

Российская академия наук

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ГЕОТЕРМИИ ДНЦ РАН

УДК 550.361, 621.482  
№ госрегистрации  
01201360109  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института  
д-р техн. наук

\_\_\_\_\_ А.Б.Алхасов  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЭФФЕКТИВНОГО  
ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ  
(промежуточный)

Зам. директора по  
научной работе

\_\_\_\_\_ О.М.Рамазанов  
подпись, дата

Руководитель темы,  
зав.лаб. энергетики  
д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_ А.Б.Алхасов  
подпись, дата

Махачкала 2018

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
зав.лаб. энергетики  
д.т.н., проф.

А.Б.Алхасов (главы 1-5)

### Исполнители темы:

г.н.с., д.т.н.

М.Г.Вердиев (глава 3)

в.н.с., д.т.н.

Д.К.Джаватов (глава 2)

г.н.с., д.б.н.

Э.Ш.Исмаилов (глава 4)

зав.лаб., к.т.н.

Д.А.Алхасова (глава 1)

в.н.с., к.х.н.

Г.А.Рабаданов (глава 4)

г.н.с., д.т.н.

Р.М.Алиев (глава 5)

с.н.с., к.т.н.

Г.М.Абасов (глава 2)

с.н.с.

Г.Б.Бадавов (глава 5)

вед. спец.

Б.А.Алхасов (глава 4)

вед. спец.

А.А.Азизов (глава 2)

## РЕФЕРАТ

Отчет 68 с., 5 г., 4 рис., 13 табл., 49 ист.

Ключевые слова: геотермальная энергия, тепло сухих горных пород высокого потенциала, внутрискважинный теплообменник, оценка тепломассопереноса, геотермальная скважина, нагнетательная скважина, добычная скважина, горизонтальная скважина, геотермальная циркуляционная система, критическая температура, теплообменник, испаритель, перегреватель, турбина, генератор, конденсатор, термальная вода, геотермально-парогазовая энергоустановка, диспергирование жидкости в электрическом поле, испарение и конденсация воды, интенсификация процессов испарения, извлечение составных компонентов из воды, свободная поверхность испарения, заряженные частицы дисперсного потока, Кулоновская сила, биотехнологический реагент, ароматические кислоты, высокомолекулярные спирты, сложные эфиры.

Общая характеристика отчета.

В настоящем отчете приводятся основные результаты исследований по теме "Исследования по разработке технологий эффективного освоения геотермальной и сопутствующих видов энергии". Исследования проводились по следующим направлениям темы:

- Разработка технологии комбинированной геотермально-парогазовой энергоустановки.

- Исследование процессов съема тепла в глубоких скважинах с окружающей горной породы и оптимизация режимов эксплуатации скважин-теплообменников.

- Разработка эффективной технологической схемы ГеоЭС с оптимальными режимно-конструкционными параметрами.

- Оценка эффективности воздействия электрического поля на испарительно – конденсационный метод очистки воды.

- Разработка технологии глубокой переработки тяжелой нефти и природного битума использованием биокаталитических реагентов, получаемых в процессе переработки углеводной растительной биомассы.

- Оценка энергетического потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан

Среди рассмотренных вопросов можно выделить следующие:

- Разработана технология комбинированной геотермально-парогазовой энергоустановки. Показано, что использование данной технологии позволит вовлечь среднепотенциальные термальные воды для выработки электроэнергии и с высокой

эффективностью утилизировать тепло выхлопных газов газотурбинной электростанции (ГТЭС).

- Исследования процесса съема тепла в глубоких скважинах-теплообменниках. Проведены многовариантные оптимизационные расчеты. Показано, что установка глубоких скважинных теплообменников в областях с высоким геотермическим градиентом оправдана с учетом их достаточно высокой тепловой производительности при данных условиях.

- Исследования по разработке эффективной технологической схемы геотермальной электростанции (ГеоЭС) с оптимальными режимно-конструкционными параметрами. Показано, что для каждого значения дебита существует критическая температура закачиваемого теплоносителя, причем с увеличением дебита значение этой температуры падает. Для геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) с вертикальными скважинами значение критической температуры зависит от мощности пласта, чем больше мощность, тем выше значение критической температуры и значение максимального допустимого дебита.

- Исследования по оценке эффективности воздействия электрического поля на испарительно – конденсационный метод очистки воды. Показано, что скорость конденсации электрозаряженного дисперсного потока частиц в электрическом поле возрастает более чем в два раза за счет действия на частицы кулоновских сил, направленных нормально к поверхности конденсации.

- Исследования по разработке научных основ новой технологии, где используется дешевый биотехнологический реагент, полученный спиртовым брожением свекловичной патоки. Показано возможность увеличения выхода светлых фракций углеводов при использовании полученного реагента.

- Оценка энергетического потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан (РД). Показано, что РД: не располагает значительными запасами классических видов органического топлива (нефть, уголь, газ) и вынуждена до 70% потребляемых энергоресурсов ввозить из других регионов; обладает громадным экономическим потенциалом ВИЭ, составляющим суммарно 39 млрд. кВтч/год и 148 млн. Гкал/год.

Возможные области применения результатов:

- Геотермальные ресурсы, освоенные с использованием разработанных технологий, могут быть использованы как для нужд электроэнергетики, так и для нужд теплофикации.

- Полученные результаты найдут применение при разработке: технологии снижения энергоемкости процесса выпаривания воды в различных производственных процессах, систем парового отопления, технологии извлечения составных компонентов из морской и геотермальной воды, промышленных установок нанесения пленок различных веществ на всевозможные поверхности, установок получения nano порошков некоторых веществ и интенсификации процессов охлаждения тепловыделяющих элементов различного энергетического оборудования.

- Полученные результаты найдут применение в трансформации биомассы растительной целлюлозы в энергоносители.

- Полученные в результате исследования выводы могут использоваться государственными регулирующими органами, занимающиеся решением проблем развития энергетики региона и оптимизацией структуры его энергобаланса с целью повышения энергобезопасности.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	7
Глава 1. Разработка технологий эффективного освоения среднепотенциальных термальных вод для выработки электроэнергии.....	10
1.1. Разработка технологии комбинированной геотермально-парогазовой энергоустановки.....	10
1.2. Исследование процессов съема тепла в глубоких скважинах с окружающей горной породы и оптимизация режимов эксплуатации скважин- теплообменников.....	11
Литература к главе 1 .....	14
Глава 2. Разработка эффективной технологической схемы ГеоЭС с оптимальными режимно-конструкционными параметрами .....	16
Литература к главе 2 .....	24
Глава 3. Оценка эффективности воздействия электрического поля на испарительно – конденсационный метод очистки воды.....	25
Литература к главе 3 .....	36
Глава 4. Разработка технологии глубокой переработки тяжелой нефти и природного битума использованием биокаталитических реагентов, получаемых в процессе переработки углеводной растительной биомассы.. .....	38
Литература к главе 4 .....	45
Глава 5. Оценка энергетического потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан .....	46
Литература к главе 5 .....	59
Заключение .....	60
Список опубликованных работ .....	62

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетика на современном этапе характеризуется увеличением доли ресурсосберегающих экологически эффективных технологий, к которым относятся и технологии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Со временем роль возобновляемой энергии будет все время возрастать, что позволит решить многие проблемы в будущем.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов представляет собой одну из глобальных мировых проблем, успешное решение которой будет иметь определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды обитания. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергосберегающих технологий, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

Несмотря на то, что современная энергетика в основном базируется на невозобновляемых источниках энергии (около 80% в мировом энергетическом балансе составляют нефть, газ и каменный уголь), интерес к возобновляемым источникам энергии неуклонно растет. Главными аргументами для использования ВИЭ являются высокая цена традиционного топлива, энергетическая безопасность для стран-импортеров нефти и газа и проблемы охраны окружающей среды.

В настоящее время в мире заметно повысилось внимание к использованию возобновляемых источников энергии. Вклад ВИЭ в глобальное потребление энергии приблизился к 10%. Доля ВИЭ в энергобалансе отдельных стран уже сегодня достигает заметных уровней. Так в Германии она равна 25%, в США, Китае и Индии - 12%, а в Дании только одна ветровая энергетика обеспечивает 26% потребностей страны. В России доля ВИЭ в энергобалансе остается пока ничтожной и не превышает 0,8%. Госпрограмма по энергоэффективности ставит задачу к 2020 г. довести эту долю до 2,5%.

Одним из перспективных видов ВИЭ является геотермальная энергия. Энергетические технологии с использованием геотермальных ресурсов отличаются экологической чистотой и по эффективности приближаются к традиционным. На современном этапе развития техники и технологий освоения геотермальной энергии масштабы ее практического использования определяются величиной гидрогеотермальных ресурсов. Дальнейшее эффективное освоение ресурсов геотермальной энергии связано с освоением петротермальных ресурсов, на долю которых приходится около 99 % из пригодных для использования геотермальных ресурсов. Практическое использование их огромных запасов связано с необходимостью решения ряда сложных научно-технических проблем. Решение этих проблем связано с созданием в горных породах искусственных

систем извлечения тепла - циркуляционных систем, тепловых котлов повышенной проницаемости. Глобальное освоение геотермальных ресурсов возможно лишь при освоении колоссальных запасов петротермальной энергии. Создание технологий, сочетающих в себе условия для эффективного освоения тепла сухих горных пород, позволит более эффективно осваивать огромные запасы петротермальной энергии.

Освоение тепла сухих горных пород низкого потенциала с небольших глубин возможно с использованием скважинного теплообменника (СТО) в комбинации с тепловыми насосами, освоение высокопотенциального тепла возможно с применением глубоких СТО. Исследован процесс съема тепла в глубоких скважинах-теплообменниках. С использованием разработанных математических моделей, описывающих процесс теплопереноса в глубоких СТО для различных значений глубин теплообменника, геотермического градиента, теплопроводности горных пород, расходов теплоносителей, проведены многовариантные оптимизационные расчеты, которые позволили 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.

В ходе проведения исследований показано, что наиболее перспективным является использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов в комбинированных геотермально-парогазовых энергоустановках (ГПЭ), имеющих преимущества и возобновляемых источников и ископаемых топлив. В ГПЭ выхлопные газы газотурбинной электростанции (ГТЭС) используются для испарения и перегрева рабочего агента, циркулирующего в контуре паротурбинного блока ГеоЭС. Нагрев до температуры испарения низкокипящего рабочего агента в ГеоЭС осуществляется за счет термальной воды, циркулирующей в контуре геотермальной циркулирующей системе (ГЦС). В ГПЭ температура отработанной термальной воды снижается до довольно низкого значения, отличающегося от температуры конденсации рабочего агента на величину температурного напора в теплообменнике. Использование геотермально-парогазовой технологии позволяет вовлечь среднепотенциальные термальные воды для выработки электроэнергии и с высокой эффективностью утилизировать тепло выхлопных газов ГТЭС.

Практически во всех континентах земного шара, ощущается проблема острой нехватки питьевой и технической воды. В работе описывается метод интенсификации и снижения энергоемкости процесса очистки воды путем ее испарения и конденсации в электрическом поле. Для этого используется метод диспергирования жидкостей в высокопотенциальном электрическом поле. В процессе испарения степень устойчивости частиц дисперсных потоков снижается за счет действия кулоновских сил отталкивания



одноименно заряженных молекул воды, а при конденсации пара их действие снижает сопротивление диффузионного слоя неконденсирующихся газов. В работе рассматриваются пути снижения энергоемкости процесса испарения жидкостей с использованием высокопотенциального электрического поля. Процесс диспергирования в предлагаемом методе осуществляется с вершины конуса Тейлора, образующегося на конце электропроводного капилляра в электрическом поле с потенциалом заключенном в интервале  $(2, 5 - 15) \cdot 10^3 \text{ В}$ .

Одной из глобальных проблем современного человеческого общества является проблема получения питьевой и технической воды. Практически во всех регионах имеются достаточные запасы: речной, артезианской, геотермальной, и морской воды, но она, зачастую включая речную, не пригодна для употребления в быту, для использования во многих промышленных технологиях и на объектах агропромышленного комплекса. Кроме того, во всем мире все больше и больше ощущаются проблемы, связанные с истощением природных запасов полезных ископаемых, тогда как морская, геотермальная и артезианская вода практически содержит все элементы таблицы Менделеева. Такое положение дел требует объединения и совместного решения этих проблем путем разработки: экологически чистых, высокопроизводительных, энергосберегающих, промышленных технологий очистки: артезианской, геотермальной и морской воды, путем извлечения из нее составных компонентов в том числе органической составляющей.

Поэтому проблема очистки: геотермальной, артезианской и морской воды останется актуальной во все времена, мало того, она будет обостряться с ростом: населения планеты, степени истощения природных запасов полезных ископаемых и ежегодным ухудшением экологической ситуации из-за катастрофического повышения вредных выбросов в окружающую среду. В работе предложен способ снижения энергоемкости технологического процесса очистки воды методом ее выпаривания и последующей конденсации в высокопотенциальном электрическом поле. Такая технология очистки позволяет одновременно извлечь из воды практически все составные ее компоненты в сухом или обогащенном, до максимальной степени, виде.

Для переработки высоковязкой сернистой нефти в работе предложена новая технология, где используется дешевый биотехнологический реагент, полученный спиртовым брожением свекловичной патоки

# РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ДОБЫЧЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ

## Глава 1

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ЭФФЕКТИВНОГО ОСВОЕНИЯ СРЕДНЕПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

1.1. Разработка технологии комбинированной геотермально-парогазовой энергоустановки.

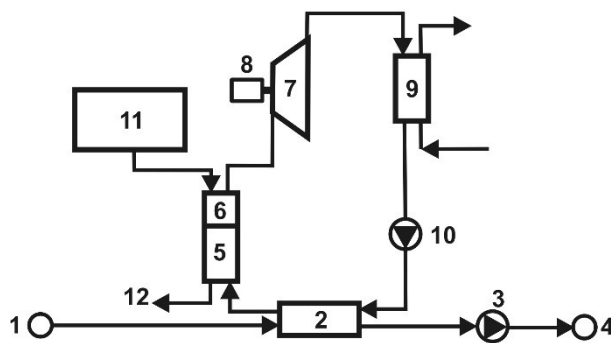


Рис. 1.1. Комбинированная геотермально-парогазовая энергоустановка.

1 – геотермальная скважина; 2 – теплообменник; 3 – насосная станция закачки; 4 – нагнетательная скважина; 5 – испаритель; 6 – перегреватель; 7 – турбина; 8 – генератор; 9 – конденсатор; 10 – циркуляционный насос контура ПТУ; 11 – ГТЭС; 12 – отработанные выхлопные газы;

Наиболее перспективным является использование среднетемпературных геотермальных ресурсов в комбинированных геотермально-парогазовых энергоустановках (ГПЭ), имеющих преимущества и возобновляемых источников и ископаемых топлив. В ГПЭ (рис. 1.1) выхлопные газы газотурбинной электростанции (ГТЭС) используются для испарения и перегрева рабочего агента, циркулирующего в контуре паротурбинного блока ГеоЭС. Нагрев до температуры испарения низкокипящего рабочего агента в ГеоЭС осуществляется за счет термальной воды, циркулирующей в контуре ГЦС. В ГПЭ температура отработанной термальной воды снижается до довольно низкого значения, отличающегося от температуры конденсации рабочего агента на величину температурного напора в теплообменнике. Использование геотермально-парогазовой технологии позволяет вовлечь среднетемпературные термальные воды для выработки электроэнергии и с высокой эффективностью утилизировать тепло выхлопных газов ГТЭС.

Тернаирское месторождение является наиболее перспективным для строительства ГПЭ. Производительность термоводозабора составляет 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут, средняя устьевая температура термальной воды 100 °С. Для добычи воды пробурены 8 эксплуатационных скважин проектной производительностью 2500 м<sup>3</sup>/сут. каждая. Содержание сопутствующих углеводородных газов в добываемой воде составляет до 2.0 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> с преобладанием метана до 94 %, остальные газы – тяжелые углеводороды, азот и углекислота. В настоящее время месторождение осваивается крайне не эффективно, эксплуатируются только 2 скважины в отопительный период, блок по обесфеноливанью выведен из эксплуатации, а отделенный в сепараторе газ не используется и сжигается в факеле. После передачи теплового потенциала пресной водопроводной воде отработанные термальные воды с температурой 60 °С сбрасываются в дренажный канал. По оценочным расчетам общая мощность энергоустановок на основе технологии на рис.1.1 и полном использовании ресурсного потенциала месторождения может достигать до 60 МВт(э).

Строительство геотермально-парогазовых установок позволит эффективно 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.

1.2. Исследование процессов съема тепла в глубоких скважинах с окружающей горной породы и оптимизация режимов эксплуатации скважин-теплообменников.

Проведены исследования процессов съема тепла в глубоких скважинах с окружающей горной породы и оптимизация режимов эксплуатации скважин-теплообменников.

Проведена оценка эффективности использования глубоких скважинных теплообменников для извлечения тепла горных пород высокого потенциала. Освоение тепла сухих горных пород низкого потенциала с небольших глубин возможно с использованием скважинного теплообменника (СТО) в комбинации с тепловыми насосами, освоение высокопотенциального тепла горных пород возможно с применением глубоких СТО [1], конструкция которого представлена на рис. 1.2.

