).

Пользуясь формулой (2) определяем по точкам С,

$u_1 = \frac{r^2}{4at_1}$; $u_2 = \frac{r^2}{4at_2}$; $a = 3{,}1 \cdot 10^6$ м^2/сут.

Подставляя значения в формулу (5) определяем водопроводимость Km= =276 м2/сут.

Как видно из расчетов по определению фильтрационных параметров по данным кустовой откачки по кривым снижения и восстановления давлений, полученные величины водопроводимости и пьезопроводности для среднемиоценовых отложений отличаются хорошей сходимостью.

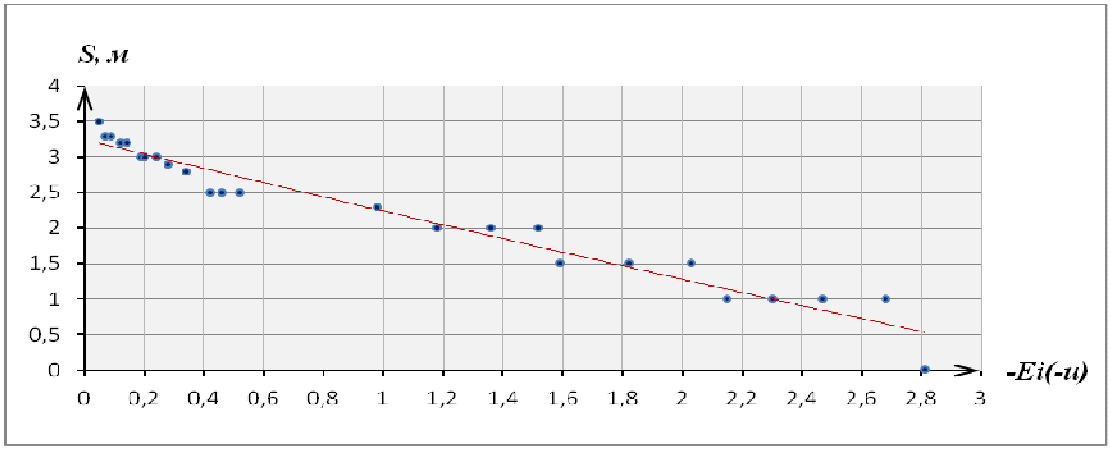


Рис.5. Преобразованный график прослеживания за восстановлением уровня S= f [-Ei(-u)]в наблюдательной скважине 5-ТЮ.

Аналогичные опыты на каждом из ячеек проводились и на других участках Болгарский Хутор и Большая Арешевка.

Полученные результаты и принятые значения расчетных гидрогеологических параметров по всем по всем продуктивным горизонтам на участках приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения расчетных гидрогеологических параметров продуктивных термоводоносных горизонтов (комплексов).

№№ пп	Номера скважин		Расчетные значения принятых гидрогеологических параметров					
	центр	набл.	по кривой снижения давления (уровня)		по кривой восстановления давления (уровня)		принятые значения	
			km, $м^2/сут$	*a*, $м^2/сут$	*km*, $м^2/сут$	*a*, $м^2/сут$	*km*, $м^2/сут$	*a*, $м^2/сут$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	участок Юрковский							
1	*Первый продуктивный горизонт в отложениях ср. миоцена*							
	1-ТЮ 5-ТЮ	5-ТЮ 1-ТЮ	263 228	$3,6 \cdot 10^6$ $2,6 \cdot 10^6$	276	$2,85 \cdot 10^6$	221	$3,1 \cdot 10^6$
2	*Продуктивный горизонт континентальной толщи плиоцена*							
	4-ТЮ	6-ТЮ	203	$4,5 \cdot 10^6$	221	$1,8 \cdot 10^6$	212	$3,0 \cdot 10^6$
	участок Большая Арешевка							
3	*Первый продуктивный горизонтв отложениях ср. миоцена*							
	3-ТА 3-ТА	2-ТА 1-ТА	204 229	$8,1 \cdot 10^6$ $4,3 \cdot 10^6$	217 222	$1,9 \cdot 10^6$	216	$6,0 \cdot 10^6$
	участок Болгарский Хутор							
4	*Первый продуктивный горизонт в отложениях ср. миоцена*							
	1-ТД	-		$3,6 \cdot 10^6$	-	-	218	$2,0 \cdot 10^6$
5	Второй продуктивный горизонт в отложениях ср. миоцена							
	4-ТД	5-Тар	66	$2,0 \cdot 10^5$	-	-	66	$2,0 \cdot 10^5$
6	*Продуктивный горизонт континентальной толщи плиоцена*							
	2-ТД	-	215	-	-	-	212	$3,0 \cdot 10^6$

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Полученные значения гидродинамических параметров можно использовать в качестве исходных данных при решении задач по прогнозу взаимодействия водозаборных участков и изменения гидродинамических условий

продуктивных горизонтов при эксплуатации в режиме самоизлива и при условии обратной закачки с использованием методов математического моделирования.