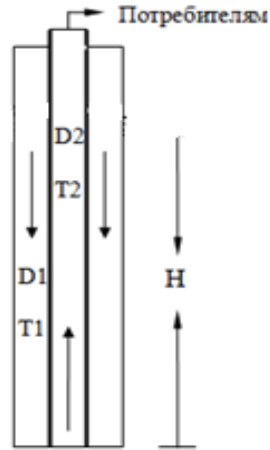


Рис. 1.2 – Схема вертикального СТО

Выражения для тепловых потоков от горной породы в кольцевой зазор, а также из внутренней трубы в кольцевой зазор (1.1) получены с учетом теплового сопротивления, оказываемого температурным пристеночным слоем, образующимся на поверхностях труб. Толщины его зависят от числа Нуссельта для трубы и кольца. Как показали расчеты, эти толщины малы в сравнении с радиусами труб.

$$q_{T1} = \frac{2\pi(T_G - T_1)}{\frac{1}{\lambda_B} \ln \frac{R_1^i}{R_1^e - \delta_{T1}} + \frac{1}{\lambda_M} \ln \frac{R_1^e}{R_1^i} + \frac{1}{\lambda_G} \ln \frac{R(t)}{R_1^e}}$$

$$q_{T2} = \frac{2\pi(T_2 - T_1)}{\frac{1}{\lambda_B} \ln \frac{R_2^i}{R_2^e - \delta_{T2}} + \frac{1}{\lambda_M} \ln \frac{R_2^e}{R_2^i} + \frac{1}{\lambda_{из}} \ln \frac{R_2^e + \delta_{из}}{R_2^e} + \frac{1}{\lambda_B} \ln \frac{R_2^e + \delta_{из} + \delta_{T1}}{R_2^e + \delta_{из}}}, \quad (1.1)$$

где  $z$  – вертикальная координата, направленная вниз;  $R_1^i, R_1^e$  – внутренний и внешний радиусы обсадной трубы;  $R_2^i, R_2^e$  – внутренний и внешний радиусы внутренней трубы;  $R(t)$  – условный радиус температурного влияния скважины;  $H$  – глубина теплообменника;  $G$  – геотермический градиент;  $\lambda_B, \lambda_M, \lambda_G, \lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности воды, металла, горной породы, изоляционного материала на поверхности внутренней трубы;  $\delta_{T2}$  – толщина температурного пристеночного слоя на внутренней поверхности внутренней трубы;  $\delta_{T1}$  – толщина температурного пристеночного слоя на наружной поверхности внутренней трубы и внутренней поверхности обсадной

трубы;  $\delta_{из}$  – толщина изоляции.

Проведенные расчеты с использованием полученных математических моделей, описывающих процесс теплопереноса в глубоких СТО для различных значений глубин теплообменника, геотермического градиента, теплопроводности горных пород, расходов теплоносителей позволили 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 тепловой мощности. Согласно расчетам, максимальный прирост температуры ( $70^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается при небольшом расходе воды ( $500 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) при геотермическом градиенте  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{м}$ , теплопроводности горных пород  $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$  и глубине теплообменника  $5 \text{ км}$ . При геотермическом градиенте равном  $0,03^{\circ}\text{C}/\text{м}$  и неизменности остальных значений параметров системы прирост температуры равен  $35^{\circ}\text{C}$ . При больших расходах значительного прироста не наблюдается.

Окончательный выбор эксплуатационных характеристик системы по съему тепла сухих горных пород зависит от технико-экономического обоснования с учетом капитальных и эксплуатационных затрат. С увеличением глубины скважины-теплообменника наряду с ростом извлекаемой тепловой мощности увеличиваются капитальные затраты, возрастают и эксплуатационные затраты, связанные с прокачкой теплоносителя.

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 1

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.:Физматлит. 2008 г. 376 с.
2. Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Алхасова Д.А., Каймаразов А.Г., Рамазанов М.М. Освоение низкопотенциального геотермального тепла. М.:Физматлит. 2012 г. 276 с.
3. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Перспективы освоения геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья. // Юг России: экология, развитие. 2013. №3. С.17-26.
4. Алхасова Д.А. Разработка технологий эффективного освоения петротермальной энергии. Материалы Научной сессии Института проблем геотермии, посвященной Дню российской науки. Махачкала 2014. Выпуск 3. с.12-17.
5. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северокавказского региона. // Теплоэнергетика, 2014, № 6, с.28-34.
6. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов. // Известия РАН. Энергетика, № 5, 2014, с. 144-157
7. Алхасова Д.А. Разработка эффективных технологий освоения петротермальной энергии. // Материалы 2 Межд. форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR – 2014», М., 2014, с. 50-56.
8. Алхасова Д.А. Разработка эффективных технологий освоения петротермальной энергии для выработки электроэнергии. // Материалы Международного Конгресса «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность», Москва, 2015. с. 46-50.
9. Алхасова Д.А. Разработка технологий освоения геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии. // Материалы IV Междун. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы», Махачкала, 2015. Том 1, вып.5.с. 322-326 .
10. Алхасова Д.А. Разработка энергоэффективных технологий извлечения и использования петротермальной энергии для электроэнергетических нужд. // Материалы Международного Конгресса REENCON XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность». Москва. 2016. С. 86-90.
11. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алиев Р.М., Рамазанов А.Ш. Комплексное освоение геотермальных ресурсов. // Юг России: экология, развитие. 2016. Т.11. №1. С.149-158.

12. Алхасова Д.А. Разработка технологий освоения тепла сухих горных пород высокого потенциала для выработки электроэнергии // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и современной науки: теория и практика актуальных исследований» посвященной 80-летию Магомедова М-К.М. 19 - 21 октября 2016.

## Глава 2

### РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЕОЭС С ОПТИМАЛЬНЫМИ РЕЖИМНО-КОНСТРУКЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Бурение горизонтальных скважин стало одним из наиболее важных достижений современной нефтегазодобычи. Многократно увеличивая площадь фильтрации флюида через стенки скважины, приводящее к уменьшению градиентов давления и скоростей притока флюида в пристволенной зоне скважины, горизонтальное бурение способно многократно увеличить производительность скважин по сравнению с вертикальными скважинами.

Проблема использования горизонтальных скважин приобретает особую актуальность при разработке геотермальных месторождений, где интенсификация добычи термальной воды является одним из основных способов улучшения технико-экономических показателей геотермального производства и повышения конкурентоспособности геотермальной отрасли по сравнению с традиционными энергетическими отраслями.

Важное значение, в вопросах практического использования геотермальной энергии, получаемой на основе геотермальной циркуляционной системы (ГЦС), имеет доля энергетических затрат на закачку в общей массе энергии, получаемой ГЦС. Когда полезная энергия, получаемая в результате эксплуатации ГЦС, будет равна или меньше энергии на обратную закачку теплоносителя, эксплуатация ГЦС становится неэффективной. В связи с чем, становится актуальной проблема правильного выбора технологических параметров ГЦС, обеспечивающих ее эффективную эксплуатацию. Одним из таких параметров является температура закачиваемого в пласт теплоносителя.

$$T_1(z) = T_y \cdot e^{-Az} + \Gamma \cdot z + (T_0 - \frac{\Gamma}{A}) \cdot (1 - e^{-Az}), \quad (2.1)$$

$$A = \frac{2 \cdot K \cdot \pi \cdot r_H}{c_H \cdot Q},$$

где  $z$  – вертикальная координата, абсолютная глубина в метрах;  $T_0$  – температура пород нейтрального слоя, °С;  $Q$  – массовый дебит ГЦС, кг/с;  $r_H$  – радиус нагнетательной скважины, м;  $c_H$  – теплоемкость нагнетаемого теплоносителя, Дж/(кг·°С);  $\Gamma$  – геотермический градиент, °С/м;  $K$  – коэффициент теплопередачи от потока теплоносителя к окружающим нагнетательную скважину горным породам, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Изменение температуры закачиваемого теплоносителя в зависимости от глубины  $z$



при различных значениях температуры  $T_{ny}$  и дебита  $Q$  в соответствии с зависимостью (2.1) показано в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Результаты расчетов изменения температуры закачиваемого теплоносителя в зависимости от глубины  $z$  при различных значениях  $T_{ny}$  и дебита  $Q$   
( $T_0=10$  °С,  $\Gamma=0,045$  °С/м,  $r_H=0,01$  м).

z, м	$T_1, \text{°C} (T_{ny}=20 \text{ °C})$				$T_1, \text{°C} (T_{ny}=30 \text{ °C})$			
	$Q=0,05$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,15$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,25$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,35$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,05$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,15$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,25$ м <sup>3</sup> /с	$Q=0,35$ м <sup>3</sup> /с
10	19,88	19,96	19,98	19,98	29,76	29,92	29,95	29,97
50	19,48	19,82	19,89	19,92	28,90	29,62	29,77	29,84
100	19,13	19,70	19,82	19,87	27,99	29,30	29,58	29,70
500	21,07	20,30	20,17	20,12	26,55	28,47	29,03	29,29
1000	31,84	24,63	22,87	22,08	34,85	31,33	30,73	30,50
2000	66,89	42,61	34,76	30,94	67,84	47,12	40,95	38,04
3000	108,91	69,52	53,73	45,51	109,25	72,58	58,64	51,52
4000	153,02	102,41	78,27	64,90	153,17	104,52	82,18	69,99

Из таблицы 2.1 видно как меняется температура закачиваемого теплоносителя. Сначала наблюдается уменьшение, а затем рост температуры теплоносителя. Такая динамика более заметна для относительно невысоких значений дебита скважины.

Наличие значительных энергетических затрат на обратную закачку теплоносителя, является основным недостатком ГЦС. Эти затраты связаны с потерями энергетической мощности на обеспечение циркуляции по нагнетательной и добычной скважинах, наземных коммуникациях и фильтрации по пласту.

Рассмотрим ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами.

Мощность, затрачиваемая на обратную закачку теплоносителя  $N_H$ , зависит от многих технологических параметров ГЦС и параметров пласта:

$$N_H = Q \cdot \frac{\Delta P}{\rho_H}, \quad (2.2)$$

где  $\rho_H$  - плотность нагнетаемого теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  - давление нагнетания в циркуляционном контуре ГЦС, которое определяется выражением [1]:

$$\Delta P = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} + \Delta P_F + (\rho_D - \rho_H) \cdot g \cdot H, \quad (2.3)$$

где  $\Delta P_H$ ,  $\Delta P_D$ ,  $\Delta P_{HK}$  - соответственно гидравлические потери давления в нагнетательной и добычной скважинах, и наземных коммуникациях, Па;  $\Delta P_F$  - фильтрационные потери давления в пласте, Па;  $\rho_D$  - плотность теплоносителя в добычной скважине, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_H$  - плотность теплоносителя в нагнетательной скважине, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  - глубина скважины, м.

Гидравлические потери давления для ГЦС с горизонтальной нагнетательной и вертикальной добычной скважинами, и фильтрационные потери давления определяются

по формуле [1]:

$$\Delta P_{\Gamma} = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} = \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left[ \frac{\lambda_H \cdot H}{d_H^5 \cdot \rho_H} + \frac{\lambda_D \cdot (H + R)}{d_D^5 \cdot \rho_D} \right] + \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left[ \frac{\lambda_H \cdot a_H}{d_H^5 \cdot \rho_H} \right], \quad (2.4)$$

$$\Delta P_F = \frac{Q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot a_H \cdot \rho_H} \cdot \ln \left[ \frac{4 \cdot R^2}{d_H \cdot d_D} \right], \quad (2.5)$$

Для ГЦС с вертикальной нагнетательной и добычной скважинами гидравлические потери давления определяются по формуле, и фильтрационные потери давления определяются по формуле [2]:

$$\Delta P_{\Gamma} = \Delta P_H + \Delta P_D + \Delta P_{HK} = \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2} \cdot \left[ \frac{\lambda_H \cdot H}{d_H^5 \cdot \rho_H} + \frac{\lambda_D \cdot (H + R)}{d_D^5 \cdot \rho_D} \right], \quad (2.6)$$

$$\Delta P_F = \frac{Q \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h \cdot \rho_H} \cdot \left[ \ln \left[ \frac{R}{r_H} \right] + \ln \left[ \frac{R}{r_D} \right] \right], \quad (2.7)$$

где  $\lambda_H, \lambda_D$  - коэффициенты гидравлических потерь для нагнетательной и добычной скважин;  $R$  - расстояние между нагнетательной и добычной скважинами, м;  $\mu$  - динамическая вязкость закачиваемой воды, Па·с;  $k$  - проницаемость пласта, м<sup>2</sup>;  $h$  - мощность пласта, м;  $d_H, d_D$  - диаметры нагнетательной и добычной скважин, соответственно, м.

Из формул (2.4) - (2.7) следует, что давление нагнетания зависит от таких технологических параметров ГЦС как:  $\mu, d_H, d_D, Q$ .

Потери мощности на обратную закачку теплоносителя связаны с использованием электрической энергии. Коэффициент полезного действия, в существующих технологиях преобразования тепловой энергии в электрическую, составляет около 0,1 [3]. С учетом этого выражение (2.2) примет следующий вид:

$$N_H = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta \cdot \rho_H}, \quad (2.8)$$

где  $\eta$  - коэффициент полезного действия.

Энергетические затраты на обратную закачку будут зависеть от того с какой температурой  $T_{ny}$  теплоноситель будет закачиваться обратно в пласт. Это связано с тем, что важнейшая характеристика, определяющая фильтрационные потери давления в пласте  $\Delta P_F$  - вязкость  $\mu$ , имеет сильную температурную зависимость. В литературе имеется много формул такой зависимости, мы будем рассматривать следующую формулу [4]:

$$\mu(T) = \frac{35 + 0,7 \cdot C + 0,0227 \cdot C^2}{T_{nz} + 15,7} \cdot 10^{-3}, \quad (2.9)$$

$$C = 100\% \cdot \frac{M}{\rho_H}$$

где  $T_{нз}$  - температура теплоносителя на забое нагнетательной скважины, °С;  $C$  - концентрация солей в термальной воде, %;  $M$  - минерализация, г/л.

Полная мощность  $N_{пол}$  ГЦС равна:

$$N_{пол} = Q \cdot (c_D \cdot T_D - c_H \cdot T_H), \quad (2.10)$$

где  $c_D$  - теплоемкость теплоносителя в добычной скважине, Дж/(кг·°С);  $T_D$  - температура теплоносителя на входе в теплообменник, °С;  $T_H$  - температура теплоносителя на выходе из теплообменника, °С.

Важнейшим показателем эффективности эксплуатации ГЦС выступает температура, с которой закачивается теплоноситель обратно в пласт. При этом необходимо, чтобы получаемая полезная мощность была не меньше мощности, затрачиваемой на обратную закачку. Температуру закачиваемого теплоносителя на устье скважины, при которой мощность закачки теплоносителя будет равна полезной мощности, получаемой ГЦС, назовем критической.

Рассмотрим существование критической температуры и ее зависимость от параметров ГЦС.

Полезная мощность  $N_{п}$ , вырабатываемая ГЦС, определяется как разность между полной мощностью  $N_{пол}$  и мощностью, затрачиваемой на обратную закачку  $N_H$ :

$$N_{п} = N_{пол} - N_H = Q \left[ (c_D \cdot T_D - c_H \cdot T_H) - \frac{\Delta P}{\eta \cdot \rho_H} \right], \quad (2.11)$$

Для определения критической температуры закачиваемого теплоносителя были произведены расчеты для гипотетического месторождения со следующими параметрами:  $T_{пл} = 110$  °С,  $H = 2000$  м,  $R = 1000$  м,  $\Gamma = 0,03$  °С/м,  $T_0 = 10$  °С,  $M = 6$  г/л,  $k = 0,2 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>,  $\lambda = 0,03$ .

При проведении расчетов учитывалась температурная зависимость таких важных характеристик как плотность и теплоемкость теплоносителя [5]:

$$c(T) = T^2 \cdot 10^{-5} - 0,0014 \cdot T + 4,2, \quad (2.12)$$

$$\rho(T) = -2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0004 \cdot T + 1,0121, \quad (2.13)$$

Таблица 2.2

Расчетные значения, для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами, критической температуры  $T_{\text{нц}}$  при различных значениях дебита, мощности пласта и

радиуса нагнетательной  $r_n$  и добычной  $r_d$  **СКВАЖИН**

<b>r=0,09 м</b>				
Q, кг/с	$a_n=20$ м	$a_n=60$ м	$a_n=100$ м	$a_n=300$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$
40	<b>15,09</b>	<b>84,62</b>	<b>94,51</b>	<b>103,68</b>
60	0	<b>64,31</b>	<b>80,99</b>	<b>94,84</b>
80	0	0	<b>62,96</b>	<b>83,29</b>
100	0	0	<b>34,81</b>	<b>68,71</b>
130	0	0	0	<b>39,31</b>
<b>r=0,1 м</b>				
Q, кг/с	$a_n=20$ м	$a_n=60$ м	$a_n=100$ м	$a_n=300$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$
40	<b>23,53</b>	<b>86,97</b>	<b>96,74</b>	<b>105,9</b>
60	0	<b>70,36</b>	<b>86,24</b>	<b>99,81</b>
80	0	<b>46,19</b>	<b>73,28</b>	<b>92,2</b>
100	0	0	<b>56,01</b>	<b>82,91</b>
130	0	0	0	<b>65,27</b>
<b>r=0,11 м</b>				
Q, кг/с	$a_n=20$ м	$a_n=60$ м	$a_n=100$ м	$a_n=300$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$
40	<b>28,55</b>	<b>88,29</b>	<b>97,97</b>	<b>107,13</b>
60	0	<b>73,61</b>	<b>89,08</b>	<b>102,54</b>
80	0	<b>54,17</b>	<b>78,74</b>	<b>97,08</b>
100	0	0	<b>65,92</b>	<b>90,62</b>
130	0	0	<b>2,6</b>	<b>78,8</b>

\* - жирным цветом отмечены значения критической температуры.

Таблица 2.3

Расчетные значения, для ГЦС с вертикальными скважинами, критической температуры  $T_{\text{нц}}$  при различных значениях дебита, мощности пласта и радиуса нагнетательной  $r_n$  и добычной  $r_d$

**СКВАЖИН**

<b>r=0,09 м</b>					
Q, кг/с	$h=20$ м	$h=40$ м	$h=60$ м	$h=80$ м	$h=100$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$
40	<b>15,09</b>	<b>71,09</b>	<b>84,62</b>	<b>90,89</b>	<b>94,51</b>
60	0	<b>34,59</b>	<b>64,31</b>	<b>75,14</b>	<b>80,99</b>
80	0	0	<b>27,76</b>	<b>53,03</b>	<b>62,96</b>
100	0	0	0	0	<b>34,81</b>
130	0	0	0	0	0
<b>r=0,1 м</b>					
Q, кг/с	$h=20$ м	$h=40$ м	$h=60$ м	$h=80$ м	$h=100$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$
40	<b>23,53</b>	<b>73,79</b>	<b>86,97</b>	<b>93,15</b>	<b>96,74</b>
60	0	<b>44,48</b>	<b>70,36</b>	<b>80,61</b>	<b>86,24</b>
80	0	0	<b>46,19</b>	<b>64,6</b>	<b>73,28</b>
100	0	0	0	<b>39,82</b>	<b>56,01</b>
130	0	0	0	0	0
<b>r=0,11 м</b>					
Q, кг/с	$h=20$ м	$h=40$ м	$h=60$ м	$h=80$ м	$h=100$ м
	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{нц}}, ^\circ\text{C}$

40	<b>28,55</b>	<b>75,36</b>	<b>88,29</b>	<b>94,4</b>	<b>97,97</b>
60	0	<b>49,55</b>	<b>73,61</b>	<b>83,55</b>	<b>89,08</b>
80	0	0	<b>54,17</b>	<b>70,57</b>	<b>78,74</b>
100	0	0	0	<b>52,98</b>	<b>65,92</b>
130	0	0	0	0	<b>2,6</b>

\* - жирным цветом отмечены значения критической температуры.

Значения мощности нагнетания  $N_H$  и полезной мощности  $N_P$  для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами, и для ГЦС с вертикальными скважинами показаны в таблицах 2.4-2.5.

Таблица 2.4

Расчетные значения, для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами, мощности нагнетания и полезной мощности ГЦС для найденных значений критической температуры при различных значениях дебита, мощности пласта и радиуса нагнетательной  $r_n$  и добычной  $r_d$  скважин

r=0,09 м								
Q, кг/с	a <sub>н</sub> =20 м		a <sub>н</sub> =60 м		a <sub>н</sub> =100 м		a <sub>н</sub> =300 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>7,91</b>	<b>7,91</b>	<b>2,14</b>	<b>2,14</b>	<b>1,31</b>	<b>1,31</b>	<b>0,54</b>	<b>0,54</b>
60	23,29	4,21	<b>5,74</b>	<b>5,74</b>	<b>3,66</b>	<b>3,66</b>	<b>1,92</b>	<b>1,92</b>
80	47,79	-11,12	<b>13,71</b>	<b>13,71</b>	<b>7,88</b>	<b>7,88</b>	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>
100	83,31	-37,47	31,43	14,41	<b>15,67</b>	<b>15,67</b>	<b>8,66</b>	<b>8,66</b>
130	159,45	-99,86	61,85	-2,26	42,35	17,24	<b>19,16</b>	<b>19,16</b>
r=0,1 м								
Q, кг/с	a <sub>н</sub> =20 м		a <sub>н</sub> =60 м		a <sub>н</sub> =100 м		a <sub>н</sub> =300 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>7,2</b>	<b>7,2</b>	<b>1,94</b>	<b>1,94</b>	<b>1,12</b>	<b>1,12</b>	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>
60	21,48	6,02	<b>4,99</b>	<b>4,99</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>
80	43,91	-7,24	<b>10,65</b>	<b>10,65</b>	<b>6,17</b>	<b>6,17</b>	<b>3,01</b>	<b>3,01</b>
100	76,36	-30,53	27,31	18,53	<b>11,29</b>	<b>11,29</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>
130	145,85	-86,26	53,34	6,25	34,85	24,74	<b>12,18</b>	<b>12,18</b>
r=0,11 м								
Q, кг/с	a <sub>н</sub> =20 м		a <sub>н</sub> =60 м		a <sub>н</sub> =100 м		a <sub>н</sub> =300 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>6,79</b>	<b>6,79</b>	<b>1,83</b>	<b>1,83</b>	<b>1,02</b>	<b>1,02</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>
60	20,12	7,38	<b>4,58</b>	<b>4,58</b>	<b>2,65</b>	<b>2,65</b>	<b>0,95</b>	<b>0,95</b>
80	41	-4,33	<b>9,33</b>	<b>9,33</b>	<b>5,26</b>	<b>5,26</b>	<b>2,19</b>	<b>2,19</b>
100	71,21	-25,38	24,6	21,23	<b>9,24</b>	<b>9,24</b>	<b>4,09</b>	<b>4,09</b>
130	135,88	-76,29	47,84	11,74	<b>29,08</b>	<b>29,08</b>	<b>8,53</b>	<b>8,53</b>

\* - жирным цветом отмечены значения мощности нагнетания и полезной мощности для найденных значений критической температуры.

Таблица 2.5

Расчетные значения, для ГЦС с вертикальными скважинами, мощности нагнетания и полезной мощности ГЦС для найденных значений критической температуры при различных значениях дебита, мощности пласта и радиуса нагнетательной  $r_n$  и добычной  $r_d$  скважин

<b>r=0,09 м</b>										
Q, кг/с	h=20 м		h=40 м		h=60 м		h=80 м		H=100 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>7,91</b>	<b>7,91</b>	<b>3,27</b>	<b>3,27</b>	<b>2,14</b>	<b>2,14</b>	<b>1,61</b>	<b>1,61</b>	<b>1,31</b>	<b>1,31</b>
60	23,29	4,21	<b>9,43</b>	<b>9,43</b>	<b>5,74</b>	<b>5,74</b>	<b>4,39</b>	<b>4,39</b>	<b>3,66</b>	<b>3,66</b>
80	47,79	-11,12	25,14	11,52	<b>13,71</b>	<b>13,71</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>7,88</b>	<b>7,88</b>
100	83,31	-37,47	44,39	1,44	31,43	14,41	24,95	20,89	<b>15,67</b>	<b>15,67</b>
130	159,45	-99,86	86,24	-26,66	61,85	-02,26	49,66	9,93	42,35	17,24
<b>r=0,1 м</b>										
Q, кг/с	h=20 м		h=40 м		h=60 м		h=80 м		H=100 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>7,2</b>	<b>7,2</b>	<b>0,304</b>	<b>0,304</b>	<b>0,194</b>	<b>0,194</b>	<b>0,142</b>	<b>0,142</b>	<b>0,112</b>	<b>0,112</b>
60	21,48	6,02	<b>0,82</b>	<b>0,82</b>	<b>0,499</b>	<b>0,499</b>	<b>0,371</b>	<b>0,371</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>
80	43,91	-07,24	2,251	1,416	<b>1,065</b>	<b>1,065</b>	<b>0,761</b>	<b>0,761</b>	<b>0,617</b>	<b>0,617</b>
100	76,36	-30,53	3,957	0,627	2,731	1,853	<b>1,463</b>	<b>1,463</b>	<b>1,129</b>	<b>1,129</b>
130	145,85	-86,26	7,646	-1,687	5,334	0,625	4,178	1,781	3,485	2,474
<b>r=0,11 м</b>										
Q, кг/с	h=20 м		h=40 м		h=60 м		h=80 м		H=100 м	
	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт	N <sub>н</sub> , МВт	N <sub>п</sub> , МВт
40	<b>6,79</b>	<b>6,79</b>	<b>2,91</b>	<b>2,91</b>	<b>1,83</b>	<b>1,83</b>	<b>1,32</b>	<b>1,32</b>	<b>1,02</b>	<b>1,02</b>
60	20,12	7,38	<b>7,57</b>	<b>7,57</b>	<b>4,58</b>	<b>4,58</b>	<b>3,34</b>	<b>3,34</b>	<b>2,65</b>	<b>2,65</b>
80	41	-4,33	20,68	15,99	<b>9,33</b>	<b>9,33</b>	<b>6,62</b>	<b>6,62</b>	<b>5,26</b>	<b>5,26</b>
100	71,21	-25,38	36,25	9,58	24,6	21,23	<b>11,92</b>	<b>11,92</b>	<b>9,24</b>	<b>9,24</b>
130	135,88	-76,29	69,85	-10,26	47,84	11,74	36,84	22,74	<b>29,08</b>	<b>29,08</b>

\* - жирным цветом отмечены значения мощности нагнетания и полезной мощности для найденных значений критической температуры.

Из таблиц 2.2-2.3 наглядно видно, существование критической температуры. Повышение температуры закачиваемого теплоносителя выше этого значения делает эксплуатацию ГЦС нецелесообразной. Значения дебита, для которых критическая температура равна 0, являются неприемлемыми. При этих значениях, для заданных параметров ГЦС, не выполняется условие  $N_n=N_p$ , т.е. при любых значениях  $T_{крит}$   $N_n>N_p$ . Это видно из расчетных значений, указанных в таблицах 2.2-2.3.

На основе проведенных расчетов можно сделать некоторые выводы:

1. Для каждого значения дебита существует критическая температура закачиваемого теплоносителя, причем с увеличением дебита значение этой температуры падает.

2. Для ГЦС с вертикальными скважинами:

- значение критической температуры зависит от такого параметра как мощность пласта;

- чем больше мощность пласта, тем выше значения: критической температуры, максимального допустимого дебита

3. Для ГЦС с горизонтальной нагнетательной скважиной и вертикальной добычной, с увеличением длины горизонтального ствола:

- растет значение приемлемого дебита. Так, если при  $a_n=20$  м приемлемым является только значение дебита, равное 40 кг/с, то для  $a_n=300$  м таковыми являются практически все значения;

- растет значение критической температуры для одного и того же значения дебита.

4. С увеличением радиуса скважин ГЦС растет значение критической температуры.

Сравнение расчетных данных для ГЦС с вертикальными скважинами и для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами показывает, что значения критической температуры для второй ГЦС выше. Это еще раз подтверждает факт большей эффективности ГЦС с горизонтальными скважинами.

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 2

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М., ФИЗМАТЛИТ, 2008. 376 с.
2. Алхасов А.Б., Магомедбеков Х.Г. Перспективы строительства ГеоТЭС на базе среднепотенциальных термальных вод // ГЕОТЕРМИЯ. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Сб. науч. тр., отв. редактор К. М. Магомедов. Махачкала, 1994, с. 17-34.
3. Алишаев М.Г. Лазурному берегу – геотермальное тепло. // АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕУРСОВ: Материалы IV Школы молодых ученых им. Э.Э.Шпильрайна./ Под ред. д.т.н. А.Б.Алхасов – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2011, С.44-49.
4. Алишаев М.Г. Гидродинамические основы разработки нефтяных месторождений со структурно-механическими свойствами нефтей в пластовых условиях: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1974.
5. Джаватов Д.К., Дворянчиков В.И. Температурная зависимость термодинамических параметров геотермальных флюидов в задачах оптимизации геотермальных систем // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № S3. С. 69-73.



### Г л а в а 3

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ИСПАРИТЕЛЬНО – КОНДЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ВОДЫ

Ниже описывается метод интенсификации и снижения энергоемкости технологического процесса очистки воды путем ее выпаривания и последующей конденсации в высокопотенциальном электрическом поле. Процесс диспергирования в предлагаемом методе осуществляется с вершины конуса Тейлора, образующегося на конце электропроводного капилляра в электрическом поле с потенциалом заключенном в интервале  $(2, 5 - 15) \cdot 10^3 \text{ В}$  [1-3]. Такая технология очистки позволяет одновременно извлечь из воды практически все составные ее компоненты в сухом или обогащенном, до максимальной степени, виде.

Получаемый при этом конденсат - дистиллят может быть доведен до питьевой кондиции путем добавления в него необходимых ингредиентов требуемых солей в оптимальных концентрациях.

В работе для снижения энергоемкости процесса выпаривания воды предлагается использовать метод ее диспергирования из капиллярных структур в электрическом поле. В этом методе интенсивность процесса выпаривания (скорость испарения  $V_{\sigma}$ ) с единицы свободной поверхности воды  $S_u$  наравне с другими параметрами зависит от ее температуры, как это следует из уравнения Ленгмюра - Кнудсена [1]:

$$V_{\sigma} = dm/dt = kp_v \sqrt{2\pi RT/M}. \quad (3.1)$$

Здесь:  $m$  - масса испаряющейся части жидкости - воды,  $t$  - время испарения,  $k$  - эмпирический коэффициент ( $0 \leq k \leq 1$ ),  $p_v$  - давление пара над свободной поверхностью,  $M$  - молярная масса,  $T$  - температура поверхности испарения (свободной поверхности) жидкости,  $R$  универсальная газовая постоянная. Следовательно, интенсивность процесса зависит от величины поверхности  $S_l$  испарения жидкости.

Это требует отдельной разработки методов интенсификации процесса выпаривания и снижения его энергоемкости, в первом случае за счет: увеличения свободной поверхности испарения путем повышения степени дисперсности потока жидкости и уменьшения

потенциальной энергии частиц, обусловленной силами поверхностного натяжения жидкости.

В известных технологиях увеличения поверхности испарения, как например в градирнях, используется механические методы распыления - диспергирования воды с дополнительным использованием различных типов насадок. Эти методы диспергирования достигли стадии насыщения, когда дальнейший рост поверхности испарения достигается существенным увеличением массово - габаритных характеристик оборудования и значительных капиталовложений.

В ходе настоящих исследований, для существенного увеличения свободной поверхности испарения и уменьшения потенциальной энергии частиц вода переводится в дисперсное состояние путем ее выпаривания в высокопотенциальном электрическом поле из капиллярных структур, как это описано в [2 - 6].

Способ диспергирования жидкости в электрическом поле приводит к снижению энергоемкости процесса за счет: уменьшения работы выхода одноименно заряженных молекул из частиц жидкости и увеличения свободной поверхности испарения методом увеличения степени дисперсности потока. Элементарные заряды, стекающие на жидкость при ее движении через капилляр или капиллярную структуру к которому приложен высокий потенциал в процессе ее диспергирования «прилипают» к поляризованным молекулам частиц дисперсного потока. Следовательно, на поляризованные молекулы, к которым как бы «прилипают» одноименные элементарные заряды, действуют кулоновские силы отталкивания, направленные радиально противоположно силам поверхностного натяжения частиц. Таким образом кулоновские силы отталкивания, действующие на поляризованные - заряженные молекулы приводят к сокращению величины совершаемой им работы вылета против поверхностных сил «сжатия» молекул. Давление поверхностных ( $P_\sigma$ ) и кулоновских ( $P_q$ ) сил, действующих на сферические частицы, образующиеся в результате возникновения Рэлеевской неустойчивости определяются соотношениями [2]:

$$P_\sigma = 2\sigma/r_0, \quad (3.2)$$

$$P_q = q_0^2/8\pi r_0^4, \quad (3.3)$$

Здесь:  $P_\sigma$ ,  $P_q$ ,  $\sigma$ ,  $q_0$  и  $r_0$  – соответственно капиллярное давление сил поверхностного натяжения и электростатического поля собственного заряда частицы, коэффициент поверхностного натяжения жидкости, заряд и средний радиус частиц дисперсного потока.

Как известно при выпаривании жидкости из капиллярных структур возможны два случая. Это выпаривание с поверхностей: с отрицательной кривизной – случай смачивающихся и положительной кривизной – случай не смачивающихся жидкостью капиллярных структур. И следует отметить, что процесс испарения жидкостей с поверхностей частиц дисперсного потока аналогичен выпариванию с поверхностей с положительной кривизной.

С учетом этого и соотношений (3.2) и (3.3) для скоростей испарения жидкости с единицы кривой, незаряженной ( $V_\sigma$ ) и заряженной поверхностей (сферической частицы дисперсного потока) ( $V_q$ ) получаем: для положительной кривизны

$$V_\sigma = k(P_l - 2\sigma/r_0)\sqrt{2\pi RT/M}, \quad (3.4)$$

$$V_q = k(P_l - 2\sigma/r_0 + Q^2/8\pi r_0^4)\sqrt{2\pi RT/M}, \quad (3.5)$$

для отрицательной кривизны

$$V_\sigma = k(P_l + 2\sigma/r_0)\sqrt{2\pi RT/M}, \quad (3.6)$$

$$V_q = k(P_l + 2\sigma/r_0 + Q^2/8\pi r_0^4)\sqrt{2\pi RT/M}, \quad (3.7)$$

Из соотношений (3.4), (3.5) и (3.6), (3.7) для относительной скорости выпаривания жидкостей из капиллярных структур с положительной и отрицательной кривизной поверхности в электрическом поле или для параметра интенсификации  $w$  процесса получаем: для капиллярных структур

$$w = V_q/V_\sigma = 1 + \lambda^2 / 4\pi \quad (3.8)$$

для частиц дисперсного потока

$$w = V_q/V_\sigma = 1 + \lambda^2 / 2\pi \quad (3.9)$$

Здесь  $\lambda = q_0^2 / 4\pi r_0^4 (P_l + 2\sigma/r_0)$  – безразмерный параметр интенсификации процесса выпаривания жидкости. Как видно из соотношений (3.8) и (3.9) интенсивность процесса выпаривания жидкости в электрическом поле больше чем без него на четверть и половину величины безразмерного параметра интенсификации процесса выпаривания жидкости. Кроме того, в оптимальном стационарном режиме диспергирования, размеры частиц дисперсного потока жидкости - воды достигают нано - микрометров. Величина свободной поверхности  $S_l$  испарения, образующейся за единицу времени диспергирования жидкости, определяется из соотношения:

$$S_l = N4\pi r_o^2 = 3 G/r_o \rho_l, \quad (3.10)$$

здесь -  $N = 3 G / 4 \pi r_o^3 \rho_l$  – число частиц, образующихся за единицу времени,  $G$  – расход жидкости,  $r_o$  - радиус частиц,  $\rho_l$  – плотность жидкости. Радиус частицы шаровой формы исходной массы жидкости связан с радиусом частицы дисперсного потока соотношением  $r = r_o \sqrt[3]{N}$ . Степень роста свободной поверхности испарения пропорционально  $\sqrt[3]{N}$ . Величина свободной поверхности испарения, приходящаяся на единицу площади поверхности пористой структуры, определяется из соотношения:

$$S_l = N2\pi r_o^2 \quad (3.10a)$$

Здесь  $N$  число пор с радиусом  $r_o$  на единице пористой поверхности.

Как следует из экспериментальных данных, полученных в работе [7] радиус частицы дисперсного потока воды составляет величину порядка  $10^{-7} - 10^{-9}$  м при расходах через единичный капилляр порядка  $10^{-5}$  кг/с в режиме отсутствия расхода при потенциале капилляра равном нулю. Следовательно, нижний предел роста свободной поверхности испарения воды при ее диспергировании в электрическом поле составляет величину порядка 3,16 тысяч единиц при производительности частиц порядка  $N = 10^7$ . Верхний

предел роста свободной поверхности достигает величины порядка  $2,16 \cdot 10^5$  при размерах частиц порядка  $10^{-8}$  м. Результаты экспериментальных исследований процесса диспергирования чистых жидкостей (воды и некоторых спиртов) из капилляров диаметром менее  $4 \cdot 10^{-3}$  м в режиме с нулевым уровнем жидкости над концом капилляра показали, что размеры частиц дисперсных потоков достигают порядка  $10^{-7} - 10^{-9}$  м [12].