2. Моделирование необходимо выполнить применительно к схеме водозабора конкретно на каждом из участков.

3. По результатам выполненной геофильтрационной схематизации для каждого из продуктивных термоводоносных горизонтов необходимо принять однопластовую расчетную схему модели, движение подземных вод которой подчиняется законам плановой фильтрации.

4. Границы моделей водозаборных участков необходимо задать исходя, главным образом, из расстояний между участками, полученных гидродинамических параметров продуктивных горизонтов, а также максимальных значений водоотбора (нагнетания).

5. При моделировании гидродинамических прогнозных задач решение необходимо проводить в зависимости от понижений динамических уровней от статических.

6. Границы моделей представляют собой контур с неизменной величиной расхода подземных вод.

Литература:

1. *Ахмедов К.М.* Обоснование схемы постановки геологоразведочных работ на стадии проведения предварительной разведки на Тарумовском месторождении теплоэнергетических вод Республики Дагестан// Материалы II Международной конференции «Возобновляемая энергетика: Проблемы и перспективы» г. Махачкала 2010г. с.210-221.
2. *Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. - Изд. 2-е. - М.: Недра, 1979.-328 с.
3. *Боревский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С.* Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. - М.: Недра, 1976.-248 с.
4. *Веригин Н.Н.* Методы определения фильтрационных свойств горных пород. - М.: Госстройиздат, 1962. - 180 с.
5. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. - М.: Недра, 1978. - 328 с.
6. *Ахмедов К.М., Амаев М.А. Стрепетов В.П.* Отчет о результатах предварительной разведки Тарумовского месторождения теплоэнергетических вод с подсчетом эксплуатационных запасов с ППД на основе создания подземных ГЦС. Даггеолфонд, г. Махачкала.1990г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОЛИМПИЙСКИХ ИГРАХ

Сулейманов М.Ж.

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 г. Москва, ул. Ижорская, д. 13 стр. 2; e-mail: smusi@mail.ru

Олимпийские игры занимают значимое место в ряду крупнейших мировых медиа-продуктов, притягивающих внимание миллионов зрителей и являются престижной площадкой для демонстрации новых перспективных технологий, в том числе имеющих целью энергосбережение и защиту окружающей среды.

История Олимпийских игр насчитывает более 1000 лет. За это время программа Игр и условия их проведения изменялись с учетом тенденций развития человечества. В последние десятилетия особое внимание стало уделяться проблеме охраны окружающей среды, использованию экологически чистых технологий, проектирование и сооружение олимпийских объектов стало осуществляться с учетом воздействия на окружающую среду спортивной инфраструктуры и инженерных систем.

В 1991 году Международный олимпийский комитет (МОК) внес поправки в свой устав, включающие требования по соблюдению экологической безопасности при подготовке и проведении Олимпийских игр, а также создал комиссию по вопросам окружающей среды. Были разработаны экологические принципы проведения Олимпийских игр:

- энергосбережение и использование возобновляемых источников энергии;
- сохранение водных ресурсов;
- минимизация отходов;
- охрана здоровья человека;
- защита природных ресурсов.

МОК стал рассматривать окружающую среду как третий основополагающий элемент олимпийского духа наряду со спортом и культурой. Проектирование, строительство и эксплуатация Олимпийских стадионов и спортивных комплексов должны следовать принципу экологичности всех решений и действий в рамках сбалансированного управления окружающей средой.

Использование возобновляемых источников энергии при проведении Олимпийских игр для многих стран является, прежде всего, вопросом престижа.

В данном обзоре рассмотрены примеры использования возобновляемых источников энергии на Олимпийских играх после принятия «Экологических принципов». Данные получены из публикаций в Интернете, а также с официальных сайтов организаторов Олимпийских игр.