Таким образом, из соотношений (3.8) и (3.9) следует, что при выпаривании жидкостей из капиллярных структур или их диспергировании в электрическом поле рост интенсивности процесса их выпаривания обуславливается: ростом свободной поверхности испарения за счет пористости структуры потока жидкости, действием кулоновских сил отталкивания, действующих на одноименные заряды «прилипшие» к поляризованным молекулам частиц потока.

Кроме того, в случае выпаривания дисперсных потоков при размерах частиц меньших их критических значений (критические значения зародышей для воды, при указанных во введении температурах, составляют величину порядка  $10^{-8}$  м.) они переходят в энергетически неустойчивые состояния, приводящие к их самопроизвольному распаду - переходу в газообразное состояние. Таким образом часть энергетически неустойчивых частиц дисперсного потока самопроизвольно переходят в парообразное состояние. При диспергировании чистых жидкостей в стационарных режимах размеры частиц потока составляют величину меньшую  $10^{-9}$  м [9, 10]. В известных технологиях диспергирования жидкостей размеры частиц составляют величину порядка  $10^{-3}$  м [2].

Вероятность процесса распада, как устойчивых, так и неустойчивых, частиц в предлагаемой технологии еще возрастает из-за того, что при диспергировании жидкости в электрическом поле частицы потока заряжаются одноименным зарядом. Кулоновские силы отталкивания, действующие на одноименные заряды, сосредоточенные в частицах дисперсных потоков воды, будут способствовать росту интенсивности процесса их выпаривания - распада – перехода в парообразное состояние. В конечном итоге это приводит к росту интенсивности процесса перехода воды в газообразное состояние (при заданной температуре) до максимума. При размерах частиц порядка нанометров или микрометров для свободной - удельной поверхности испарения воды ( $\text{м}^2/\text{кг}$ )  $S_v$  частиц потока и пористой структуры согласно соотношению (3.10) получаются значения соответственно большие чем  $10^6$  и  $10^3 \text{ м}^2$  на единицу массы. Это обеспечивает достижение максимального значения величины поверхности испарения. Размеры частиц потока при стабильных режимах диспергирования, составляют величину порядка  $10^{-8}$  м. Такая величина поверхности испарения приводит к сокращению времени релаксации состояния пара при любых отклонениях его термодинамического равновесия с жидкостью.

В действительности диспергирование жидкости в электрическом поле возникает с вершины жидкого конуса Тейлора [13 - 16]. При оптимальном значении потенциала жидкость в локальной области ее поверхности принимает форму конуса с вершины, которого диспергируется жидкость при возникновении условия неустойчивости. Критерий неустойчивости на вершине конуса в вакууме возникает при большем или равном нулю векторной суммы сил, действующих на заряженную частицу, находящуюся на вершине конуса Тейлора:

$$\vec{F}_K + \vec{P} + \vec{F}_p + F_{от} \geq 0 \quad (3.11)$$

Здесь  $F_K$  - кулоновская сила отталкивания электроразряженной частицы от электроразряженного контура конца капилляра – контура основания конуса Тейлора,  $P$  - сила тяжести,  $F_p$  - составляющая силы поверхностного натяжения удерживающая частицу на вершине конуса и  $F_{от}$  - сила отдачи диспергируемых частиц. Последняя сила практически равна нулю при нулевой начальной скорости выхода частиц из вершины конуса. С учетом последнего условия для модулей сил, в случае ориентации капилляра вертикально вниз в условном вакууме получаем неравенство:

$$q_0 E + m_0 g \geq 2\pi r_k' \sigma \cos \alpha \quad (3.11a)$$

где  $\sigma$ ,  $r_k'$ ,  $m_0$ ,  $g$  – коэффициент поверхностного натяжения и радиус пленки поверхностного натяжения в области максимума напряжения суммы сил: поверхностного натяжения, тяжести и кулоновской под действием которой заряженная частица покидает вершину конуса, радиус перешейки отрывающейся частицы, масса этой частицы и ускорение свободного падения.

Масса инжектируемой кулоновскими силами из вершины конуса частицы должна коррелироваться с ее аккумулируемым зарядом и величиной отклонения по вертикали в гравитационном поле согласно уравнению динамики (3.12) и радиусом ее перешейки. Далее получаем зависимость массы центральной частицы дисперсного потока исходя из уравнения:

$$m\vec{a} = \vec{F}_K + \vec{F}_c + \vec{F}_A + \vec{P}. \quad (3.12)$$

Здесь  $\vec{F}_K$ ,  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_A$ ,  $\vec{P}$  - соответственно силы: кулоновская, сопротивления среды, Архимеда и гравитации, действующие на центральную частицу конусного дисперсного потока. Для определения других параметров частиц, инжектируемых из вершины конуса Тейлора, используется уравнение (3.13) баланса сил, действующих на частицу на ее вершине.

$$\vec{F}_K + \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_p + \vec{F}_{от} \geq 0 \quad (3.13)$$

Здесь  $F_K$  - кулоновская сила отталкивания электрoзаряженной частицы от контура конца капилляра,  $P$  - сила тяжести,  $F_p$  - составляющая силы поверхностного натяжения удерживающая частицу на вершине конуса и  $F_{от}$  - сила отдачи диспергируемых частиц. Последняя сила практически равна нулю при нулевой начальной скорости выхода частиц из вершины конуса. Критерий неустойчивости на вершине конуса при диспергировании жидкости в произвольной среде возникает при выполнении неравенства:

$$q_0 E + m_0 g (1 - \rho_B / \rho_{ж}) \geq 2\pi r'_k \sigma \cos \alpha \quad (3.14)$$

где  $\sigma$ ,  $r'_k$ ,  $\rho_B$  и  $\rho_{ж}$  – коэффициент поверхностного натяжения и радиус пленки поверхностного натяжения в области максимума напряжения суммы сил: поверхностного натяжения, тяжести и кулоновской под действием которой заряженная частица покидает вершину конуса – радиус перешейки отрывающейся частицы и плотности среды диспергирования и жидкости.

Причем коррелируемая величина массы частицы при диспергировании жидкости в рассматриваемом режиме заключена в интервале  $10^{-9} - 10^{-7}$  м. Экспериментально подтвержденная величина радиуса частицы для парафина заключена в интервале (2 - 18)\* $10^{-9}$  м. Здесь  $r'_k$  связан с радиусом частицы  $r_0$  соотношением  $r'_k = r_0 \cos \alpha$ ,  $\cos \alpha$ , как следует из рисунка 1, равен  $1 / \sqrt{(r_k / l)^2 + 1}$ . Где  $l' = ml$  и  $r'_k = kr_0$  – соответственно высота конуса Тейлора и радиус перешейки отрывающейся частицы, а  $m \leq 1$  и  $k \leq 1$  соответственно безразмерные коэффициенты определяющие отклонения положения: центра частицы от высоты конуса в момент ее отрыва от вершины и максимума вектора напряженности электрического поля на оси капилляра и радиуса перешейки частицы от её размера.

В точке максимума вектора напряженности электрического поля на оси конуса Тейлора  $\cos \alpha$  принимает значение равное  $\sqrt{3}/3$  так как его высота  $l$  в точке максимума вектора напряженности электрического поля выражается через радиус капилляра как  $r_k / \sqrt{2}$ . При этом сила поверхностного натяжения, удерживающая частицу, определяется составляющей  $F_p$  силы  $F_\sigma$ . Критерий Релея для случая распада материнской капли в электрическом поле с убывающим в ходе этого процесса зарядом и массой дочерних

капель, по нашему мнению, нельзя использовать для режима диспергирования жидкости с вершины жидкого конуса Тейлора. В этом случае процесс протекает при постоянной рекомбинации заряда и количества диспергируемой жидкости, уносящих открывающимися частицами. Несмотря на это многие исследователи [17 - 19] для интерпретации процесса диспергирования жидкостей с вершины конуса Тейлора используют критерий Релея. В случае диспергирования жидкости с конца капилляра значение его потенциала выше чем на вершине конуса Тейлора и на отрывающуюся частицу действует результирующая сила отталкивания, достигающая наибольшего значения в точке максимума вектора напряженности электрического на оси капилляра.

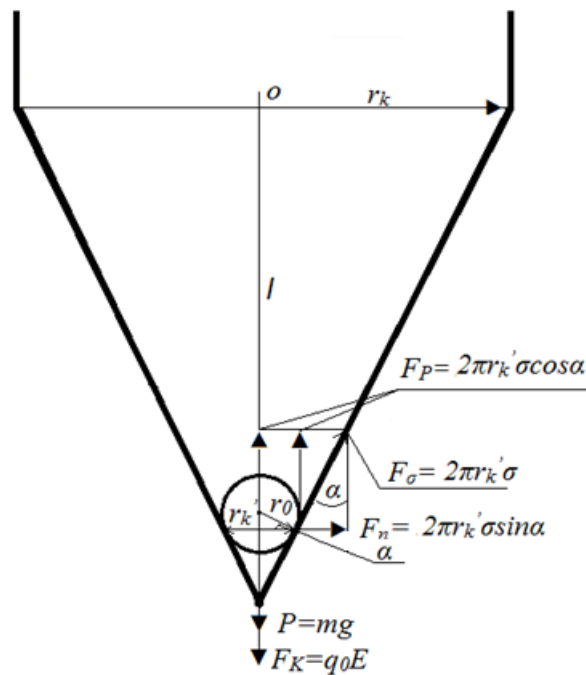


Рис. 3.1. Схематическое изображение конуса Тейлора с указанием области поверхности мениска с которой начинается стационарный процесс диспергирования при выполнении условия равновесия сил, действующих на заряженные частицы жидкости находящиеся в наиболее удаленной от конца капилляра области на его оси.

Критерий Релея для случая распада материнской капли в электрическом поле с убывающимся в ходе этого процесса зарядом и массой дочерних капель, по нашему мнению, нельзя использовать для режима диспергирования жидкости с вершины жидкого конуса Тейлора. В этом случае процесс протекает при постоянной рекомбинации заряда и количества диспергируемой жидкости, уносящиеся открывающимися частицами. Несмотря на это многие исследователи [17 - 19] для интерпретации процесса диспергирования жидкостей с вершины конуса Тейлора используют критерий Релея. В случае диспергирования жидкости с конца капилляра значение его потенциала выше чем



на вершине конуса Тейлора и на отрывающуюся частицу действует результирующая сила отталкивания, достигающая наибольшего значения в точке максимума вектора напряженности электрического на оси капилляра на расстоянии от него, определяемом его радиусом [19]. В известных случаях [19, 20] распада электроразряженной материнской капли во внешнем поле за счет его поляризации, когда и дочерние капли неустойчивы в смысле этого критерия, исходная капля находится во внешнем однородном электрическом поле и неустойчивость возникает за счет перераспределения заряда самой капли [19, 20]. В режиме возникновения неустойчивости Релея неоднородное электрическое поле приложено как бы между электродом, проведенным через пояс деформированного до критического состояния исходной капли и электродом, расположенным вдали от конца капилляра в точке максимума вектора напряженности электрического поля. В описываемом случае возникновения неустойчивости на вершине конуса Тейлора она возникает при постоянной величине его (вершины конуса) заряда за счет его притока по капилляру и жидкому конусу.

Условие неустойчивости на вершине жидкого конуса Тейлора, образующегося на конце электроразряженного капилляра, изготовленного из электропроводного материала, возникает при значении модуля вектора напряженности электрического поля определяемом из соотношения:

$$E_B \geq 2\pi k r_0 \sigma / 3 q_0 (1 + \Delta y / L) \quad (3.15)$$

Заряд устойчивой в дальнейшем движении частицы, в отличие от критерия Релея, определяем из соотношения:

$$q_0 = 4\pi \varepsilon_0 \varepsilon r_0 \varphi_B, \quad (3.16)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\varphi_B$  - соответственно электростатическая и диэлектрическая постоянные диспергируемой жидкости и потенциал вершины конуса Тейлора. Это допущение для оценки заряда отрывающейся частицы справедливо в случае уединенной частицы, а на самом деле частица отрывается от электроразряженной вершины конуса Тейлора. Увеличение емкости частицы в конечном итоге приведет к избыточному натеканию заряда на нее и частица в дальнейшем будет неустойчив по заряду. В результате этого истинный заряд частиц будет отличаться от теоретических оценок. Наиболее точным методом определения заряда частиц является метод основанный на измерении величины отклонения потока в равномерном магнитном поле под действием силы Лоренца.

С учетом решения уравнения (3.14) и соотношений (3.15), (3.16) для массы частицы получаем:

$$m_0 \geq 2\sqrt{3}\pi k r_0 \sigma / 3g(1 + L/\Delta y) \quad (3.17)$$

Далее с учетом равенства  $m_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \rho_{\text{ж}}$  из соотношения (3.9) для радиуса частицы

получаем:

$$r_0 = \sqrt{\sqrt{3}k \sigma / 2\rho_{\text{ж}}g(1 + L/\Delta y)} \quad (3.18)$$

Исходя из (3.7) с учетом (3.8), (3.9) и (3.10) окончательно для вектора напряженности электрического поля на вершине конуса Тейлора получаем:

$$E_{\text{в}} = \sqrt{\sqrt{3}k \sigma / 6\varepsilon_0 \varepsilon l(1 + \Delta y/L)} \quad (3.19)$$

Как следует из рисунка 1 потенциалы капилляра  $\varphi_{\text{к}}$  и вершины конуса Тейлора  $\varphi_{\text{в}}$  связаны соотношением  $\varphi_{\text{в}} = \sqrt{2}\varphi_{\text{к}}/\sqrt{3}$ . Из соотношения (19) для потенциала  $\varphi_{\text{в}}$  вершины конуса Тейлора, при котором диспергируется жидкость в зависимости от расстояния между электродами получаем:

$$\varphi_{\text{к}} \geq \sqrt{\sqrt{3}k \sigma L^2 / 4\varepsilon_0 \varepsilon l(1 + \Delta y/L)} \quad (3.20)$$

Из этого соотношения следует, что высота  $l$  конуса Тейлора должна убывать с ростом потенциала диспергирования. Это следствие, вытекающее из полученного соотношения, ранее подтверждено экспериментально, как это показано в работе [5] для чернил струйных принтеров.

С учетом (3.17) - (3.20) окончательно для характеристических параметров частиц жидкости диспергируемой в произвольной среде получаем следующие соотношения:

$$r_0 \geq \sqrt{\sqrt{3}k \sigma / 2\rho_{\text{ж}}g(1 + L/\Delta y)(1 - \rho_{\text{с}}/\rho_{\text{ж}})} \quad (3.21)$$

$$m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\pi^2 k^3 \sigma^3 / 3\rho_{\text{ж}}g^3(1 + L/\Delta y)^3(1 - \rho_{\text{с}}/\rho_{\text{ж}})^3} \quad (3.22)$$

$$q_0 \geq \sqrt{4\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon k^2 \sigma^2 L^2 / \rho_{\text{ж}}g l (1 + L/\Delta y)(1 + \Delta y/L)(1 - \rho_{\text{с}}/\rho_{\text{ж}})} \quad (3.23)$$

$$q_0/m_0 \geq \sqrt{2\sqrt{3}\varepsilon_0\varepsilon g^2 L^2 (1 + L/\Delta y)^2 (1 - \rho_c/\rho_{ж})^2 / k\sigma l (1 + \Delta y/L)} \quad (3.24)$$

Анализ полученных формул: (3.21) - (3.24) показывает, что они функционально правильно описывают зависимости искомых величин: радиуса, массы, заряда и удельного заряда частиц от режимных параметров процесса и физических свойств диспергируемых жидкостей. В соотношениях (3.19), (3.20), (3.23) и (3.24) значения скобок в знаменателях при значениях  $\Delta y \ll L$  стремятся к единице и их вкладами при расчетах можно пренебречь.

Потенциал вершины конуса Тейлора  $\varphi_{\text{в}}$  выражается через потенциал капилляра с учетом высоты конуса Тейлора и радиуса капилляра. Как показано выше высота конуса выражается через радиус капилляра ( $l = r_k/\sqrt{2}$ ). Из соотношения (3.6) однозначно следует критерий неустойчивости на вершине конуса, который определяется условием превышения суммы сил Кулона и тяжести, действующие на заряженную частицу силу поверхностного натяжения. При этом мы рассматриваем только условия возникновения неустойчивости, не вдаваясь в механизмы переноса заряда и жидкости от капилляра к вершине конуса Тейлора и не рассматриваются динамические процессы истечения жидкости из капилляра. Однако влиянием динамических процессов, протекающих за счет высасывания жидкости из капилляра кулоновскими силами, на процесс диспергирования с вершины конуса можно пренебречь так как её расход с вершины конуса Тейлора ничтожно мал при условии равенства уровней жидкости в сосуде и конца капилляра т. е. при отсутствии расхода жидкости через капилляр в отсутствии электрического поля.

В действительности значение критического заряда частицы в конечном итоге должно определяться величинами, входящими в соотношение (3.9) кулоновскими силами, силами поверхностного натяжения жидкости ( $\sigma, r_k, \varphi_{\text{к}}$ ) и силой тяжести определяемая параметрами  $\rho_{ж}, g, L$  и  $\Delta y$ . Последние два параметра входят в это соотношение потому как масса частицы оценивается, исходя из траектории ее движения в электростатическом и гравитационном полях.

Итоговый процесс очистки воды включает ее выпаривание путем диспергирования и последующая конденсация паровой фазы в электрическом поле. Экспериментальные исследования, проведенные в работе [21] показали, что процесс конденсации паровой фазы воды существенно интенсифицируется при приложении высокопотенциального электрического поля. Дальнейший рост скорости конденсации пара осуществляется за

счет действия кулоновских сил на электрoзаряженные частицы пара при их конденсации на втором заземленном электрoде, выполненном в виде трубы. При этом дисперсный поток электрoзаряженных частиц подается в охлаждаемую снаружи трубу. Энергoемкость процесса при его проведении в электрическом поле резко уменьшается за счет повышения степени дисперсности частиц потока до уровня нано - микрометров.

Описание экспериментальной установки для выпаривания жидкостей из пористой структуры или капилляра приведено в работе [11].