Краткий обзор использования солнечной и ветровой энергии на прошедших Олимпийских играх

Реализация экологических программ в рамках подготовки и проведения Олимпийских игр наиболее масштабно началась с проведения Игр в Лиллехаммере в 1994 году. В частности, была реализована программа по снижению вредных выбросов в окружающую среду. С каждым разом организаторы проведения Олимпийских игр стремятся к снижению уровня

выбросов CO_2 к нулевому показателю. В решении данной задачи важное место занимает использование возобновляемых источников энергии.

Организаторы Олимпиады 1996 в Атланте внесли свою лепту в проведение экологически чистых Олимпийских игр. Во время проведения Игр была введена в действие фотоэлектрическая система мощностью 340 кВт [1]. На крыше плавательного бассейна было установлено 2856 фотоэлектрических модулей.

Кроме того, было установлено 274 солнечных коллектора для подогрева воды в бассейне. Они охватывали 940 квадратных метров площади крыши. Также во время проведения Олимпийских игр была использована 7 кВт система Стирлинга, которая производила электроэнергию для освещения пешеходной магистрали [2].

Олимпийские игры в Сиднее (2000 г.) носят название как первые в истории «экологически чистые» игры. Настоящей новинкой стало принятие экологических директив, на основании которых выполнялось проектирование всех объектов спортивной инфраструктуры. Экологические директивы подразумевают выполнение трех основных задач:

- применение энергосберегающих технологий и возобновляемых источников энергии;
- сохранение водных ресурсов;
- использование хладагентов, не наносящих вреда окружающей среде.

Деревня для спортсменов включала в себя 650 зданий и сооружений и считается ныне самым крупным в мире городским кварталом, живущим за счет солнечной энергии. Каждое здание здесь оборудовано фотоэлектрической системой производства компании BP Solar, состоящей из солнечных панелей, интегрированных в крышу. Дома потребляют примерно на 75 % меньше электроэнергии, чем типичные австралийские дома.

Кроме того, сооружения Олимпийской деревни проектировались с учетом энергосберегающих технологий. В основе проектов зданий лежит принцип пассивного использования солнечной энергии. Они сориентированы таким образом, чтобы ловить солнечные лучи не только для применения в целях энергообеспечения, но и максимально широкого использования естественного освещения помещений. Помимо этого применялись и другие энергосберегающие технологии, такие как системы естественной вентиляции и высокоэффективное электрооборудование. В результате, 50% потребностей в электроэнергии удовлетворялось исключительно за счет энергии солнца.

В общей сложности солнечная система энергоснабжения Олимпийской деревни в состоянии произвести 1 млн кВт⊙ч электроэнергии в год. Произведенная электроэнергия поступает непосредственно в электрическую сеть каждого дома, а излишки передаются в городскую электрическую сеть.

Солнечная энергия используется не только для производства электроэнергии, но и для нагрева санитарной воды посредством солнечных водонагревательных систем, которые в периоды слабой солнечности переводятся на газ. В Олимпийской деревне солнечная энергия применяется также для питания современной системы наружного освещения.

«Супер Арена» – крытый стадион на 20 тысяч мест оснащен солнечной энергосистемой, состоящей из 1176 фотоэлектрических солнечных панелей. Панели уложены поверх плоского металлического перекрытия и в общей сложности могут покрывать до 10% потребности в энергоснабжении объекта.

Для Олимпийского стадиона была разработана система естественной вентиляции, обеспечивающая приток свежего воздуха и вытяжку нагретого воздуха.

Олимпийские гостиницы оборудованы мощной системой приготовления горячей санитарной воды, крупнейшей в Австралии. Солнечная водонагревательная система гостиниц в совокупности обеспечивает 60% потребности в горячей воде. Для освещения Олимпийского бульвара были использованы разработанные BP Solar осветительные столбы высотой 19 и 30 м. с фотоэлектрическими панелями, которые вырабатывают 130-160 тысяч кВтч электроэнергии в год [3, 4].

Перед проведением Олимпийских игр Солт-Лейк-Сити (2002 г.) было подписано соглашение на покупку 35000 кВтч ветровой электроэнергии в месяц, что делало город крупнейшим покупателем ветровой электроэнергии в штате Юта. По планам организаторов это было сделано с целью сокращения выбросов парниковых газов на 7%.

При подготовке Олимпийских игр в Афинах (2004 г.) вследствие финансовых ограничений организаторы не смогли выполнить все принятые обязательства по использованию возобновляемых источников энергии. Наиболее крупным проектом по использованию возобновляемых источников энергии при проведении Олимпийских игр стало лишь создание «солнечной крыши» (33 кВт) на здании школы, расположенной недалеко от Олимпийского стадиона и выполнявшей во время проведения Игр функции медиа-центра [8]. Этот проект был реализован с участием Немецкого энергетического агентства.

При возведении всех олимпийских объектов (Пекин, 2008 г.) китайские строители применяли самые современные энергосберегающие технологии.

Один из мировых лидеров по производству фотоэлектрических модулей Suntech Power Holdings Co Ltd оснастил солнечными энергоустановками мощностью 130 кВт основной стадион Олимпийских игр.

Компания MTS Group – ведущий мировой производитель водонагревательного и отопительного оборудования – приняла участие в строительстве спортивных и жилых сооружений для Олимпиады 2008 года в Пекине. Солнечные коллекторы Elco были установлены на крышах 42 зданий Олимпийской деревни для обеспечения их горячей водой. Оборудование было запущено в эксплуатацию к началу Олимпийских игр.

Бытовая вода в Олимпийских деревнях, построенных для участников Олимпийских игр, на 90% нагревалась от солнечных коллекторов. Применение данного оборудования обеспечило подачу 350 000 литров горячей воды ежедневно, а также позволило сократить расход электроэнергии на 30%.

Успешным примером использования ветровой энергии во время Олимпиады 2008 является ввод в эксплуатацию в пригороде Пекина ветроэлектростанции общей мощностью 64,5 МВт [9, 10, 11].

При проведении Олимпийских игр 2010 г. в Канаде большое внимание было уделено использованию ветровой энергии. Ветроустановка мощностью 1,5 МВт была сооружена на вершине горы используемой для соревнований по горнолыжному спуску. За счет ветровой энергии обеспечивалось около 20% энергопотребностей горнолыжного курорта [7].

При проведении Олимпийских игр 2012 г. в Лондоне планируется использовать ветровые турбины, которые должны будут обеспечить значительную долю энергоснабжения Олимпийских объектов, и станут символом Олимпийских игр 2012.

«London Array» станет крупнейшей в мире фермой по выработке ветровой электроэнергии. Станция расположится в 20 км от побережья графств Кент и Эссекс. Площадь, которую будут занимать генерирующие мощности, составит 244 кв. км. Проектируемая мощность – 1 ГВт. «London Array» позволит сократить ежегодный выброс CO_2 на 1,9 млн тонн. Первая очередь проекта (341 ветрогенератор) запущена в конце 2008 года. [5, 13].

В заявке Нью-Йорка, претендовавшего на проведение Олимпийских игр 2012 г., также планировалось использование возобновляемых источников энергии в энергоснабжении Олимпийских объектов [12]. Предполагалось использование 25000 солнечных коллекторов, 100000 квадратных футов солнечных фотоэлектрических панелей и 34 ветровых турбин. По оценкам организаторов это позволило бы на 70% обеспечить Олимпийские объекты горячей водой и на 40% электроэнергией.

Зимние олимпийские игры в Сочи и возможное место возобновляемых источников энергии.

Подготовка Олимпийских игр в Сочи сопряжена с решением широкого комплекса проблем, среди которых чрезвычайно важной является задача использования научно-технических достижений в области эффективного производства и потребления энергии и снижения антропогенного загрязнения окружающей среды. В Заявочной книге «Сочи-2014» Российской Федерации на проведение Олимпийских игр этой проблеме было уделено большое внимание, что стало немаловажным фактором положительного решения об их проведении в России.

Сегодня район Большого Сочи является остро энергодефицитным, имеются серьезные проблемы с экологией, обусловленные в том числе тем, что теплоснабжение более 60% потребителей осуществляется от мелких и индивидуальных котельных, работающих на угле и жидком топливе. Значительная доля существующих систем электро- и теплоснабжения физически и морально устарели и малоэффективны. Негативное влияние на экологию оказывает существующий автомобильный транспорт. В соответствии с прогнозными исследованиями к 2014 году энергетические потребности в связи с бурным развитием района возрастут в 2-2,5 раза, что ставит задачу фактического полного обновления к 2014 году его систем энергоснабжения.