Результаты проведенных исследований процесса диспергирования жидкостей в электрическом поле свидетельствуют о том, что размеры частиц дисперсных потоков, получаемых по предлагаемой технологии, соответствуют наноразмерным значениям. Эти размеры частиц для воды меньше размеров критических зарoдышей. Следовательно, в предлагаемом методе интенсификация процесса парообразования частично будет происходить за счет распада неустойчивых частиц размерами меньшими критических значений. При диспергировании жидкости предлагаемым методом поверхность испарения – свободная поверхность достигает предельных значений. Энергoемкость процесса выпаривания воды предлагаемым способом уменьшается более чем в  $10^2$  раз. Скорость процесса конденсации паровой фазы дисперсного потока электрoзаряженных частиц воды будет являться лимитирующим фактором так как скорость диспергирования - выпаривания жидкости может быть повышена за счет использования многофорсуночного режима диспергирования. Скорость конденсации электрoзаряженного дисперсного потока частиц в электрическом поле возрастает более чем в два раза за счет действия на частицы кулоновских сил, направленных нормально к поверхности конденсации.

1. Куни Ф. М., Щекин А. К., Гринин А. П. Теория гетерогенной нуклеации в условиях постепенного создания метастабильного состояния пара. // [Успехи физических наук](#). Том 171, № 4. апрель 2001.
2. Григорьев А.И. Капиллярные электрические неустойчивости. // Соросовский образовательный журнал, Том 6, № 6, 2000.
3. Вердиев М. Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореферат докторской диссертации. Институт проблем геотермии ДНЦ РАН. Махачкала 1997 г. 44 с.
4. Nabiev, Shikhnabel S., Verdiev, Mikail. BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND URKUNDE uber die Eintragung des. Gebrauchsmusters №. 20 2014 005 013.9/ Vorrichtung zum Auftragen von Stofffolien auf verschiedene Unterlagen.
5. M.G. Verdiev, Sh.Sh. Nabiev and other. "Research on uniformity of nanofilms and ink dispersion flux forming in electric field". Dagestan State Technical University, Russia. ([sion.asp](#)) <http://www.idtechex.com/printed-electronics-europe-13/posterses>. (Постерный доклад на международной конференции Printed Electronics Europe 2013, Berlin, Germany).
6. Вердиев М.Г. Разработка процесса очистки воды методом выпаривания и последующей конденсации. Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы //Выпуск 3. Материалы Научной сессии Институт проблем геотермии, посвященной Дню российской науки. Махачкала. 7-8 февраля 2014 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова - Махачкала: АЛЕФ (ИП Овчинников). 2014. - (158) С 77 - 82.
7. Способ нанесения пленок: проводников, полупроводников и диэлектриков на различные подложки/ М.Г. Вердиев, Ш.Ш. Набиев, Н.А. Камнев // Патент РФ № 2492938 от 20.09 2013 г.
8. Способ получения монодисперсных порошков веществ. / М.Г. Вердиев, М.Ш. Абидова, Ш.Ш. Набиев, Н.А. Камнев// Патент РФ № 2506143. МПК: В22F 9/14, В82 Y30/00, Оpubл: 10. 02. 2014 Бюл. № 4. 5 с.
9. Вердиев М. Г. Получение тонких пленок жидкостей путем их диспергирования в электрическом поле. Электронная обработка материалов. – 1991. – № 4. – С. 36 – 41.
10. M.G. Verdiyev, Sh.Sh. Nabiev, N.A. Kamnev. The research of the technological parameters effect on the shape and structure of the disperse dye flow of the inkjet printers produced in the electric field. Journal of Physics: Conference Series 345 (2012) 012038 doi:10.1088/1742-6596/345/1/012038.

11. М.Г. Вердиев, О.П. Иванов, С.А. Ниналалов. Исследование диспергирования жидкостей в электрическом поле // Инженерно-физический журнал Т.57. № 2. – 1989. – С. 275 – 280.
12. [www.ipgdncran.ru](http://www.ipgdncran.ru) e-mail: [ran\\_ipg@mail.ru](mailto:ran_ipg@mail.ru)...
13. Григорьев А.И., Ширяева С.О. Классификация режимов электродиспергирования жидкостей // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. - № 10. – С. 7 – 17.
14. В.И. Коженков, Н.А. Фукс. Электродинамическое распыление жидкости. // Успехи химии. 1976 г., Т. XLV, вып. 12. С. 2274 – 2284.
15. Вердиев М.Г. Теплофизические основы и методы расчета систем обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии. Автореф. дис. докт. техн. наук – Махачкала: Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, 1997. – 44 с.
16. Вердиев М.Г., Вердиева З.М., Набиев Ш.Ш. Исследование зависимости структуры дисперсных потоков жидкостей и их частиц от параметров электрического поля. Материалы IV Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и VIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э.Э. Шпильрайна. ТОМ 1. 2015 г./Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова – Махачкала: ИП Овчинникова (АЛЕФ), 2015. – С. 331-335.
17. Хоган Дж., Хендрикс С. Д. Исследование отношения заряда к массе электрически распыляемых частиц жидкости // Ракетная техника и космонавтика. 1965. Т. 3, № 2, С. 140 – 147.
18. Сасин В.А. Ветвление равновесных форм капель в электрическом поле. //ЖТФ, том 70, вып. 4, 2000, С. 128 – 129.
19. Васютин Е.В., Погосов В.В. О кулоновской неустойчивости заряженных кластеров. // Физика твердого тела. том 46, вып.10, 2004, С. 1861-1865.
20. Zeleny J.J., Phys. Rev., 16, 102 (1920).
21. Болога М.К., Гросу Ф.П., Поликарпов А.А., Моторин О.В. Конденсация парогазовой смеси в электрическом поле. // Электронная обработка материалов, 2009, № 2, С. 57 – 60.

## Глава 4

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ И ПРИРОДНОГО БИТУМА ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОКАТАЛИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Высоковязкие сернистые нефти и природные битумы характеризуются высокими концентрациями асфальтенов и смол, в которых наряду с другими углеводородными компонентами сосредоточены ценные металлы - ванадий и никель, в количестве, сопоставимой содержанием их в рудах.

Известно, что при классическом методе переработки нефти и битумов отмеченные выше металлы дезактивируют промышленные дорогостоящие катализаторы, в условиях гетерогенного катализа блокируют активные центры, вызывают коррозию оборудования переработки нефти и ухудшают экологическую обстановку. Ученые многих стран работают над проблемой разработки совершенной технологии переработки высоковязкой нефти и битумов для получения жидких энергоносителей, выделением металлов и гетероатомных компонентов, с учетом экологической безопасности. Известно также, что содержание ванадия и никеля в нефтяных коллоидных дисперсных системах (НКДС), коррелирует с содержанием серы, азота и кислорода, молекулярная масса этих полимолекулярных ассоциатов оценивается до 22000 а.е.м. Конечная цель исследователей, найти способ воздействия на устойчивые, в условиях обычной и вакуумной перегонки, коллоидные дисперсные системы с получением моторных углеводородов и ценных компонентов. Однако, имеющиеся в этом направлении литературные данные показывают, что рассматриваемая проблема не нашла еще своего эффективного решения. А известные методы микробиологической технологии повышения нефтеотдачи [1, 2, 3] используют закачку в призабойную зону дорогие микробные полимеры типа ксантин или приспособленную к высоким температурам и пластовым давлениям микрофлору, источником питания, которых является нефть.

Для переработки высоковязкой сернистой нефти нами предлагается новая технология, где используется дешевый биотехнологический реагент, полученный спиртовым брожением свекловичной патоки. Целью нашего исследования является получение технологически доступного, универсального реагента с низкой себестоимостью, представляющего из себя концентрированный дрожжевой автолизат, побочный продукт паточного спиртового производства. Для достижения поставленной цели собрана установка из двух биореакторов, связанных между собой. Использован

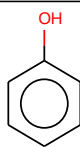
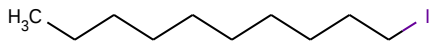
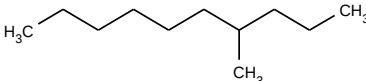
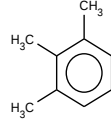
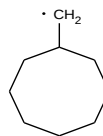
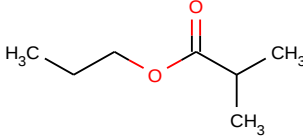
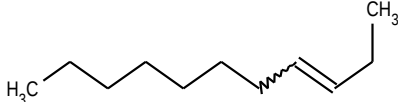
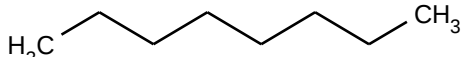
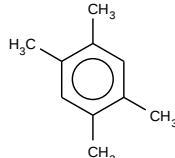
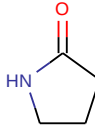
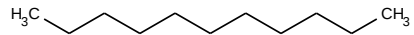
промышленный метод получения пищевого спирта. В качестве питательной среды использован раствор с содержанием патоки (мелассы) 20 г/100 см<sup>3</sup> в разбавленной термальной воде месторождения Берикей, известного состава с содержанием необходимых макро- и микроэлементов. Сбраживание осуществлялось в первом реакторе с использованием комплекса спиртовых и хлебопекарных дрожжей с аэрацией воздуха и перемешиванием в начале, а после двух часов в анаэробных условиях при температуре 30 °С, рН 5-5,3. В качестве питания источником азота и фосфора служат мочевины и фосфорная кислота, доводку рН проводили серной кислотой. Контроль над процессом брожения осуществляли по содержанию остаточного сахара, определением титруемых кислот и измерением рН среды. В целях уменьшения метаболитов, угнетающих популяцию микроорганизмов, периодически откачивали растворенный углекислый газ и летучие компоненты вакуумной дегазацией. В конце спиртового брожения основную массу дрожжей переводили во второй биореактор и подвергали автолизу. В это же время из бражной массы первого реактора под вакуумом отгоняли летучие компоненты в виде спирта-сырца. Далее к барде первого реактора возвращали дрожжевой автолизат из второго реактора, и весь цикл брожения повторяли три раза. При этом чтобы не увеличивать объем бражной массы, мелассу и термальную воду вводили в концентрированном виде (мелассе содержание сахаров более 80% , минерализация термальной воды более 70 г\л), с учетом всех необходимых компонентов, согласно действию первого цикла. В конце третьего цикла брожения содержимое освобождали от спирта-сырца вакуумной дегазацией, после термической обработки получили, товарный продукт, который представляет собой в промышленном масштабе побочный продукт спиртового производства, а по нашей технологии концентрированный целевой биореагент.

Как видно из таблицы 4.1 состав биотехнологического реагента сложный и многокомпонентный, до 70 % летучих компонентов представлены углеводородами C<sub>10</sub> – C<sub>31</sub>, из которых предельного ряда до 50 % линейного и циклического строения. Далее 20 % углеводородов приходятся на непредельные и ароматические при соотношении 3:2. Кроме углеводородов в летучих компонентах присутствуют азотистые соединения, фенолы и эфиры фенолов, а также ароматические кислоты, высокомолекулярные спирты, альдегиды и сложные эфиры.

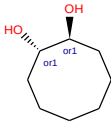
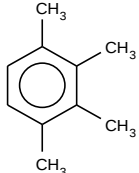
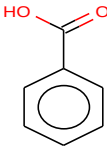
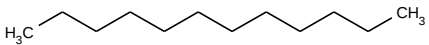
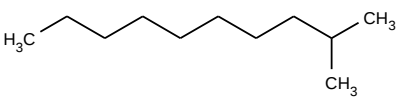
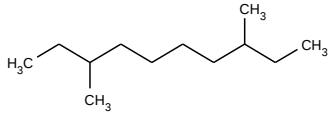
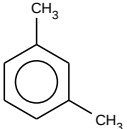
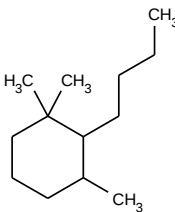
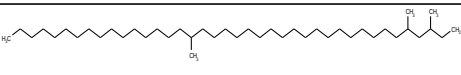
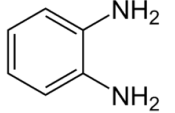
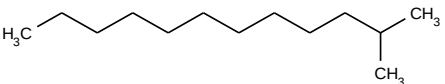
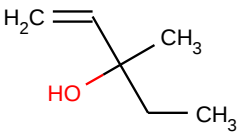



Таблица 4.1

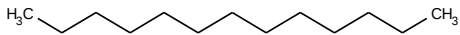
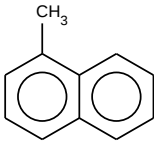
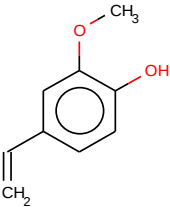
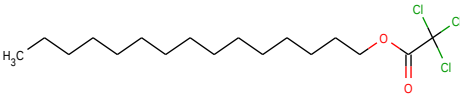
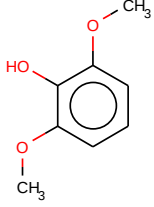

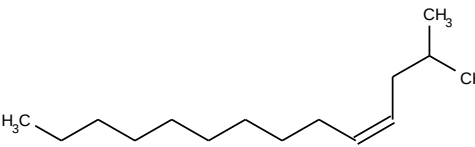
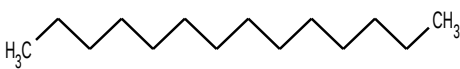
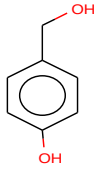
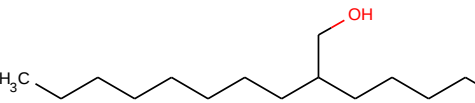
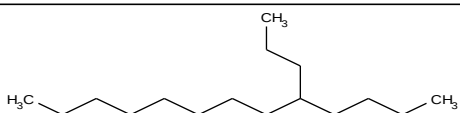
## Состава летучих составляющих биотехнологического реагента

№	Время выхода	%	Название	Формула
1	4.184	1.14	Фенол	
2	4.319	0.90	Декан, 1-йод	
3	4.627	0.54	Декан, 4-метил	
4	4.761	0.57	1,2,3-триметилбензол	
5	4.858	0.73	Циклооктан, метил	
6	4.986	0.53	пропиловый эфир, 2-метил пропионовой кислоты	
7	5.050	0.59	3-ундецен	
8	5.204	0.29	Октан	
9	5.544	1.25	1,2,4,5 тетраметилбензол	
10	5.621	2.70	2-пирролидинон	
11	5.736	2.70	Ундекан	

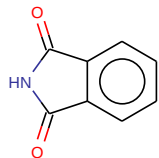
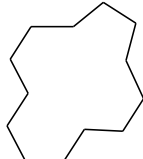
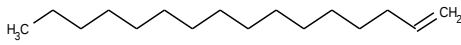
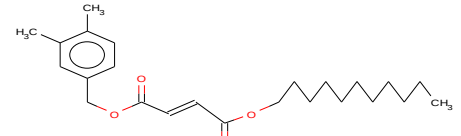
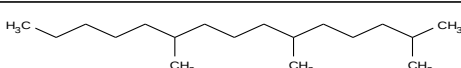
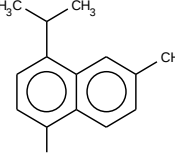
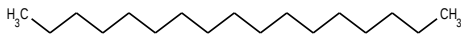
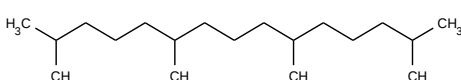
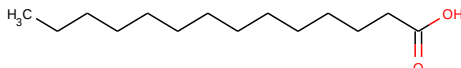
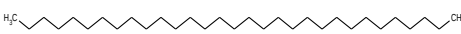
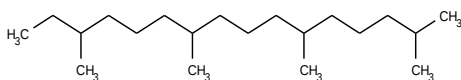
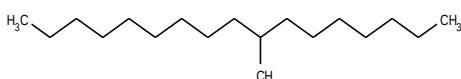
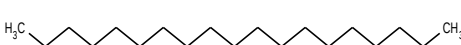
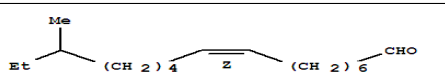
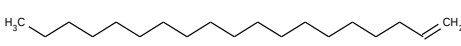
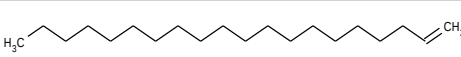
Продолжение таблицы 4.1

12	6.590	0.31	1,2-циклооктандиол, транс	
13	6.705	1.58	1,2,3,4 тетраметилбензол	
14	6.789	4.63	Бензойная кислота	
15	7.327	4.02	Додекан	
16	7.558	1.26	2-метилдекан	
17	7.680	1.23	3,8-диметилдекан	
18	7.764	0.45	1,3-диметилбензол	
19	7.809	1.06	2-бутил-1.1,3-триметилциклогексан	
20	8.181	0.62	3,5,24-триметил тетраконтан	
21	8.219	0.78	1,2-бензидиамин	
22	8.367	0.61	2-метилдодекан	
23	8.521	2.08	3-метил 1-пентен-3-ол	
24	8.720	1.07	6-тетрадецэн	

Продолжение таблицы 4.1

25	8.963	2.89	Тридекан	
26	9.053	1.11	1-метилнафталин	
27	9.310	1.84	2-метокси-4-винилфенол	
28	9.746	0.54	Пентадециловый эфир трихлоруксусной кислоты	
29	9.900	1.36	2,6 диметокси фенол	
30	10.202	14.8	Эйкозан	
31	10.567	0.81	2-метилтетрадецэн	
32	10.567	1.89	Тетрадекан	
33	11.068	1.97	4-гидрокси фенолэтано́л	
34	11.318	0.82	2 -гексилдеканол-1	
35	11.542	1.17	5-пропилтридекан	

Продолжение таблицы 4.1

36	11.658	1.56	Фталимид	
37	12.736	1.13	Циклотридекан	
38	13.056	4.76	Цетен	
39	13.980	1.23	3,4-диметилфенилдодециловый эфир фумаровой кислоты	
40	14.288	3.17	2,6,10-триметилпентадекан	
41	14.801	3.66	1,6-диметил-4-(1-метилэтил)-нафталин	
42	14.994	2.22	Гептадекан	
43	15.080	3.80	2,6,10,14-тетраметилпентадекан	
44	15.834	1.64	Тетрадекановая кислота	
45	16.476	2.15	Гентриаконтан	
46	16.899	0.84	2,6,10,14тетраметилгексадекан	
47	17.541	1.07	8-метилгептадекан	
48	17.618	1.36	Нонадекан	
49	17.958	0.64	14-метил, метиловый эфир пентадекановой	C19H34O2
50	18.278	0.55	14-метилгексаль-8	
51	18.509	5.24	1-нонадецен	
52	20.132	0.50	1-эйкозен	

Существующие технологии предполагают сначала из нефти удаление

механических примесей и растворенных газов, очищение от лишних солей и воды на электрообессоливающих установках. В нашем случае без предварительной обработки в сырую высокосернистую нефть добавляем реагент и проводим атмосферную и вакуумную перегонку. В результате использования биореагента происходит разрушение смолисто-асфальтеновой дисперсной системы тяжелой высокосернистой нефти. Металлы, комплексообразователи (V, Ni и др.) коллоидной системы сернистой нефти освобождаются от первичного комплекса при таком воздействии. Кислород и азотсодержащие составляющие реагента образуют новые летучие комплексные соединения с металлами. В итоге наряду с ценными металлами перегоняются одновременно и значительная часть до 30% светлых фракций (привнесенные углеводороды учтены), которых не удастся получить в отсутствие биотехнологического реагента. Результаты получены на основе экспериментального исследования состава и переработки Казахстанской и Уральской сернистой нефти. Следует добавить, что для очистки летучей фракции и извлечения металлов, нами синтезирован полярный сорбент на основе оксида алюминия. Методика синтеза сорбента включает в себя частично материал из патента Анашкина В.С и др.[4], где непрерывное осаждение гидроксида алюминия псевдобемитной структуры из растворов основного сульфата алюминия проводят нейтрализацией раствором щелочного реагента гидроксида аммония при температуре 90°C, фильтрацию, автоклавную обработку полученного осадка гидроксида алюминия в водном растворе аммиака при pH реакционной смеси 10,0-11,0, температуре 135-145°C, времени активирования 1,0-2,0 часа, промывку осадка химически обессоленной водой, и этанолом, сушку и термообработку с получением конечного продукта. При однократной обработке сорбентом летучей фракции нефти, содержащие комплексные соединения металлов происходит их адсорбция на 99.9%. Одновременно жидкие углеводороды очищаются также от гетероциклических серосодержащих соединений.

1. Использование биореагента КШАС-М для увеличения нефтеотдачи пластов/Ю.М.Симаев [и др]//Интервал.-200.-Т.4-5,№15-16.-С.4.
2. Бердичевская М.В. Особенности физиологии родококков разрабатываемых нефтяных залежей/ М.В.Бердичевская//Микробиология.-1989-№1.-с60-65.
3. Образование нефтевытесняющих соединений микроорганизмами из нефтяного месторождения Дацин (КНР) / Т.Н.Назина [и др]//Микробиология.-2003.-Т.72.-№2.С. 206-211.
4. Патент RU 2258035

## Раздел 2

### ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА

# ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ РЕГИОНОВ ЮГА РОССИИ

## Г л а в а 5

### ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ ДАГЕСТАН

В последние во всем мире ВИЭ демонстрируют бурное развитие. Стратегические планы многих стран включают проекты получения энергии из возобновляемых источников. Это связано с ростом цен на нефть, текущими проблемами энергетической безопасности и озабоченностью все большего числа людей проблемой изменения климата.

В настоящее время 176 из 194 государств мира официально декларировали свое участие в развитии технологий возобновляемой энергетики. В 2006 г. таких государств было только 60. В ряде стран уже сегодня все производство энергии базируется на ВИЭ, например, в Непале 99,4% всей энергии производится на ГЭС, в Исландии 99,9% энергии производят гидроэлектрические и геотермальные станции.

По данным обзора [1], в 2015 г. глобальные инвестиции в ВИЭ достигли 312,2 млрд. \$. Впервые установленные мощности ВИЭ превзошли ископаемые энергоносители и составили 153 ГВт. Однако уже в следующем году в связи с падением цен на нефть инвестиции в ВИЭ уменьшились до 241,6 млрд. \$. С 2012 г. это уже третий случай сокращения инвестиций за год сразу на 23%. В лидерах по инвестициям Китай, Индия, США, а по регионам развития – Китай, США и Евросоюз. В России пока нет прорывов в этой области, так как к ВИЭ здесь относятся с предубеждением или как к некоей экзотике.

Дагестан подразделён на три климатические зоны:

- горная - выше 850 м (площадь 2,12 млн. га или 39,9% территории);
- предгорная - от 150 до 850 м (площадь 0,84 млн. га или 15,8%);
- равнинная - от -27 до 150 м (2,35 млн. га или 43,3%).

Климат на севере и в центральной части Дагестана умеренно-континентальный и засушливый. Средняя температура воздуха в январе на низменности составляет от +4°C до -3°C, в горах – от -5°C до -11°C. Средняя температура воздуха в июле – до +30°C.

Неблагоприятной особенностью климата весной являются сильные ветры преимущественно северо-западные, юго-восточные и северные. При средней месячной скорости 6-7 м/с, максимальная скорость северо-западного ветра достигает 31 м/с, юго-восточного - 28 м/с. В Махачкале сильные юго-восточные ветры наблюдаются около 200 дней в году. В прибрежной зоне ветры дуют почти ежедневно в течение всего года.

Зимние месяцы отличаются большой облачностью, солнечные дни возможны около 10 дней в месяц. Среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет 2020 часов. В летние месяцы продолжительность солнечного сияния около 10 часов в сутки,

наименьшая отмечается в декабре и составляет 1,5 часа.

В настоящее время в Дагестане из ВИЭ находит преимущественное применение гидроэнергия горных рек и геотермальная энергия. Начинает активно развиваться солнечная энергетика. Достаточно высоким энергетическим потенциалом обладает ветер, особенно в приморских районах.

В Дагестане мало ископаемого минерального сырья. Энергобаланс республики крайне напряженный: ввозится до 100% твердого топлива и до 90% – природного газа, что ложится тяжелым бременем на бюджет республики и доходы населения. Поэтому главное направление развития энергетики – это энергетика, основанная на использовании ВИЭ, потенциал которых многократно превышает годовые потребности экономики в топливе и электроэнергии даже по несколько устаревшим данным [2].

Таблица 5.1

Индикаторы возобновляемой энергетики мира  
**Источник: Renewables 2017. Global status report**



	Един. измер.	2003 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Страны с заявленными целями	#	48	109	118	138	144	164	173	176
Количество новых рабочих мест	млн. чел.	1,7			5,745		7,674	8,079	9,824
Общая мощность ВИЭ (с ГЭС)	млн. кВт	800	1250	1355	1470	1578	1712	1856	2017
Общая мощность ВИЭ (без ГЭС)	млн. кВт	85	315	395	480	560	657	785	921
Гидроэнергетика, всего, в т. ч.:	млн. кВт	715	935	960	990	1018	1055	1071	1096
Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч								4100
• Большая гидроэнергетика	млн. кВт	654	848	885	915				1018
Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч								
• Малые ГЭС	млн. кВт	61	87	75	75				78
Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч		300						
<b>Инвестиции в ВИЭ</b>	<b>млрд. \$</b>	<b>45</b>	<b>227</b>	<b>279</b>	<b>244</b>	<b>232</b>	<b>270</b>	<b>312,2</b>	<b>241,6</b>
<b>Общая мощность ВИЭ</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>157</b>	<b>371</b>	<b>430</b>	<b>505</b>	<b>635</b>	<b>732</b>	<b>860</b>	<b>998</b>
<b>Общее пр-во электроэнергии</b>	<b>млрд. кВтч</b>								<b>1877</b>
<b>1. Малые ГЭС (≤ 25 МВт)</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>61</b>	<b>87</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>78</b>
1.1. Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч		300						
1.2. Число часов использования	ч/год		3448						
<b>2. ГеоТЭС</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>12,1</b>	<b>12,8</b>	<b>13</b>	<b>13,5</b>
2.1. Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч						74		78
2.2. Число часов использования	ч/год						5782		5777
2.3. Пр-во тепловой энергии	млн. Гкал						62,7	68	68
<b>3. СЭС с ФЭП</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>2,6</b>	<b>40</b>	<b>71</b>	<b>100</b>	<b>138</b>	<b>177</b>	<b>228</b>	<b>303</b>
3.1. Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч				110		200		375
3.2. Число часов использования	ч/год				1100		1130		1237
<b>4. СЭС с концентраторами</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>0,4</b>	<b>1,1</b>	<b>1,6</b>	<b>2,5</b>	<b>3,4</b>	<b>4,4</b>	<b>4,7</b>	<b>4,8</b>
<b>5. ВЭС</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>48</b>	<b>198</b>	<b>238</b>	<b>283</b>	<b>319</b>	<b>370</b>	<b>433</b>	<b>487</b>
5.1. Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч				534,3	620			
5.2. Число часов использования	ч/год				1888	1943			
5.3. Офшорные ВЭС	млн. кВт		3,2	4,1	5,4	7,9	8,1	12,2	14,4
<b>6. БиоТЭС</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>&lt;36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	<b>88</b>	<b>93</b>	<b>106</b>	<b>112</b>
6.1. Пр-во электроэнергии	млрд. кВтч	227	313	335	350	396	433	464	504
6.2. Число часов использования	ч/год	6305				4500	4656	4377	4500
<b>7. Мощности гелиоустановок</b>	<b>млн. кВт</b>	<b>86</b>	<b>195</b>	<b>223</b>	<b>255</b>	<b>373</b>	<b>406</b>	<b>435</b>	<b>456</b>
7.1. Пр-во тепловой энергии	млн. Гкал			166					322
7.2. Число часов использования	ч/год			868					821
<b>8. Производство этанола</b>	<b>млрд. л</b>	<b>28,5</b>	<b>85</b>	<b>84,2</b>	<b>83,1</b>	<b>87,8</b>	<b>94</b>	<b>98,3</b>	<b>98,6</b>
<b>9. Производство биодизеля</b>	<b>млрд. л</b>	<b>2,4</b>	<b>18,5</b>	<b>22,4</b>	<b>22,5</b>	<b>26,3</b>	<b>29,7</b>	<b>30,1</b>	<b>30,8</b>

С точки зрения энергообеспеченности весь Юг России и особенно Северный Кавказ является одним из проблемных регионов. При минимальной потребности 87 млн. т у.т., на своей территории добывается 40 млн. т у.т. или менее 50% от потребности (табл. 5.2).

По основным видам энергоресурсов за исключением нефтепродуктов среднее по округу потребление ТЭР составляет 3,8 т у.т./чел. Соответствующий показатель по Дагестану равен 1,84 т у.т./чел., что в 3,5 раза ниже среднероссийского. Единственным благополучным регионом можно считать Ставропольский край, где уровень потребления ТЭР стабильно находится на уровне среднероссийского – 6,5 т у.т./чел.

Что касается топливно-энергетического баланса Дагестана, то он остается крайне напряженным из-за высокой доли импорта - 63,6%. Увеличиваясь с каждым годом, она постепенно приближается к критической отметке (30%). Ежегодно ввозится 4,3 млн. т у.т., в т.ч. 3,4 млрд. м<sup>3</sup> природного газа, 1,1 млрд. кВтч электроэнергии, 12440 т бензина, 6700 т керосина, 15600 т жидкого газа, 560 т печного топлива, 4100 т угля и 9100 куб. м дров.

В 2015 г. суммарный объем производства энергоресурсов в Дагестане составил 3957 тыс. т у.т. при экспорте 735 тыс. т у.т. и валовом потреблении 8267 тыс. т у.т.

**Гидроэнергетические ресурсы.** В Дагестане активно развивалась и развивается гидроэнергетика. 17 крупных и малых ГЭС ежегодно вырабатывают 5 млрд. кВтч экологически чистой энергии. Их доля в электробалансе составляет 98,6%, а вклад в экономику - 1,8 млн.т у.т. Строительство и эксплуатацию ГЭС ведет Дагестанский филиал ПАО "РусГидро", который планирует сооружение еще 30 новых малых и средних ГЭС.

В группу ВИЭ входят малые ГЭС мощностью до 25 МВт – Агульская, Амсарская, Ахтынская, Гергебильская, Курушская, Гунибская и др., имеют мощности от 0,5 до 17,8 МВт. Суммарная мощность всех малых ГЭС Дагестана составляет 50,3 МВт. Имеются большие возможности по сооружению новых высокоэффективных малых ГЭС на горных реках с большой скоростью течения и значительными уклонами, таких как, Терек, Сулак, Самур, которые относятся к бассейну Каспийского моря.

В целом, ресурсы малой гидроэнергетики Дагестана по данным работы [6] составляют 16,45 млрд. кВтч/год. Это значение можно считать валовым потенциалом гидроэнергии малых рек Дагестана. Технический потенциал, определяющий реальную возможность использования энергии этого вида, составляет 4,27 млрд. кВтч/год [6], а экономический потенциал, дающий возможность сооружения рентабельных малых ГЭС в существующих условиях, 2,25 млрд. кВтч/год.

**Геотермальные ресурсы.** Геотермальные ресурсы наряду с гидроэнергией, солнечной и ветровой энергией являются практически неисчерпаемым, возобновляемым и экологически чистым источником энергии, который в перспективе реально может занять значительное место в топливно-энергетическом балансе Дагестана.

По нашим оценкам [4], геотермальная энергия в Дагестане имеет достаточно весомый экономический (0,4 млн. тут.) и технический потенциал (2,34 млн. т у.т.),

сопоставимый с ресурсами малой гидроэнергетики, что является хорошим подспорьем для решения задач энергообеспечения региона. Валовый потенциал геотермальных вод составляет 50 млн. Гкал/год. Используется лишь 100 тыс. Гкал или 5% от разведанных запасов (2 млн. Гкал). Расчеты показывают, что при полной реализации разведанных запасов возможный объем замещения природного газа может возрасти на порядок и достигнуть 15% регионального потребления.

Институтом проблем геотермии ДНЦ РАН предложен ряд перспективных инвестиционных проектов: Энергобиологический комплекс на базе разведанных геотермальных месторождений Дагестана; Геотермально-парогазовая энергоустановка мощностью 50 МВт на базе простаивающего фонда скважин площади Тернаир.

Реализация этих проектов, помимо экономических выгод, принесет ощутимый социальный эффект: позволит создать до 1000 новых рабочих мест с высокой заработной платой, организовать производство недорогих продуктов питания для населения.

Таблица 5.2

## ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В РЕГИОНАХ ЮГА РОССИИ

	Электроэнергия млн. кВтч		Тепловая энергия тыс. Гкал		Сжиженный газ, тыс. тонн		Нефть добытая, тыс. тонн		Природный газ, млн. куб. м		Итого, млн. тут	Население, тыс. чел.
<b>Производство</b>	<b>70008,7</b>	<b>54445,1</b>	<b>86952,9</b>	<b>58566,7</b>	<b>602</b>	<b>132</b>	<b>9206</b>	<b>2562,9</b>	<b>17977</b>	<b>4858,8</b>	<b>39,955</b>	<b>22 968 435</b>
1. Республика Дагестан	5050,0	5458,7	694,6	1582,2	-	-	318,9	191,6	672,9	327,0	2,850	2 737 313
2. Ставропольский край	16481,6	16520,8	11833,0	10405,4	7,7	-	976,4	1005,5	441,4	385,3	9,662	2 711 198
3. Чеченская Республика	-	1302,5	-	530,9	-	-	2200,0	х	457,9	х	0,555	1 268 042
4. Кабардино-Балкарская Республика	422,4	409,2	2251,9	2109,2	-	-	1,0	х	92,8	х	0,563	893 819
5. Республика Северная Осетия-Алания	304,9	374,9	2256,0	1664,7	-	-	5,3	1,5	-	-	0,464	700 858
6. Республика Ингушетия	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	123,1	62,3	н.д.	н.д.	0,089	516 693
7. Карачаево-Черкесская Республика	215,3	1185,0	2028,5	1964,3	-	-	-	-	-	-	0,802	427 017
8. Республика Адыгея	98,9	91,1	898,1	822,8	-	-	-	0,3	72,6	13,1	0,211	443 168
9. Республика Калмыкия	0,5	0,1	533,7	282,0	-	-	244,3	199,4	-	73,7	0,426	283 166
10. Краснодарский край	6697,4	6129,0	17042,3	13888,2	25,1	132,0	1622,0	1102,3	3052,6	3572,7	10,784	5 160 656
11. Астраханская область	3102,4	2605,8	14579,1	12041,0	340,2	-	24,2	-	11935	-	3,307	1 007 113
12. Волгоградская область	18366,3		19643,9		229,0	-	3689,5	-	674,7	-	-	2 589 887
13. Ростовская область	19269,0	20368,0	15191,8	13276,0	-	-	1,3	-	577,0	487,0	10,242	4 229 505
<b>Потребление</b>	<b>73014,1</b>	<b>80072,3</b>	<b>84997,7</b>	<b>52057,7</b>	<b>310,9</b>	<b>711,5</b>	<b>5819</b>	<b>82,4</b>	<b>44156</b>	<b>42029</b>	<b>87,61</b>	<b>22 968 435</b>
1. Республика Дагестан	3874,0	5136,1	1104,0	1203,6	14,8	6,1	-	-	2296	2634,0	5,051	2 737 313
2. Ставропольский край	8853,6	9883,5	11450,8	6974,4	75,8	405,0	-	-	11513	10634	17,669	2 711 198
3. Чеченская Республика	1498,0	2189,8	-	113,4	-	1,1	-	-	-	77,2	0,868	1 268 042
4. Кабардино-Балкарская Республика	1379,3	1408,9	2068,1	1381,9	2,7	5,3	-	-	1368	1405,0	2,386	893 819
5. Республика Северная Осетия-Алания	2088,5	2082,0	2428,1	1529,5	7,4	11,9	-	-	1393	1175,0	2,394	700 858
6. Республика Ингушетия	421,6	531,0	161,4	130,6	0,02	0,8	-	-	22,2	523,2	0,812	516 693
7. Карачаево-Черкесская Республика	1170,0	1175,7	2149,1	1251,0	5,8	5,5	-	-	905	897,5	1,696	427 017
8. Республика Адыгея	814,9	1199,4	1381,5	353,0	2,5	2,6	-	-	803	552,2	1,123	443 168
9. Республика Калмыкия	515,2	458,8	573,8	190,4	3,2	3,3	190	-	293	352,3	0,606	283 166
10. Краснодарский край	15921,5	19815,8	19875,4	12001,0	44,1	96,7	1142	80,0	8143	8189,0	18,931	5 160 656
11. Астраханская область	3966,5	3548,2	13638,9	9609,2	24,4	20,0	378	0,1	2284	2274,0	5,792	1 007 113
12. Волгоградская область	18199,7	17207,9	18198,0	10755,0	96,0	110,0	4109	2,1	8418	7025,0	16,342	2 589 887
13. Ростовская область	14311,3	15435,2	11968,6	6564,1	34,2	43,1	-	-	6718	6291,0	13,940	4 229 505
<b>Сальдо</b>	<b>-3005</b>	<b>-25627</b>	<b>1955</b>	<b>6509</b>	<b>291</b>	<b>-579</b>	<b>3387</b>	<b>2480</b>	<b>-26178</b>	<b>-37170</b>	<b>-47,655</b>	

**Ресурсы солнечной энергии.** Солнечная энергетика – одно из наиболее перспективных направлений развития ВИЭ. По оценкам специалистов к 2100 г. солнце станет доминирующим источником энергии на планете. А аналитики Международного энергетического агентства (IEA) прогнозируют, что уже к 2050 г. солнечная энергия будет обеспечивать 40–50% мировых потребностей в электроэнергии.