Предусмотренные Федеральной целевой программой правительства РФ по развитию региона Сочи мероприятия в части обеспечения гарантированного энергоснабжения объектов Олимпиады являются необходимыми, но недостаточными, поскольку направлены на решение проблемы в основном на традиционных подходах. Представляется целесообразным разработать специальную программу мероприятий не только по созданию новых генерирующих мощностей, но и по обеспечению эффективного потребления энергии и энергосбережения на вновь создаваемых и реконструируемых объектах строительства с использованием новых энергетических технологий. Исключительно важным является также разработка комплекса мероприятий по использованию на транспорте экологически чистого топлива, как это анонсируется в Заявочной книге «Сочи-2014».

Уже сегодня в условиях Большого Сочи является экономически эффективным применение широкого спектра новых энергетических технологий, основанных на использовании экологически чистых возобновляемых источников энергии и переработке отходов. Ряд технологий находятся на стадии интенсивных разработок. Хотя они еще не достигли коммерческой зрелости, но представляют

несомненный практический интерес для применения в обозримом будущем (новые экологически чистые топлива, водородные технологии, гибридные транспортные средства и т.п.). Демонстрация новых экологически чистых технологий в период проведения Олимпиад является общепринятым в мире мероприятием, имеющим большое политическое и пропагандистско-воспитательное значение. Среди таких энергетических технологий можно назвать:

- использование солнечной энергии для горячего водоснабжения;
- использование приемов «солнечной архитектуры» (естественное освещение, пассивный солнечный обогрев, естественная вентиляция и т.п.) при проектировании олимпийских объектов с целью снижения энергозатрат;
- применение систем теплонасосного теплоснабжения с использованием низкопотенциального природного и сбросного тепла;
- закрытие и рекультивация свалок с созданием комплекса установок по переработке жидких и твёрдых бытовых, растительной биомассы возможностью получения синтез – газа и водорода и извлечения вторичного сырья;
- использование современных газопоршневых когенерационных энергоустановок (мини-ТЭЦ) для автономного энергоснабжения и повышения надежности энергоснабжения олимпийских объектов;
- использование фотоэлектрических установок для местного освещения, питания систем аварийной и охранной сигнализации и других целей;
- использование автономных солнечно-ветровых энергоустановок, в том числе для автономного освещения;
- использование электротранспорта и гибридных автомобилей с зарядными станциями на основе ВИЭ, которые будут снабжены новыми высокоэффективными энергоёмкими тяговыми аккумуляторами;
- использование демонстрационных водородных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания и электрохимическими генераторами, обеспеченных инфраструктурой производства, хранения и заправки водородом, бензоводородными и метановодородными композициями.

Важным компонентом программы подготовки к экологически чистым Олимпийским играм в Сочи могло бы стать сооружение в близлежащих районах ветровых электростанций (Ейская ВЭС, ВЭС в районе г. Анапы и др.), завершение строительства Краснополянской ГЭС-2, строительство экспериментальной солнечной электростанции в районе г. Кисловодска. По перечисленным объектам в России имеется значительный научно-технический задел. Ряд передовых технологий и устройств мог бы быть продемонстрирован с участием ведущих зарубежных компаний.

По имеющимся данным [6], организаторы Олимпийских игр в Сочи планируют затратить 1,75 миллиарда долларов в проекты по энергосбережению и в возобновляемые источники энергии. Эффективное использование этих немалых средств могло бы послужить важным стимулятором развития возобновляемых источников энергии во многих регионах России, применение которых становится все более экономически конкурентоспособным [15].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы (госконтракт № 14.740.11.0096) и Гранта Президента по государственной поддержке ведущей научной школы НШ 3717.2010.8.

Литература:

1. www.gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/AQUATIC.html
2. www.nrel.gov/docs/fy00osti/23753.pdf
3. www.sydneyolympicpark.com.au
4. Сидней 2000: Первые «зелёные» игры». Электронный журнал «Экологические системы». №5 май 2003.
5. www.olymps.ru
6. www.sochi2014.com
7. www.bcenergyblog.com/2010/02/articles/general-renewable-energy/vancouvers-green-olympics
8. www.physorg.com/technology-news
9. www.chinapictorial.com
10. http://en.beijing2008.cn/news/official/preparation/
11. www.airweek.ru/statya_126.html
12. www1.eere.energy.gov
13. www.london2012.com
14. www.apps1.eere.energy.gov/news/news_detail.cfm/news_id=6041
15. *В.Е. Фортов, О.С. Попель.* Энрегетика в современном мире – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. -168 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Мейланов Р.П. Научное наследие профессора К.М.Магомедова ……. 5
Алхасов А.Б. Комбинированные технологии освоения ВИЭ …… 8
Ильин А.К. Об эксергии солнечной радиации …… 16
Джаватов Д.К. Моделирование в условиях неопределенности, описываемой с позиций теории нечетких множеств …….. 20
Вердиев М.Г. Модель процесса тепломассообмена на неизотермической поверхности теплоподвода ……... 31
Алишаев М.Г. Лазурному берегу – геотермальное тепло! ……. 44

ДОКЛАДЫ ВЕДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

Мейланов Р.П. Нелокальная теория теплопроводности и приложения к задачам геотермии …….. 50
Рамазанов М.М., Булгакова Н.С. Теплообмен конвекцией в природе и технике ... 54
Магомедов М.Н. О поведении вещества при высоких температурах и давлениях, присущих границе мантии и внешнего ядра Земли ……... 61
Эмиров С.Н. Тепловые свойства осадочных горных пород в условиях их естественного залегания ……... 72
Базаев А.Р. Экспериментальные исследования фазовых переходов в бинарных системах вода-спирт и спирт-н.алкан …….. 80
Магомедов У.Б. Теплопроводность высокоминерализованных вод при высоких давлениях и температурах …… 86
Ильин Р.А. Эффективность теплоэнергетических установок, в том числе – на возобновляемых источниках энергии ……. 93
Каймаразов А.Г. Технологии умягчения и очистки низкопотенциальных вод Северо-Дагестанского артезианского бассейна ……... 99
Аливердиев А.А. Некоторые особенности прохождения интенсивной ударной волны в многослойной композитной мишени …… 109
Абдуллаев А.А. Влияние магнитного поля на свойства термальных вод ...…….. 114
Дибиров Я.А. Теплоаккумулирующие составы на основе системы Li,Ca//SO_4,MoO_4 …… 118

ДОКЛАДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Алхасова Д.А. Технология съема петротермального тепла ……..……... 123
Чимаев Г.Г., Алишаев М.Г. Численные расчеты параметров высокотермальной скважины на основе полного уравнения энергии…….. 128
Матусевич И.Л., Абасов Г.М. Численное моделирование теплообмена в системе «две вертикальные скважины – горная порода»……..……..……..…….. 134
Булгакова Н.С. Нелинейные режимы конвекции трехкомпонентной изотермической смеси в пористом прямоугольнике при условии модуляции градиента концентрации ……..……..……... 138
Шабанова М.Р. Аномальные решения нелокальной задачи Стефана...…… 145
Магомедов Р.А., Мейланов Р.П. Фрактальное уравнение состояния с учетом вириальных коэффициентов ……..... 150
Азизов Г.А. К характеристике моделей движения двухфазного потока …….. 156