Дагестан обладает значительным потенциалом в области солнечной энергетике, который только начинает реализовываться [4]. Общий потенциал солнечной энергии оценивается в 8,6 млрд. т у.т. Суммарная величина этого потенциала существенно превышает все актуальные и перспективные уровни потребления ТЭР вплоть до 2050 г. и позволяет решать проблемы энергоснабжения региона на качественно новом уровне.

Годовой приход солнечной радиации на поверхность, наклоненную к горизонту под углом, равным широте местности, может составлять до 2000...2500 кВтч/м<sup>2</sup>. Доля Республики Дагестан в потенциале солнечной энергии Северного Кавказа – 32,6%.

В среднем на каждый квадратный метр территории Дагестана за год падает около 5000 МДж солнечной энергии (1,2 Гкал), что эквивалентно 170 кг у.т. Годовые же значения солнечной радиации на территории Дагестана составляют [5]:

- валовой потенциал - 69343 млрд. кВтч/год
- технический потенциал - 693,4 млрд. кВтч/год
- экономический потенциал - 34,7 млрд. кВтч/год.

С 2013 г. в Дагестане начало разворачиваться строительство крупных солнечных фотоэлектрических станций. Первая СЭС мощностью 5 МВт в настоящее время действует в г. Каспийске в режиме мощности 1 МВт. Еще две станции 20 и 25 МВт планируется построить в высокогорном Хунзахском районе.

В табл. 5.3-5.5 приведены значения солнечной радиации для характерных районов Дагестана по данным наблюдений Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA), с осреднением за последние 25 лет.

Таблица 5.3

Среднесуточные суммы солнечной радиации для г. Дербент, кВтч/(м<sup>2</sup>·сутки)

Дербент	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Сред.
Рассеян.	0.72	1.01	1.38	1.71	1.97	1.95	1.85	1.48	1.05	1.10	0.73	0.63	1.30
Угол 27°	2.07	2.69	3.77	4.88	5.85	6.21	6.33	5.98	4.89	3.47	2.23	1.77	4.19
Угол 42°	2.29	2.84	3.83	4.72	5.43	5.66	5.80	5.68	4.91	3.66	2.43	1.98	4.11
Угол 57°	2.38	2.86	3.69	4.33	4.76	4.83	5.00	5.11	4.68	3.65	2.51	2.07	3.83
Опт. угол	2.38	2.87	3.83	4.89	5.98	6.55	6.54	6.01	4.94	3.68	2.51	2.08	4.36

Таблица 5.4

Среднесуточные суммы солнечной радиации для г. Махачкала, кВтч/(м<sup>2</sup>·сутки)

М-кала	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Сред.
Рассеян.	0.64	0.95	1.33	1.80	2.05	2.28	2.21	1.88	1.39	1.01	0.65	0.58	1.40
Угол 27°	3.50	3.94	5.09	5.65	6.40	6.27	6.14	5.93	5.61	4.74	4.09	3.12	5.04
Угол 42°	4.02	4.29	5.26	5.49	5.95	5.71	5.64	5.65	5.68	5.12	4.67	3.63	5.09
Угол 57°	4.30	4.40	5.14	5.05	5.20	4.89	4.88	5.08	5.44	5.20	4.96	3.93	4.87
Опт. угол	4.35	4.40	5.26	5.65	6.54	6.60	6.33	5.96	5.70	5.20	5.00	4.00	5.42

Таблица 5.5

Среднесуточные суммы солнечной радиации для г. Кизляра, кВтч/(м<sup>2</sup>·сутки)

Кизляр	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.	Сред.
Рассеян.	0.69	0.99	1.45	1.92	2.24	2.39	2.29	2.01	1.58	1.13	0.78	0.61	1.51
Угол 28°	2.55	3.17	3.91	4.81	5.61	5.80	5.75	5.24	4.49	3.52	2.46	2.04	4.12
Угол 43°	2.88	3.40	3.98	4.65	5.22	5.29	5.29	4.98	4.50	3.73	2.71	2.31	4.08
Угол 58°	3.04	3.45	3.85	4.27	4.58	4.55	4.58	4.49	4.28	3.74	2.82	2.44	3.84
Опт. угол	3.05	3.46	3.98	4.81	5.74	6.11	5.97	5.27	4.52	3.76	2.82	2.46	4.33

Эти данные приведены для юга Дагестана (район г. Дербента – 42,06° с.ш., 48,13° в.д.), для центральной части (район г. Махачкалы – 42,58° с.ш., 47,30° в.д.) и для севера республики (район г. Кизляра – 43,50° с.ш., 46,42° в.д.).

В таблицах даны значения рассеянной составляющей солнечного излучения и прямой составляющей для экваторо-ориентированных солнечных модулей, монтируемых с углом наклона к горизонту, равным географической широте площадки станции ±15°: для СЭС круглогодичного действия, а также для летнего и зимнего режимов эксплуатации, соответственно. Эти же данные могут быть использованы и для расчета солнечных систем теплоснабжения – с плоскими и вакуумированными трубчатыми коллекторами.

Данные таблиц 5.3–5.5 свидетельствуют, что *суммарный приход* солнечного излучения (прямая и рассеянная составляющие вместе) лежит в диапазоне 2000-2500 кВтч/м<sup>2</sup>. Это очень высокие значения, которые позволяют строить высокоэффективные СЭС на всей территории Дагестана. Эти же данные позволяют сделать вывод о том, что сооружение СЭС с концентраторами и слежением за солнцем в Дагестане не имеют смысла, поскольку годовые суммы прямой радиации для оптимизированных углов наклона на всей территории меньше сумм прямой и рассеянной радиации.

**Ресурсы энергии ветра.** Построенные по данным NASA зависимости среднегодовых скоростей ветра от высоты над поверхностью земли для характерных районов Дагестана показывают, что для современных ветроэлектрических установок (ВЭУ), имеющих высоты 130-150 м, среднегодовые скорости ветра должны составить 6,8-9 м/с. При этом наиболее сильные ветры имеют место в районах, приближенных к побережью Каспийского моря. Для ВЭУ мощностью 3 МВт (SWT-3.0-113-DD Siemens) при скоростях ветра 7-8 м/с выработка электроэнергии составляет более 5 млн. кВтч/год. А на всей территории республики (50,3 тыс. км<sup>2</sup>), условно можно разместить 50300

комплектов ВЭУ по 3 МВт, которые могут обеспечить выработку 251,5 млрд. кВтч/год. Это значение выработки можно считать валовым ветропотенциалом Республики Дагестан.

Технический ветропотенциал, который может составить 8-10% валового, можно считать равным 20-25 млрд. кВтч, а экономический потенциал равным 2-3 млрд. кВтч/год.

**Ресурсы прочих возобновляемых источников энергии.** Помимо рассмотренных природных источников возможно, но с меньшей эффективностью, использование и других ВИЭ: низкопотенциального тепла земли, поверхностных и подземных вод, волновой энергии Каспийского моря, энергии биомассы, из которой можно получать биогаз или синтез-газ для работы котельных. Однако, по предварительной оценке, экономический потенциал этих ресурсов, взятых вместе, не может обеспечить рентабельную выработку энергии более чем 1,5-2 млрд. кВтч/год.

На рисунке 5.1 показана диаграмма, дающая общее представление о сравнительных значениях технических потенциалов, рассмотренных в настоящей работе видов ВИЭ.

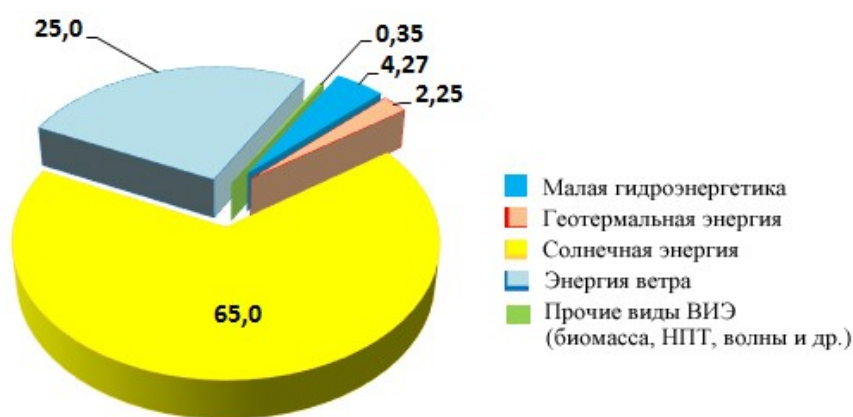


Рис. 5.1. Сравнительные значения технических потенциалов ВИЭ в млрд. кВтч/год

Таблица 5.6.

## Экономический потенциал ВИЭ в Северо-Кавказском федеральном округе [3]

Ресурсы	РФ	СКФО	в том числе						
			Ставропольски й край	Республика Дагестан	Кабардино- Балкария	Чеченская Республика	Северная Осетия	Карачаево- Черкесия	Республика Ингушетия
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Численность населения, чел.	143 467 990	9 540 758	2 790 785	2 946 035	858 946	1 324 767	706 123	471 847	442 255
Территория, тыс. км <sup>2</sup>	17 098,246	170,439	66,16	50,27	12,47	15,647	7,987	14,277	3,628
Удельный расход топлива, т ут./чел.год	6,6	3,2	6,3	1,7	2,8	0,65	3,4	3,6	1,8
Удельный расход электроэнергии, кВтч/чел.год	6810	2348	3542	1746	1640	1653	2949	2492	1200
<b>Экономический потенциал ВИЭ, млн. т ут.:</b>	<b>320</b>	<b>7,78</b>	<b>4,10</b>	<b>1,88</b>	<b>0,52</b>	<b>0,43</b>	<b>0,38</b>	<b>0,36</b>	<b>0,11</b>
Геотермальная энергия, млн. т ут.	114	0,70	0,04	0,4	0,0048	0,245	н/д	0,010	н/д
Малые ГЭС, млн. т ут.	70	0,884	0,408	0,306	0,068	н/д	0,034	0,068	н/д
Энергия ветра, млн. т ут.	11	0,163	0,0495	0,0898	0,0048	0,0057	0,0031	0,0054	0,0047
Солнечная энергия, млн. т ут.	3	0,269	0,097	0,0877	0,0084	0,0315	0,0165	0,0173	0,0106
Энергия биомассы, млн. т ут., в т.ч.:	69	4,07	2,85	0,559	0,293	0,032	0,205	0,080	0,054
Низкопотенциальное тепло, млн. т ут., в т.ч.:	53	1,70	0,647	0,44	0,14	0,12	0,13	0,18	0,04
<b>Экономический потенциал ВИЭ за вычетом энергии биомассы и НИТ, млн. т ут.:</b>	<b>198</b>	<b>2,01</b>	<b>0,603</b>	<b>0,881</b>	<b>0,087</b>	<b>0,278</b>	<b>0,045</b>	<b>0,100</b>	<b>0,016</b>
Производство ТЭР, млн. т ут.	1701,0	14,985	9,662	2,850	0,563	0,555	0,464	0,802	0,089
Потребление ТЭР, млн. т ут.	949,9	30,876	17,669	5,051	2,386	0,868	2,394	1,696	0,812
<b>Баланс ТЭР, млн. т ут.</b>	<b>+751,1</b>	<b>-15,89</b>	<b>-8,00</b>	<b>-2,20</b>	<b>-1,82</b>	<b>-0,31</b>	<b>-1,93</b>	<b>-0,89</b>	<b>-0,72</b>
<b>Возможная доля ВИЭ в производстве ТЭР, %</b>	<b>18,8</b>	<b>51,9</b>	<b>42,4</b>	<b>65,9</b>	<b>92,3</b>	<b>77,4</b>	<b>81,9</b>	<b>44,8</b>	<b>123,5</b>
<b>Возможная доля ВИЭ в потреблении ТЭР, %</b>	<b>33,6</b>	<b>25,2</b>	<b>23,2</b>	<b>37,2</b>	<b>21,8</b>	<b>49,5</b>	<b>15,8</b>	<b>21,2</b>	<b>13,5</b>
Производство электроэнергии, млн. кВтч	991979,5	23993,6	16563,5	5460,0	409,1	0,600	375,0	1185,4	0,00
Потребление электроэнергии, млн. кВтч	977122,4	22407	9883,5	5136,1	1408,9	2189,8	2082,0	1175,7	531,0
<b>Баланс электроэнергии, млн. кВтч</b>	<b>+14857</b>	<b>+1586</b>	<b>+6680</b>	<b>+324</b>	<b>-999,8</b>	<b>-2189,2</b>	<b>-1707</b>	<b>+9,7</b>	<b>-531</b>



Таблица 5.7.

## Оценка ресурсного потенциала ВИЭ в Республике Дагестан

ВИЭ	Валовой потенциал, млн. т у.т.			Технический потенциал, млн. т у.т.			Экономический потенциал, млн. т у.т.		
	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г. [3]	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г. [5]	Оценка ИПГ ДНЦ РАН, 2017 [2]	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г. [3]	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г. [5]	Оценка ИПГ ДНЦ РАН, 2017 [2]	Справочник по ресурсам ВИЭ России, 2007 г. [3]	Атлас ресурсов ВИЭ России, 2015 г. [5]	Оценка ИПГ ДНЦ РАН, 2017 [2]
Геотермальная энергия	<b>10,0</b> 3,0 млн.м <sup>3</sup> /сутки 50 млн.Гкал	<b>10,0</b> 3,0 млн.м <sup>3</sup> /сутки 50 млн.Гкал	<b>10,0</b> 3,0 млн.м <sup>3</sup> /сутки 50 млн.Гкал	<b>2,34</b> 513 тыс.м <sup>3</sup> /сутки 11,7 млн.Гкал	<b>2,34</b> 513 тыс.м <sup>3</sup> /сутки 11,7 млн.Гкал	<b>3,10</b> 513 тыс.м <sup>3</sup> /сутки 11,7 млн.Гкал 2,25 млрд.кВтч	<b>0,40</b> 86,2тыс.м <sup>3</sup> /сутки 2 млн.Гкал	<b>0,40</b> 86,2тыс.м <sup>3</sup> /сутки 2 млн.Гкал	<b>0,40</b> 86,2тыс.м <sup>3</sup> /сутки 2 млн.Гкал
Малая гидроэнергетика	<b>1,768</b> 5,2 млрд.кВтч	<b>5,593</b> 16,45 млрд.кВтч	<b>18,76</b> 55,2 млрд.кВтч	<b>0,578</b> 1,7 млрд.кВтч	<b>1,453</b> 4,27 млрд.кВтч	<b>1,453</b> 4,27 млрд.кВтч	<b>0,306</b> 0,9 млрд.кВтч	<b>0,768</b> 2,25 млрд.кВтч	<b>0,768</b> 2,25 млрд.кВтч
Энергия ветра	<b>7 182,84</b> 21 126 млрд.кВтч	<b>590,76</b> 1737,5 млрд.кВтч	<b>85,5</b> 251,5 млрд. кВтч	<b>17,957</b> 52,815 млрд.кВтч	<b>140,6</b> 413,5 млрд.кВтч	<b>8,5</b> 20-25 млрд.кВтч	<b>0,0898</b> 0,264 млрд.кВтч	<b>0,703</b> 2,06 млрд.кВтч	<b>1,02</b> 3 млрд.кВтч
Солнечная энергия	<b>8 600</b> 1770 млрд.кВтч 39990 млн.Гкал	<b>8376,88</b> н/д н/д	<b>832,5</b> 693 млрд.кВтч 2984 млн.Гкал	<b>52,8</b> 10,58 млрд.кВтч 246 млн.Гкал	<b>630,6</b> 525,5 млрд.кВтч 2259 млн.Гкал	<b>78,1</b> 65 млрд.кВтч 280 млн.Гкал	<b>0,0877</b> 0,0017млрд.кВтч 0,4355 млн.Гкал	<b>1,046</b> 0,02 млрд.кВтч 3,05 млн.Гкал	<b>40,8</b> 34 млрд.кВтч 146 млн.Гкал
Биомасса, всего, в т. ч.:	<b>3,689</b> н/д	<b>1,716</b> н/д	н/д	<b>2,347</b> н/д	<b>1,66</b> 3,772 млрд.кВтч 7,750 млн.Гкал	н/д	<b>0,972</b> н/д	<b>0,687</b> 0,14 млрд.кВтч 3,19 млн.Гкал	н/д
- отходы растениеводства	0,222	0,319		0,222	0,319		0,095	н/д	
- отходы животноводства	0,950	1,067		0,950	1,067		0,343	н/д	
- потенциал ТБО и ОСВ	0,218	0,281		0,149	0,268		0,093	н/д	
- потенциал отходов ЛПК	0,100	0,049		0	0,006		0,001	н/д	
- низкопотенциаль. тепло	2,199	н/д		1,026	н/д		0,440	н/д	
<b>Итого</b>	<b>15798 млн.т у.т.</b>	<b>8985 млн.т у.т.</b>	<b>946 млн. т у.т.</b>	<b>76 млн.т у.т.</b>	<b>776 млн. т у.т.</b>	<b>91 млн. т у.т.</b>	<b>1,85 млн.т у.т.</b>	<b>3,6 млн.т у.т.</b>	<b>43 млн. т у.т.</b>
	22 901 млрд.кВтч	1753 млрд.кВтч	999 млрд.кВтч	65,1 млрд.кВтч	780 млрд.кВтч	96 млрд.кВтч	1,16 млрд.кВтч	4,47 млрд.кВтч	39 млрд.кВтч
	40 040 млн.Гкал	50 млн.Гкал	3034 млн.Гкал	257,7 млн.Гкал	2278 млн.Гкал	291 млн.Гкал	2,43 млн.Гкал	8,24 млн.Гкал	148 млн.Гкал

## Выводы

1. Республика Дагестан не располагает значительными запасами классических видов органического топлива (нефть, уголь, газ) и поэтому вынуждена до 70% потребляемых энергоресурсов ввозить из других регионов, что требует значительных финансовых затрат и ложится тяжелым бременем на бюджет республики и доходы населения.