Азизов А.А., Джаватов Д.К. Повышение эффективности эксплуатации геотермальной циркуляционной системы с использованием горизонтальных стволов ……..……. 161
Павлова В.Ю. Построение геофизических моделей Мутновского месторождения парогидротерм по данным интерпретации геофизических исследований в скважинах ……..……. 167
Базаев Э.А. Уравнение кривой фазового равновесия в смесях вода-алифатический спирт ……...…. 168
Джаппаров Т.А. Оценка скорости термического разложения алифатических спиртов по данным эксперимента…….……..…….. 173
Карабекова Б.К. Термодинамические свойства водных растворов алифатических спиртов в сверхкритическом состоянии по экспериментальным p,ρ,T,x – зависимостям ……...….... 179
Магомедов М.М-Ш. Динамическая вязкость воды и водных растворов солей при высоких параметрах состояния …….……. 185
Максудова А.Г., Дадаев Д.Х Теоретический расчет влияния примесей на межфазные явления при контактной плавке …….. 192
Ильясов Д.М., Дибиров Я.А. Аккумуляторы тепла с фазопереходно-теплоемкостными теплонакопителями для отопления и горячего водоснабжения…… 196
Куртынов С.Е., Ильин Р.А. Совместная работа котельной установки с возобновляемыми источниками тепловой энергии …… 203
*Меджидов А.А.*Перспективы вовлечения ресурсов низкопотенциальных термальных вод в топливно-энергетический баланс Юга России …… 207
Рафикова Ю.Ю., Тетерина Н.В. Геоинформационное картографирование ресурсов геотермальной энергии …….. 214
Маммаев Б.О., Маммаев О.А. Оценка теплоэнергетического потенциала геотермальных ресурсов осадочной толщи …… 219
Муфараджев К.К, Кобзаренко Д.Н. Разработка модуля расчета трехмерного распределения температурного поля …….. 224
Гаджимурадов Р.Н. Разработка модуля вычисления регулярной сети распределения продолжительности солнечного сияния на основе данных с метеостанций ……. 229
Алибеков Д.М. Технология освоения петротермальной энергии …….. 234
Шапиев Г.Ш. Обзор технических схем и перспективы использования солнечной энергии ……..... 238
Сулейманов М.Ж., Ефимов Д.В. Сертификация солнечных коллекторов в мире …….. 243
Искендеров Э.Г., Зейналов М.Ш., Арбуханова П.А., Милихин И.А. Солнечная водонагревательная установка на основе параболоцилиндрического концентратора …… 248
Камилова А.М. Распределение удельной мощности и удельной энергии ветрового потока на территории Дагестана …… 252
Спицина С.В. Оценка ресурсов биомассы Республики Дагестан …… 256
Магомедова Н.А, Цапиева О.К. Механизмы, формы и методы стимулирования включения экологически безопасных источников энергии в энергетическую инфраструктуру региона ……... 259
Магомедов И.Ш. Разработка и создание демонстрационной зоны экологически безопасных источников энергии в энергетическую инфраструктуру региона…… 268

Мамаев К.Ш., Шабанова З.Э., Каймаразов А.Г. Перспективы освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Кизлярского района Дагестана……. 275
Кунжуева К.Г. Электросорбция ионов цезия при анодной поляризации активированных углей…….. 281

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

Махмудова М.М., Рамазанов М.М. Стационарная конвекция околокритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом тонком кольцевом цилиндре в теплопроводном пространстве ……. 287
*Шабанова М.Р., Ахмедов Э., Ахмедова Г.М.*Расчет температуропроводности верхних слоев Земли по экспериментальным данным распределения температуры в геотермальных скважинах……... 296
Мирошник О.О., Кирюхин А. В., Рычкова Т.В. Численное термогидродинамическое моделирование при анализе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения ……... 300
Тарасова В.И. Особенности развития ветровой энергетики в южных регионах России и в Автономной Республике Крым: сравнительный анализ …… 301
Зейналов М.Ш., Алхасов Б.А., Вердиева З.Н., Саидова С.К., Вердиев Н.Н. Теплоаккумулирующие материалы на основе эвтектических смесей солевых систем ……. 307
Мамаев Г.С., Камалутдинова И.А., Каймаразов А.Г., Апандиев Р.Б. Перспективы освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Тарумовского района Дагестана …….. 309
Азизов А.А., Омарова С.О., Исаханова А.Т. Исследование сорбции ионов мышьяка из подземных вод природной глиной ……. 315
Атаев Д.Р., Рамазанов А.Ш. Извлечение лития из природных вод Республики Дагестан с решением некоторых экологических проблем ……..…….. 318
Гусейнов У.М., Омарова З.М., Гусейнов М.А. Фотоэлектрохимическое окисление сероводорода в природной воде …….. 321
Мамаева А.С., Ахмедов Г.Я. О влиянии теплопередачи на отложение твердой фазы карбоната кальция на теплообменной поверхности …… 325
Мкртумян А.В. , Магомедов А.М. Состояние альтернативной энергетики в Дагестане……. 331
Ахмедов М.М., Ахмедов К.М. Определение гидродинамических параметров продуктивных горизонтов Тарумовского месторождения геотермальных вод Республики Дагестан……... 337
Сулейманов М.Ж. Использование возобновляемых источников энергии на Олимпийских играх…… 346

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

(материалы IV Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна)

Редактор А.Б. Алхасов
Технический редактор Р.Н.Гаджимурадов

Формат 60х84 1/8 . Бумага офсетная № 1. Гарнитура "Таймс".
Печать офсетная. Усл. п. л. 35. Тираж 100 экз.

Учреждение Российской академии наук
Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН
367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, 39а

ИП Овчинников, типография АЛЕФ,
г.Махачкала, Дахадаева, 21.
Тел. 8-928-264-88-64, 8-903-477-55-64