За последние 25 лет доля местных ТЭР в энергобалансе республики снизилась с 78% до 36%. Дагестан импортирует 90% потребляемого природного газа (3,4 млрд. куб. м), 75% нефтепродуктов (420 тыс. т) и почти 100% твердого и жидкого топлива.

В то же время в Дагестане имеется достаточная ресурсная база для использования гидро- и геотермальной энергии, солнечной и ветровой генерации, что подразумевает огромные возможности для развития возобновляемой энергетики.

Доля электроэнергии, вырабатываемой с использованием ВИЭ в 2017 г. составила 200 млн. кВтч или 1,1% без учета ГЭС мощностью  $\approx 25$  МВт, а с учетом последних – 99%. Удельный вес тепловой энергии, полученной на базе ВИЭ, был 5%, или 100 тыс. Гкал.

2. Объем технически доступных ресурсов ВИЭ оценивается в 91 млн. т у.т., что существенно превышает все актуальные и перспективные потребности республики (30 млрд. кВтч; 17 млн. Гкал) вплоть до 2040 г. Дагестан обладает громадным экономическим потенциалом ВИЭ, составляющим суммарно 39 млрд. кВтч/год и 148 млн. Гкал/год.

Объем технически доступных гидроэнергетических ресурсов малых рек Дагестана оценивается в 1,453 млн. т у.т. или 4,27 млрд. кВтч/год.

Объем технически доступных ресурсов геотермальной энергии оценивается в 513 тыс. м<sup>3</sup>/сутки или в пересчете на тепло и электроэнергию - 11,7 млн. Гкал/год и 2,25 млрд. кВтч/год соответственно. Используется для теплоснабжения 100 тыс. Гкал или 0,8% от разведанных запасов (2 млн. Гкал).

Объем технически доступных ресурсов солнечной энергии оценивается в 65 млрд. кВтч/год и 280 млн. Гкал/год. В 2013 г. вступила в строй первая солнечная электростанция в г. Каспийске, которая в настоящее время действует в режиме мощности 1 МВт.

Энергия ветра на территории Республики Дагестан по оценкам, учитывающим современные технические возможности, обладает валовым потенциалом 251 млрд. кВтч/год. Объем технически доступных ресурсов составляет не менее 20 млрд. кВтч/год. Сильные ветры (10-15 м/с) особенно характерны для приморских районов Дагестана, где неделями дуют муссоны юго-восточного и северо-западного направлений.

3. Впервые определение ресурсного потенциала ВИЭ на территории Российской Федерации было осуществлено в 2007 г. под руководством д.т.н. П.П. Безруких [2].

Выборка из этой работы данных по Северо-Кавказскому Федеральному округу

показывает, что вклад ВИЭ составляет порядка 25% объема потребления ТЭР, что создает благоприятные условия для решения энергетических и экологических проблем округа.

В СКФО самым высоким экономическим потенциалом ВИЭ без учета энергии биомассы и низкопотенциального тепла располагает Дагестан (0,881 млн. т у.т). За ним идут Ставропольский край (0,603), Чеченская Республика (0,278), Карачаево-Черкесская Республика (0,1), Кабардино-Балкария (0,087) и другие регионы.

Однако несколько позже появился Атлас ресурсов ВИЭ на территории России [6], подготовленный специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова, Института энергетики НИУ ВШЭ и Объединенного института высоких температур РАН, в котором все эти данные претерпели существенные изменения.

В данной работе экономический потенциал солнечной энергии в Дагестане оценивается в 34 млрд. кВтч/год, а ветровой – в 3 млрд. кВтч/год [5, 7], что существенно выше, чем было принято в работах [2] и [6].

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 5

1. REN21 Renewables 2017 Global Status Report. <http://www.ren21.net/gsr-2017/>.
2. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива. /показатели по территориям / Под ред. П.П. Безруких. - М.: "ИАЦ Энергия", 2007. - 272 с.
3. Муслимов В.М. Водноэнергетические ресурсы Дагестана. – Махачкала. Дагестанское книжное издательство, 1964. 105 с.
4. Гамзатов Г.М., Магомедов К.Г. Современное состояние и перспективы развития солнечной энергетики в Дагестане // Межотраслевой альманах "Славица". 2014, № 1 (44). С.48-50.
5. Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Чернявский А.А. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Матер. IV междунар. конф. "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы". Том 1. Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2015. С. 78-90.
6. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание / Т. И. Андреевко, Т. С. Габдерахманова, О. В. Данилова и др. - РХТУ им. Д.И.Менделеева Москва, 2015. – 160 с.
7. Алхасов А.Б., Чернявский А.А., Бадавов Г.Б., Алиев Р.М., Ниналалов С.А. О создании центра научно-технологического мониторинга потенциалов возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы: Материалы V Международной конференции, 23-26 октября 2017 г. Т.1. Махачкала: АЛЕФ, 2017. С. 99-197.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Изучен вопрос освоения тепла сухих горных пород низкого потенциала с небольших глубин с использованием скважинного теплообменника (СТО) в комбинации с тепловыми насосами, освоение высокопотенциального тепла возможно с применением глубоких СТО. Исследован процесс съема тепла в глубоких скважинах-теплообменниках. Проведены многовариантные оптимизационные расчеты с использованием разработанных математических моделей, описывающих процесс теплопереноса в глубоких СТО для различных значений глубин теплообменника, геотермического градиента, теплопроводности горных пород, расходов теплоносителей. Показано, 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 тепловой мощности.

- Показано, что наиболее перспективным является использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов в комбинированных геотермально-парогазовых энергоустановках (ГПЭ), имеющих преимущества и возобновляемых источников и ископаемых топлив. Строительство ГПЭ позволит эффективно 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 газотурбинной электростанции (ГТЭС).

- Изучен вопрос разработки эффективной технологической схемы геотермальной электростанции (ГеоЭС) с оптимальными режимно-конструкционными параметрами. Показано, что для каждого значения дебита существует критическая температура закачиваемого теплоносителя. Причем: с увеличением дебита, значение критической температуры падает; с увеличением радиуса скважин ГЦС, значение критической температуры растет. Установлено, что для ГЦС с вертикальными скважинами значение критической температуры зависит от мощности пласта, чем больше мощность, тем выше значения критической температуры и максимального допустимого дебита. Проведены многовариантные оптимизационные расчеты. Показано, что значения критической температуры для ГЦС с вертикальной добычной и горизонтальной нагнетательной скважинами выше, чем для ГЦС с вертикальными скважинами. Это еще раз подтверждает факт большей эффективности ГЦС с горизонтальными скважинами.

- Проведены исследования по оценке эффективности воздействия электрического поля на испарительно – конденсационный метод очистки воды. Результаты исследований процесса диспергирования жидкостей в электрическом поле свидетельствуют о том, что размеры частиц дисперсных потоков, получаемых по предлагаемой технологии, соответствуют наноразмерным значениям. Эти размеры частиц для воды меньше размеров критических зародышей. Следовательно, в предлагаемом методе интенсификация процесса парообразования частично будет происходить за счет распада неустойчивых частиц размерами меньшими критических значений. При диспергировании жидкости предлагаемым методом поверхность испарения – свободная поверхность достигает предельных значений. Энергоемкость процесса выпаривания воды предлагаемым способом уменьшается более чем в  $10^2$  раз. Скорость процесса конденсации паровой фазы дисперсного потока электростатически заряженных частиц воды будет являться лимитирующим фактором так как скорость диспергирования - выпаривания жидкости может быть повышена за счет использования многофорсуночного режима диспергирования. Скорость конденсации электростатически заряженного дисперсного потока частиц в электрическом поле возрастает более чем в два раза за счет действия на частицы кулоновских сил, направленных нормально к поверхности конденсации.

- Проведены исследования по переработке высоковязкой сернистой нефти и природных битумов с использованием биотехнологического реагента. Показана возможность увеличения выхода светлых фракций углеводородов при использовании полученного реагента. Функция реагента заключается в разрушении первичных смолисто-асфальтеновых дисперсных систем на основе металлов: ванадия, никеля и др., и в образовании вторичных летучих соединений с компонентами сложного реагента и при этом дополнительно выделяется часть углеводородов, что не наблюдается при известных технологиях.

- Проведена оценка энергетического потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан (РД). Показано, что РД: не располагает значительными запасами классических видов органического топлива (нефть, уголь, газ) и вынуждена до 70% потребляемых энергоресурсов ввозить из других регионов; обладает громадным экономическим потенциалом ВИЭ, составляющим суммарно 39 млрд. кВтч/год и 148 млн. Гкал/год. Показано, что в РД имеется достаточная ресурсная база для использования гидро- и геотермальной энергии, солнечной и ветровой генерации, что подразумевает огромные возможности для развития возобновляемой энергетики.

По материалам исследований сотрудниками лаборатории опубликовано:

#### Труды в центральной печати

1. Алхасов А.Б., Абдуллаев М.А. Солнечные элементы  $\text{AgInS}_2 - \text{CdS} - \text{CuInSe}_2$  с двусторонней спектральной чувствительностью // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 6. С.135-141.

2. Алхасов А.Б., Рамазанов М.М., Булгакова Н.Г. Тепломассоперенос в системе геотермальный пласт – скважина при извлечении пароводяной смеси // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 6. С.125-134.

3. Алхасов А.Б., Вердиев Н.Н., Омарова С.М., Некрасов Д.А. Стабильный тетраэдр  $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-NaCl}$  // Известия вузов. Химия и химическая технология, 2017, Т.60. Вып.5. С. 57-62.

4. Алхасов А.Б., Вердиев Н.Н., Омарова С.М., Магомедбеков У. Фазовые равновесия в системе  $(\text{LiF})_2\text{-}(\text{NaCl})_2\text{-Na}_3\text{FSO}_4$  // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 2017, Т. 60. Вып. 10. С. 4-8.

5. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А. Технологии освоения высокоминерализованных геотермальных ресурсов // Теплоэнергетика, 2017, № 9, С.17-24.

6. Рамазанов М.М., Алхасова Д.А. Математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси // Теплофизика высоких температур. 2017. Том 55, №2. С. 284-290. DOI: 10.7868/S0040364417010173.

7. Рамазанов М.М., Алхасова Д.А., Абасов Г.М. Течения и теплообмен в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси. // Инженерно-физический журнал, том 90, № 3, 2017. С. 640-647.

8. Джаватов Д.К., Азизов А.А. Проблема энергетической эффективности геотермальной циркуляционной системы при различных режимах обратной закачки теплоносителя // ЮГ России: экология, развитие. 2017. Т.12, № 1 (42). С.73-81.

#### Труды в международной печати

1. Alkhasov A.B., Verdiev N.N., Omarova S.M., Nekrasov D.A. Stable tetrahedron  $\text{LiF-LiCl-Li}_2\text{SO}_4\text{-NaCl}$  // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2017. Vol. 60. № 5. pp. 57-62.

2. Alkhasov A.B., Alkhasova D.A., Ramazanov A. Sh., Kasparova M.A. Technologies for the Exploration of Highly Mineralized Geothermal Resources // Thermal Engineering, 2017, Vol. 64, No. 9, pp. 637–643.

3. Alkhasov A.B., Verdiev N.N., Omarova S.M., Magomedbekov U. Phase Equilibria in system  $(\text{LiF})_2\text{-}(\text{NaCl})_2\text{-Na}_3\text{FSO}_4$  // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2017. Vol. 60. № 10. pp. 4-8.

4. M. M. Ramazanov, D. A. Alkhasova. Mathematical Model of Heat and Mass Transfer in a Geothermal Reservoir upon Extraction of Steam and Water Mixture. // HEAT AND MASS TRANSFER AND PHYSICAL GASDYNAMICS. ISSN 0018-151X, High Temperature, 2017, Vol. 55, No. 2, pp. 273–279. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017. DOI: 10.1134/S0018151X17010175.

5. Ramazanov M.M., Alkhasova D.A., Abasov G.M. Flows and heat exchange in a geothermal bed in the process of extraction of vapor –water mixture from it // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2017, Vol. 90, No.3, pp.606-614. DOI 10.1007/s10891-017-1606-x

6. Азизов А.А., Джаватов Д.К. Повышение энергетической эффективности геотермальной циркуляционной системы в условиях обратной закачки теплоносителя // [Sciences of Europe](#). 2017. № 16-1 (16). С.49-54.

Труды в монографиях, сборниках научных трудов, в региональных изданиях

Доклады конференций, совещаний, симпозиумов, школ и др.

международные конференции

1. Рамазанов А.Ш., Алхасов А.Б., Атаев Д.Р., Каспарова М.А. Испытание укрупненной лабораторной установки по переработке высокоминерализованных геотермальных вод. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С. 63-69.

2. Алхасов А.Б., Зайченко В.М. Перспективные направления развития распределенной энергетики. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.76-82.

3. Алхасов А.Б. Энергоэффективные технологии освоения геотермальной энергии. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.82-86.



4. Алхасов А.Б., Зайченко В.М., Чернявский А.А. О создании полигона новых энергетических технологий. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.87-94.

5. Алхасов А.Б., Чернявский А.А., Бадавов Г.Б., Алиев Р.М., Ниналалов С.А. О создании центра научно-технологического мониторинга потенциалов возобновляемых источников энергии в республике Дагестан. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.99-107.

6. Алиев Р.М., Белан С.И., Бадавов Г.Б., Ниналалов С.А. Возможности использования геотермальных вод для сокращения газодефицита на юге России. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.122-129.

7. Рамазанов М.М., Алхасова Д.А., Абасов Г.М., Булгакова Н.С. Численное исследование фильтрации пароводяной смеси в геотермальном пласте. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.204-209.

8. Алхасова Д.А., Зайченко В.М., Рамазанов М.М., Торчинский В.М. Автоколебательный режим фильтрации двухфазных флюидов. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.212-219.

9. Алхасова Д.А., Алхасов Б.А. Освоение тепла сухих горных пород низкого потенциала. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения

возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.220-225.

10. Алхасова Д.А. Повышение эффективности скважинных теплообменников путем интенсификации процесса теплообмена. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.226-231.

11. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А. Процесс теплопереноса через границу раздела твердое тело – теплоноситель. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.231-238.

12. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М. Критерий неустойчивости на конце конуса Тейлора. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.238-249.

13. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М. Определение подвижности частиц дисперсного потока жидкости. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.249-252.

14. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А., Набиев Ш.Ш., Азизов А.А., Вердиева З.М. Вольтамперная характеристика дисперсного потока жидкости. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.253-256.

15. Дворянчиков В.И., Джаватов Д.К., Искандеров Э.Г., Рабаданов Г.А. Изохорная теплоемкость водного раствора хлорида магния. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы

молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.290-297.

16. Джаватов Д.К., Азизов А.А. Оптимизация энергетических потерь на обратную закачку в геотермальной циркуляционной системе с горизонтальными скважинами. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 1. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.312-319.

17. Алхасов Б.А. Использование низкотемпературных термальных вод для выработки электроэнергии. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.54-57.

18. Абдулагатов И.М., Алхасов А.Б., Догеев Г.Д., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б., Алиев А.М. Микроводоросли как возобновляемое сырье для сельского хозяйства, получения биотоплива и очистки геотермальных вод. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.78-84.

19. Рабаданов Г.А., Султанов Ю.М., Алхасов Б.А., Сулейманова Ф.В., Мусаев А.М., Исламова Ф.И. Исследование липидов свидины южной. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.171-176.

20. Азизов А.А., Джаватов Д.К. Энергетическая эффективность геотермальной циркуляционной системы и пути их повышения. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.274-279.

21. Вердиев М.Г., Ниналалов С.А. Классификация преобразователей энергии и анализ режимов их работы. // Материалы V Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и X Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э.Э. Шпильрайна. Том 2. 23-26 октября 2017 г. / Под ред. д.т.н. А.Б. Алхасова. – Махачкала: ИП Овчинников (АЛЕФ), 2017. С.279-283.

22. Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. Особенности проектирования тампонажных смесей для крепления высоконапорных скважин // В сборнике Булатовские чтения: Материалы I Международной научно-практической конференции / Т. 3: Бурение нефтяных и газовых скважин / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар: Издат. Дом – Юг, 2017. - С. 35-41.

23. Ilmutdin Abdulagatov, Lala Akhmedova-Azizova, Rasul Aliev, Gasan Badavov. Measurements of the density, speed of sound, viscosity and derived thermodynamic properties of geothermal fluids from south Russia geothermal field // Book of abstracts. Rostocker International Conference: "Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics". 17-18 July 2017. Rostock, Germany. S. 48.

24. Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А. Перспективы использования возобновляемой энергетики в горных территориях // Эффективность горных территорий России: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. (Горный форум-2016). – Махачкала: ДГУНХ, 2016. С. 318-329.

25. Джаватов Д.К., Азизов А.А. Энергетическая эффективность геотермальной циркуляционной системы с вертикальными скважинами // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы мирового научно-технологического развития». Белгород, 2017. Часть 2. С.89-94.

#### всероссийские конференции

1. Алхасов А.Б., Бадавов Г.Б., Белан С.И., Ниналалов С.А. О реализации республиканской целевой программы "Использование возобновляемых источников энергии в Республике Дагестан" // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Вып. 11. / РАН. ИНИОН. Отд. науч. сотрудничества; Отв. ред. В.Н. Герасимов, Д.Е. Ефременко. – М., 2016. – Ч.1. С. 659-662.

### Патенты

1. Алхасов А.Б., Арбуханова П.А., Вердиев Н.Н., Вердиева З.Н., Исаева П.М., Магомедбеков У.Г. Теплоаккумулирующий состав. Патент РФ №2605989. Бюл. №1. 2017.

2. Заявка на изобретение. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Алхасов Б.А. Способ комплексной утилизации геотермальных вод. Дата публикации заявки: 27.01.2017 Бюл.№ 3.

В 2017 году в лаборатории продолжались исследования по гранту РФФИ №16-08-00529А «Разработка энергоэффективных технологий извлечения и использования петротермальной энергии эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов»