

На правах рукописи



АЛХАСОВА ДЖАМИЛЯ АЛИБЕКОВНА

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПЛАСТОВОГО ТИПА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности
2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Махачкала 2024

Работа выполнена в Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ИПГВЭ ОИВТ РАН)

Научный консультант:

Рамазанов Мукамай Магомедович, доктор физико-математических наук, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, лаборатория геотермомеханики, заведующий, г. Махачкала

Официальные оппоненты:

Томаров Григорий Валентинович, доктор технических наук, профессор, общество с ограниченной ответственностью «Геотерм-М», генеральный директор, г. Москва

Шулюпин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, директор, г. Хабаровск

Бутузов Виталий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Энерготехнологии-Сервис», генеральный директор, г. Краснодар

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», г. Калуга

Защита состоится «26» июня 2024 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.347.04
доктор технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Отсутствие новых передовых технологий и, как следствие, неэффективное использование ресурсов геотермальных месторождений является основной причиной низкого уровня развития современной геотермальной отрасли.

Северо-Кавказский регион является одним из перспективных для освоения геотермальной энергии. В пределах Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ) сосредоточены огромные ресурсы разного энергетического потенциала. Гидротермальные ресурсы ВПАБ оцениваются в 1 ГВт электрической и 10 ГВт тепловой мощности. Для геотермальных месторождений региона характерна их неэффективная эксплуатация.

Крайне неэффективно на сегодняшний день эксплуатируются низкопотенциальные термальные воды ВПАБ, которые являются единственным источником водоснабжения для значительного числа потребителей региона. Полноценно используется лишь 20 % выведенных ресурсов. В настоящее время в ВПАБ без соблюдения каких-либо нормативов и зон санитарной охраны эксплуатируется более 7000 артезианских скважин. Бесконтрольная эксплуатация скважин со сбросом воды на окружающие земельные участки привела к заболачиванию больших территорий вокруг них, истощению ресурсов вод и ухудшению их качества. Эти воды никак не используются на теплоэнергетические цели, причина состоит в том, что температура таких вод недостаточна для теплоснабжения. В этих условиях стоит задача эффективной утилизации тепла таких вод с использованием теплонасосных технологий и дальнейшим доведением качества воды до кондиций питьевой воды.

На геотермальных месторождениях скважины, добывающие среднепотенциальные термальные воды, эксплуатируются только в холодное время для отопления различных объектов, а многие скважины находятся в консервации и не эксплуатируются из-за отсутствия потребителя. Эффективное освоение геотермальных ресурсов среднего потенциала является одной из важных проблем, для решения которой необходимо создание новых технологий с использованием ресурсного потенциала на различные энергетические и водохозяйственные цели и круглогодичной эксплуатацией геотермальной скважины.

Наиболее перспективными для комплексного освоения являются рассолы глубокого залегания, которые характеризуются высокими значениями температуры, избыточного устьевого давления, растворенных газов органического происхождения и минерализации. В мезозойских отложениях на глубинах 2200-5500 м залегают высокотемпературные (130-220 °С) рассолы (60-210 г/дм³) хлоридно-натриевого и кальциевого состава. Ресурсы относятся к промышленным водам с высоким содержанием лития, рубидия, цезия, стронция, йода, брома, бора, калия, магния, которые широко применяются в современной экономике.

В пределах ВПАБ выявлено 92 площади с редкометалльными промышленными водами. В настоящее время высокотемпературные рассолы не используются, хотя имеется более 2000 простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях, которые можно перевести на добычу термальных вод. Эффективным направлением освоения высокотемпературных геотермальных рассолов является их комплексная переработка с преобразованием тепловой энергии в бинарной ГеоЭС и последующим извлечением из отработанного рассола различных химических компонентов. Масштабное освоение рассолов с использованием комплексных энергетических технологий даст возможность решить проблемы энергоснабжения региона, полностью обеспечить потребности России в пищевой и технической соли, редких элементах, в частности, в литии.

Энергетические технологии на основе геотермальных ресурсов необходимо рассматривать как важнейшую составляющую стратегического развития Северо-Кавказского региона.

Степень разработанности темы исследования. На территории ВПАБ гидрогеотермические исследования проводились Всероссийским институтом гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), ИПГВЭ ОИВТ РАН, ОАО «Геотермнефтегаз» и другими организациями. Изучены геотермальные месторождения, залегающие на глубинах от 300 до 5000 м. Температура в глубоких резервуарах достигает до 180 °С и выше. Эксплуатируется 12 гидрогеотермальных месторождений с использованием термальной воды на различные теплоэнергетические цели.

В ИПГВЭ ОИВТ РАН разработаны двухконтурные технологии освоения геотермальных ресурсов различного энергетического потенциала со сбросом на поверхность или закачкой обратно в пласт отработанной термальной воды. Обследовано более 300 артезианских скважин на низкопотенциальные воды в 60 населенных пунктах и на прилегающих к ним территориях. Изучен химический состав этих вод и установлены загрязнители, наиболее токсичными из которых являются соединения мышьяка. Детально изучен состав органических загрязнителей, идентифицированы летучие фенолы и гумусовые кислоты. Разработаны технологии очистки низкопотенциальных вод от мышьяка и органических загрязнителей с доведением их качества до кондиций питьевой воды.

Целью работы является оценка состояния геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона, разработка передовых технологий их освоения на основе методологии максимально эффективного использования ресурсного потенциала и рекомендаций по выбору оптимальных конструктивных и эксплуатационных параметров геотермальных энергетических установок и систем.

Исследования направлены на решение важной народнохозяйственной проблемы энергообеспечения субъектов Северо-Кавказского федерального округа на

основе разработки технологий с использованием геотермальной и других возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Достижение сформулированной цели предполагало **решение следующих задач:**

1. Разработка методов эффективного освоения геотермальных месторождений Северо-Кавказского региона, основанных на максимальном использовании теплового, водоресурсного, газового и химического потенциалов термальных вод.

2. Разработка технологий комплексного освоения низкопотенциальных термальных вод ВПАБ с использованием теплового потенциала на энергетические нужды, а самой воды на водохозяйственные цели.

3. Разработка технологий освоения среднепотенциальных термальных вод на основе комбинированных энергетических систем и оценка их энергетической эффективности.

4. Разработка технологий и оценка эффективности комплексной переработки высокотемпературных геотермальных рассолов.

5. Оценка эффективности создания бинарных ГеоЭС на выработанных нефтегазовых месторождениях ВПАБ с использованием простаивающих скважин и технологии геотермальных циркуляционных систем (ГЦС).

6. Разработка комбинированных энергоэффективных технологических систем, использующих геотермальные ресурсы в сочетании с другими возобновляемыми источниками энергии.

7. Разработка рекомендаций по выбору конструктивных параметров теплообменников для утилизации тепла термальной воды с продольным ребрением теплопередающей поверхности.

8. Разработка технологии съема геотермального тепла непосредственно в высокотемпературном пласте без подъема теплоносителя к устью скважины.

9. Исследование закономерностей тепломассопереноса с фазовыми переходами в высокотемпературном геотермальном коллекторе вокруг добывающей скважины.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработаны методы эффективного освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона, предполагающие круглогодичную эксплуатацию геотермальных скважин с использованием теплового, водоресурсного, газового и химического потенциалов термальных вод.

2. Разработаны технологические системы комплексного освоения теплового и водоресурсного потенциалов низкопотенциальных термальных вод с использованием теплонасосных технологий и последующей их очисткой от загрязнителей на блоках химводоочистки.

3. Разработана технология освоения газонасыщенных термальных вод среднего энергетического потенциала, которая предполагает постоянную круглогодичную эксплуатацию геотермальных скважин и повышение эффективности утилизации тепловой энергии термальных вод путем ее преобразования в электроэнергию в комбинированной геотермально-парогазовой энергетической системе (ГПЭС).

4. Показана высокая эффективность и разработаны технологии комплексной переработки высокотемпературных рассолов с утилизацией тепловой энергии в бинарной ГеоЭС и последующим извлечением растворенных химических соединений. Комплексное освоение высокотемпературных геотермальных рассолов является новым направлением в геотермальной энергетике.

5. Разработаны термодинамические, гидродинамические, тепломассообменные и оптимизационные методы расчетов геотермальных систем и их узлов с использованием различных физико-математических и оптимизационных моделей.

6. Проведена оценка эффективности создания бинарных ГеоЭС с использованием простаивающих нефтяных и газовых скважин. Подсчитаны мощности и основные характеристики ГеоЭС с ГЦС-технологией на перспективных площадях ВПАБ.

7. Разработана комбинированная солнечно-геотермальная система для отопления и горячего водоснабжения децентрализованных объектов малой мощности (10-100 кВт), которая реализована для энергоснабжения коттеджного дома на полигоне ИПГВЭ ОИВТ РАН. Результаты проведенных испытаний системы показали ее высокую энергетическую эффективность.

8. Разработаны геотермально-биогазовые технологии с комплексным использованием термальных вод. Технологии предусматривают использование теплового потенциала термальной воды на различные тепловые цели, в том числе в биореакторе для подогрева биомассы и создания термофильного режима ее брожения.

9. Предложена новая технология съема тепла с высокотемпературных рассолов непосредственно в геотермальном пласте скважиной горизонтальной конструкции. Изучены процессы тепломассопереноса в такой системе. Методом Лагранжа получено решение задачи для определения температуры циркулирующего в скважине теплоносителя в произвольный момент времени.

10. Приведены формулировки и получены решения радиально-симметричных задач тепломассопереноса в высокотемпературном геотермальном коллекторе вокруг добывающей скважины с учетом фазовых переходов и теплообмена с кровлей и подошвой пласта.

Теоретическая и практическая ценность работы. Реализация на перспективных участках ВПАБ предложенных в работе энергоэффективных технологий

комплексного освоения геотермальных ресурсов разного потенциала позволит значительно увеличить долю геотермальной энергии и других ВИЭ в энергетическом балансе Северо-Кавказского региона, что существенно повысит энергетическую безопасность и надежность энергоснабжения социально важных объектов, улучшит экономические показатели хозяйственной деятельности, экологическую ситуацию в регионе и условия жизни значительной части населения, обеспечит потребности различных отраслей экономики России в редких элементах за счет их извлечения из высокоминерализованных рассолов.

Результаты теплового, гидродинамического и оптимизационного расчетов оребренных теплообменников дадут возможность подбора их конструктивных параметров при практической реализации. Результаты исследований процесса тепло-массопереноса в высокотемпературном геотермальном коллекторе будут способствовать нахождению оптимальных расходно-температурных характеристик геотермального теплоносителя при разработке геотермальных месторождений. Это позволит эффективно использовать тепловой потенциал высокопараметрических геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии в бинарных ГеоЭС. Результаты также могут быть использованы для определения оптимальных режимных характеристик глубоких скважин при извлечении ценных химических компонентов из теплоносителя и при разработке мероприятий по предотвращению выпадения солевого шлама в скважине.

Реализация результатов работы.

В рамках государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Республике Дагестан» и программы развития возобновляемых источников энергии Министерством энергетики и тарифов Республики Дагестан приняты для практической реализации следующие технологии: комбинированная геотермально-парогазовая энергетическая установка для освоения среднетемпературных термальных вод; солнечно-геотермальная система отопления и горячего водоснабжения децентрализованных потребителей малой мощности; конструкция теплообменника типа «труба в трубе» с продольными ребрами для снятия тепла с высокоминерализованной термальной воды; геотермально-биогазовые технологии с комплексным использованием термальной воды.

Технология комплексного использования термальных вод в энергобиологическом комплексе принята ООО «Геоэкопром» для реализации на Речнинском месторождении Республики Дагестан.

Комбинированная солнечно-геотермальная система для отопления и горячего водоснабжения дома коттеджного типа построена на полигоне ОИВТ РАН в г. Махачкале. По результатам проведенных испытаний система показала высокую эффективность.

Методология и методы исследования. Разработка технологий освоения геотермальных месторождений разного энергетического потенциала основана на методологии эффективного и экологически безопасного использования теплового, водного, газового и химического потенциалов гидрогеотермальных ресурсов; при разработке энергетических технологий на основе геотермальной циркуляционной системы использованы методы теплового и гидродинамического расчетов с исследованием процессов тепломассопереноса в добычной и нагнетательной скважинах, учитывалось влияние термолифта, газлифта и термопресса на эксплуатационные характеристики ГЦС, использованы оптимизационные методы расчета эксплуатационных и конструкционных параметров ГЦС (циркуляционный дебит, расстояние между скважинами, диаметры скважин); исследование процессов тепломассопереноса с фазовыми переходами при извлечении теплоносителя из высокотемпературных геотермальных коллекторов осуществлено с использованием как аналитических, так и численных методов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексное освоение низкопотенциальных термальных вод на основе теплонасосных технологий с утилизацией теплового потенциала на различные теплоэнергетические нужды и дальнейшим использованием охлажденной воды на различные водохозяйственные цели. Исследование возможности вовлечения среднепотенциальных геотермальных ресурсов для получения электроэнергии в бинарных ГеоЭС. Использование среднепотенциальных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии в комбинированных геотермально-парогазовых энергетических системах. Определение параметров ГПЭС, при которых удастся максимально эффективно утилизировать тепло термальной воды при различных вариантах нагрева и испарения низкокипящего рабочего агента. Комплексное освоение высокопараметрических ресурсов Тарумовского месторождения с извлечением химических компонентов из рассола за счет электроэнергии, вырабатываемой в бинарной ГеоЭС на сверхкритическом термодинамическом цикле Ренкина, чем достигается полная автономия производства. Технология комплексного освоения низкотемпературных рассолов Берикейского геотермального месторождения с ГПЭС для обеспечения электроэнергией завода по извлечению химических компонентов и тепличным хозяйством для утилизации тепла геотермальных рассолов и улавливания диоксида углерода из газотурбинной электростанции. Технология комплексного освоения попутно добываемых с нефтью рассолов на Южно-Сухокумском газонефтяном месторождении. Способ комплексной утилизации всех видов энергий термальной воды с температурой 100–220 °С и минерализацией 60–200 г/дм³ и растворенных химических компонентов, что позволит улучшить эко-

номические показатели и решить экологические проблемы освоения геотермальных месторождений.

2. Конструкция теплообменника типа «труба в трубе» с продольными ребрами для снятия тепла с высокоминерализованной термальной воды. Сравнительный анализ вариантов теплопередающей поверхности с продольными ребрами и без них. Методика расчета теплообменного оборудования с продольным оребрением теплопередающей поверхности, используемого для утилизации тепла геотермального теплоносителя. Результаты исследований эффективности теплосъема в скважинных теплообменниках с продольными ребрами и рекомендации по выбору их оптимальных конструктивных параметров.

3. Комбинированная солнечно-геотермальная система для теплоснабжения децентрализованных потребителей малой мощности. Результаты проведенных испытаний реализованной системы, показавшие ее высокую эффективность. Геотермально-биогазовые технологии с комплексным использованием термальных вод и ресурсов биомассы. Технология комплексного использования термальных вод Речинского геотермального месторождения в проекте энергобиологического комплекса с организацией нескольких взаимосвязанных производств.

4. Оценка эффективности создания бинарных ГеоЭС с ГЦС-контуром на выработанных нефтяных и газовых месторождениях. Оптимизационные методы расчета эксплуатационных и конструкционных параметров ГЦС (циркуляционный дебит, расстояние между скважинами, диаметры скважин).

5. Съем тепла с высокотемпературного рассола в геотермальном пласте скважиной горизонтальной конструкции при различных параметрах скважино-пластовой системы. Решение задачи методом Лагранжа.

6. Результаты исследований закономерностей тепломассопереноса с фазовыми переходами в высокотемпературном геотермальном коллекторе вокруг добывающей скважины при различных режимах тепломассопереноса с учетом фазовых переходов.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждена осуществлением комплексных исследований с использованием фундаментальных основ технической термодинамики, теплопередачи, использованием аналитических и численных методов решения задач тепломассопереноса и соответствием результатов современному уровню знаний в исследуемой области.

Личный вклад автора. Выбор тематики исследования; разработка технологических решений и методов комплексного освоения геотермальных ресурсов разного энергетического потенциала с привязкой к месторождениям; разработка методики расчета внутрискважинных теплообменников с продольными ребрами и проведение оптимизационных расчетов; нахождение решений задач тепломассопереноса при извлечении теплоносителя их высокотемпературного геотермального

коллектора; анализ и обобщение полученных в диссертационной работе результатов, формулировка выводов.

Представление изложенных в диссертационной работе и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами. В совместных разработках роль автора преобладающая.

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования проводились в рамках выполнения работ:

– по проектам Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): 13-08-00254а «Разработка технологий эффективного освоения среднепотенциальных геотермальных ресурсов»; 14-08-00052а «Исследование теплопереноса с фазовыми переходами в геотермальном пласте вокруг добывающей скважины»; 16-08-00529а «Разработка энергоэффективных технологий извлечения и использования петротермальной энергии».

– по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» выполнен проект «Разработка эффективных технологий комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья»; по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» – проект «Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов».

– по темам Госзадания: «Исследования по оценке ресурсов и разработке технологий эффективного освоения геотермальной и других видов возобновляемой энергии, физико-химические и экологические аспекты при комплексном освоении гидрогеотермальных и других видов возобновляемых энергетических ресурсов»; «Исследования по разработке технологий комплексного освоения геотермальной и других видов возобновляемой энергии»; «Разработка комбинированных энергетических систем малой мощности на основе различных ВИЭ».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на I–VI Международных конференциях «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» (г. Махачкала, 2005, 2010, 2014, 2015, 2017, 2020); на I–XII Школах молодых ученых «Актуальные вопросы освоения возобновляемых энергоресурсов» (г. Махачкала, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2020); на Региональной научно-технической конференции «Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты» (г. Махачкала, 2005); на Международном симпозиуме молодых ученых, аспирантов и студентов «Инженерные и технологические исследования для устойчивого развития» (г. Москва, 2006); на Шестой Всероссийской научной молодежной школе «Возобновляемые источники энергии» (г. Москва, 2008); на Первом Международном форуме «Возобновляемая энергетика: пути повышения

энергетической и экономической эффективности» (г. Москва, 2013); на Международном конгрессе REENCON– XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность» (Москва, 2016); на IV Международном конгрессе REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность» (Москва, 2018); на Всероссийской конференции «XII Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Сочи, 2021); на VIII Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (г. Махачкала, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 88 работ, в том числе 16 статей в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК), из которых 12 опубликованы в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI; 4 патента Российской Федерации на изобретение; 5 работ в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science; 2 монографии; 61 публикация в научных журналах, сборниках трудов, материалах международных и всероссийских конференций, форумов, симпозиумов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 255 наименований, списка сокращений и приложений; содержит 252 страницы, 80 рисунков, 26 таблиц, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, методы исследования, охарактеризована научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассматриваются современное состояние геотермальной энергетики, перспективы вовлечения доступных на сегодняшний день геотермальных ресурсов в общий топливно-энергетический баланс.

Основные геотермальные ресурсы сосредоточены в трех крупных регионах России: Западно-Сибирском, Предкавказском и Дальневосточном. В настоящее время масштабы практического освоения геотермальной энергии в России определяются величиной гидрогеотермальных ресурсов, на долю которых приходится чуть более 1% из всех доступных для использования геотермальных ресурсов.

Предкавказье является перспективным регионом России для масштабного освоения геотермальной энергии. В гидрогеологическом отношении территория Предкавказья представляет собой сложно построенную пластовую водонапорную систему, включающую два крупных артезианских бассейна платформенного типа:

Азово-Кубанский и Восточно-Предкавказский, а также разделяющее их Ставропольское поднятие. По результатам бурения более 10000 газонефтяных, геотермальных и артезианских скважин наиболее детально изучен ВПАБ. На большей части бассейна в его вертикальном разрезе выделяются три гидрогеотермических яруса: плиоценовый, миоценовый и мезозойский. В этих ярусах соответственно залегают низко-, средне- и высокопотенциальные термальные воды.

Низкопотенциальные гидрогеотермальные ресурсы характеризуются глубинами залегания 200–1200 м, температурой 20–60 °С, минерализацией 0,2–3,5 г/л, избыточным устьевым давлением 0,3–1,2 МПа. Прогнозные ресурсы таких вод составляют 16,5 млн м³/сут. Эти воды являются наиболее изученными водами ВПАБ, в пределах бассейна имеется значительное количество скважин, пробуренных на самоизливающиеся воды с температурой 20–60 °С. Освоение низкопотенциальных термальных вод предполагает их комплексную переработку с утилизацией теплового потенциала на различные теплоэнергетические нужды и дальнейшее использование охлажденной воды на различные водохозяйственные цели.

Среднепотенциальные воды характеризуются глубинами залегания 1200–2500 м, температурой 61–100 °С, минерализацией 2–25 г/л, избыточным устьевым давлением 0,5–2,5 МПа. Прогнозные ресурсы составляют 1,8 млн м³/сут. Освоение среднепотенциальных вод связано с разработкой передовых технологий двухконтурных систем использования тепла и изучением гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в различных элементах систем при эксплуатации. Эффективное освоение этих ресурсов осуществимо в комбинированных энергетических системах, включающих бинарную ГеоЭС и газотурбинную электростанцию (ГТЭС).

Наиболее перспективными для освоения являются высокопотенциальные рассольные воды с разработкой технологий комплексного извлечения тепловой и потенциальной энергии, сопутствующих газов и минеральных солей, и оптимизацией различных термодинамических циклов, реализуемых в установках по утилизации. Высокопотенциальные воды характеризуются глубинами залегания 2500–5500 м, температурой 101–220 °С, минерализацией 20–220 г/л, избыточным устьевым давлением 1,0–25 МПа. Прогнозные ресурсы составляют 2,6 млн м³/сут.

Вторая глава посвящена разработке методики расчета влияния количества и размера продольных ребер на процесс теплообмена в скважинном теплообменнике. Также приводится и гидродинамический расчет оребренных скважинных теплообменников.

Рассматривается теплопередача через цилиндрическую стенку (трубу) с продольными ребрами высоты l на внешней ее поверхности, расположенную внутри трубы большего диаметра (Рисунок 1).

По внутренней трубе и за ее внешней оребренной поверхностью циркулируют потоки воды с температурами T_1 (первичный теплоноситель) и T_2 (вторичный теплоноситель) соответственно, $T_1 > T_2$. Течение как внутри трубы, так и вне её считается турбулентным, тепло передаётся от внутреннего потока воды на металлическую трубу, далее с металлической трубы к внешнему потоку. Температура на внутренней поверхности внутренней трубы отличается от T_1 , так как температурный пристеночный слой толщины δ_T оказывает тепловое сопротивление. Такой же толщины температурный пристеночный слой образуется и на внешней поверхности внутренней трубы, а также на поверхностях ребер. Процесс передачи тепла предполагается установившимся.

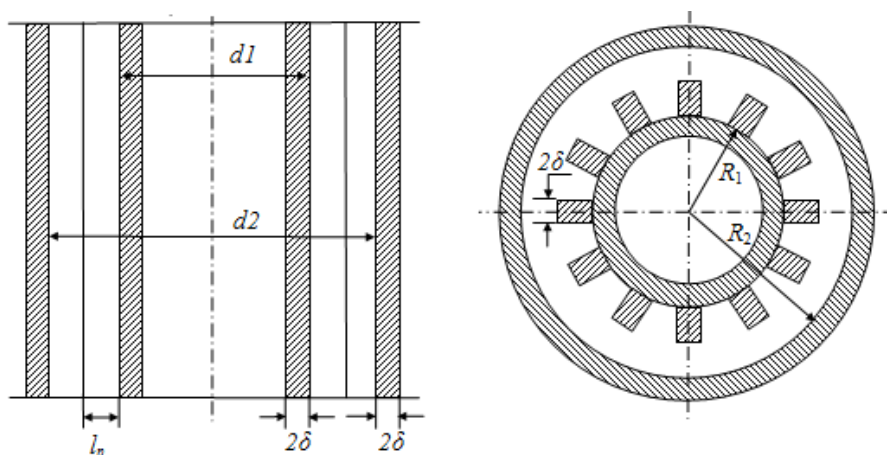


Рисунок 1 – Схема ребристой теплопередающей поверхности:
 d_1 – внешний диаметр внутренней трубы; d_2 – внутренний диаметр наружной трубы; 2δ – толщина стенки внутренней и внешней трубы и ребра;
 l_p – высота ребра

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры вдоль прямоугольного ребра с постоянным по длине поперечным сечением в предположении малости толщины ребра и температурного пристеночного слоя

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - k^2 (T - T_2) = 0, \quad k = \sqrt{\frac{\lambda_B}{\lambda_M \delta \delta_T}}, \quad (1)$$

где λ_B – коэффициент теплопроводности воды, омывающей оребренную теплопередающую поверхность; λ_M – коэффициент теплопроводности металла, применяемого при изготовлении оребренной цилиндрической поверхности; 2δ – толщина стенок трубы и ребер, принимаемая одинаковой.

Общее решение уравнения (1) представляет сумму двух экспонент. После определения постоянных C_1 и C_2 при помощи граничных условий получено выражение для разности температур ребра и омывающего его вторичного теплоносителя. Тепловой поток через все поверхности n ребер определится интегрированием по ребру в предположении, что температурный пристеночный слой имеет везде одинаковую толщину δ_T

$$q_2 = \frac{2n\lambda_B}{\delta_T} \int_0^l (T - T_2) dx = \frac{2n\lambda_B(T_* - T_2)}{\delta_T(Ae^{-kl} + e^{kl})} \left[Ae^{-kl} \frac{e^{kx}}{k} \Big|_0^l - e^{kl} \frac{e^{-kx}}{k} \Big|_0^l \right] =$$

$$= \frac{2n\lambda_B(T_* - T_2)(1 - e^{-kl})(A + e^{kl})}{\delta_T(Ae^{-2kl} + 1)ke^{kl}}.$$

Температура внешней поверхности трубы определена согласно условиям сохранения теплового потока, что приводит к формулам

$$T_* = \frac{\frac{\delta_T}{\lambda_B} T_1 + \left(\frac{\delta_T}{\lambda_B} + 2 \frac{\delta}{\lambda_M} \right) T_2}{2 \left(\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta}{\lambda_M} \right)}, \quad T_* - T_2 = \frac{T_1 - T_2}{2 \left(1 + \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \frac{\delta}{\delta_T} \right)}.$$

Поток тепла через межреберную поверхность трубы с учетом $\delta \ll R$ и $\delta_T \ll R$

$$q_1 = \frac{\pi R - n\delta}{\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta}{\lambda_M}} (T_1 - T_2).$$

Отток тепла через торцевую часть ребер

$$q_3 = n2\delta \frac{\lambda_B}{\delta_T} [T(l) - T_2] = 2n \frac{\delta}{\delta_T} \lambda_B \frac{T_1 - T_2}{2(1 + k^2)} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}}, \quad A = \frac{1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \frac{1}{k\delta_T}}{1 + \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \frac{1}{k\delta_T}}, \quad k = \sqrt{\frac{\lambda_B}{\lambda_M \delta \delta_T}}.$$

Общий поток тепла через трубу с продольными ребрами представляет собой сумму $q = q_1 + q_2 + q_3$. Для оценки эффективности метода продольного оребрения получено отношение q к тепловому потоку без ребер q_0

$$\frac{q}{q_0} = 1 - \frac{n\delta}{\pi R} + \frac{n}{\pi R k} \frac{(1 - e^{-kl})(1 + Ae^{-kl})}{Ae^{-2kl} + 1} + \frac{n\delta}{\pi R} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}}. \quad (2)$$

В расчетах принимались следующие данные: $R_l = 27$ мм, $2\delta = 2$ мм, $\lambda_B = 0,63$ Вт/(м·°С), $\lambda_M = 45$ (Вт/м·°С), $n = 16; 24; 32$. Эффективность продольного

оребрения при скоростях движения воды $v = 1; 0,5$ и $0,2$ м/с оценена по формуле (2). Результаты приведены в Таблице 1. Толщины пристеночного температурного слоя при данных скоростях составили $\delta_T = 0,125; 0,25$ и $0,5$ мм соответственно.

Таблица 1 – Относительный рост потока тепла при продольном оребрении в зависимости от количества ребер, их высоты и скорости потока

Высота ребра l , мм	Скорость потока v , м/с								
	1			0,5			0,2		
	n=16	n=24	n=32	n=16	n=24	n=32	n=16	n=24	n=32
3	1,304	1,456	1,609	1,401	1,602	1,803	1,471	1,707	1,943
6	1,365	1,547	1,730	1,553	1,829	2,106	1,742	2,112	2,483
9	1,374	1,560	1,747	1,595	1,892	2,189	1,862	2,293	2,724
12	1,375	1,562	1,750	1,605	1,908	2,210	1,910	2,365	2,820
15	1,375	1,562	1,750	1,608	1,911	2,215	1,928	2,392	2,856
18	1,375	1,563	1,750	1,608	1,912	2,217	1,935	2,402	2,870
21	1,375	1,563	1,750	1,608	1,913	2,217	1,937	2,406	2,874

Варьируя конструктивными параметрами теплопередающей поверхности (количество ребер, толщина ребристой поверхности, выбор металла с более высокими теплопроводными свойствами), можно добиться увеличения теплового потока через оребренную поверхность в сравнении с не оребренной поверхностью до 4–5 раз.

Проведен гидродинамический расчет оребренных скважинных теплообменников. Перепад давления рассчитан введением вязкого пристеночного слоя, толщина которого определяется гидравлическим сопротивлением в зависимости от числа Рейнольдса. Найдено отношение перепада давления для кольцевого сечения с ребрами к кольцевому сечению без ребер

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_k} = \left(1 + \frac{nl}{\pi(R_2 + R_1)}\right) \left(1 - \frac{nl\delta}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}\right)^{-3} \quad (3)$$

Расчеты показали, что оребрение поверхности приводит к значительному росту перепада давления (до 5 раз и более) в зависимости от количества ребер и их высоты. В качестве одного из возможных критериев оптимальности выбора числа ребер и их высот принят максимум отношения приведенного теплового потока к приведенному дебиту скважины. Поскольку дебит пропорционален при развитом турбулентном движении корню квадратному от перепада давления, то требуется максимум отношения выражения (2) к корню квадратному от выражения (3). На Рисунке 2 приведены подсчитанные отношения для случая стальной конструкции.

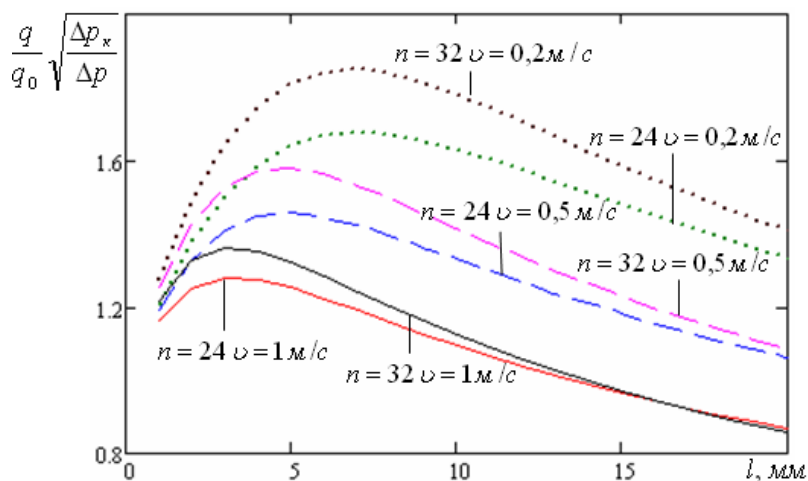


Рисунок 2 – К выбору критерия оптимальности для стальной конструкции теплообменника

Для меди, когда $\lambda_M = 300 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$, графики эти имеют более пологий вид, оптимум размывается, и высоты рёбер в 2–3 раза выше по сравнению со случаем стали.

В третьей главе приводятся разработанные технологии освоения гидротермальных ресурсов ВПАБ разного энергетического потенциала.

Технология комплексного освоения низкопотенциальных термальных вод приведена на Рисунке 3.

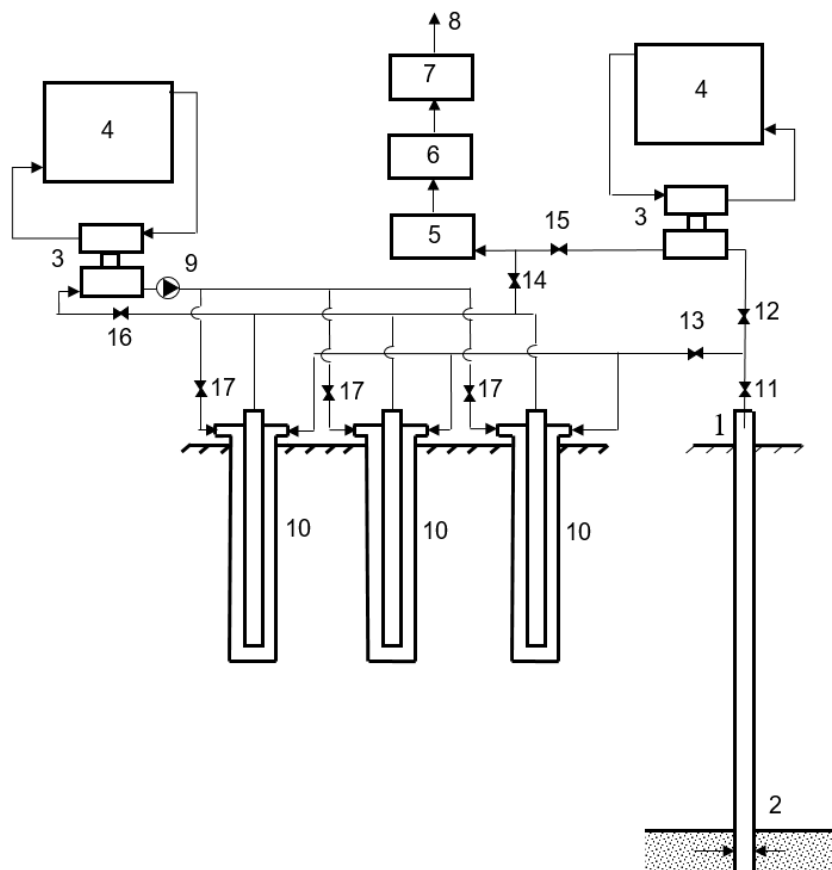


Рисунок 3 – Система комплексного освоения низкопотенциальных термальных вод:

1 – скважина; 2 – эксплуатируемый горизонт; 3 – тепловой насос; 4 – система отопления; 5 – блок химводоочистки; 6 – резервуар чистой воды; 7 – насосная станция; 8 – на водоснабжение; 9 – циркуляционный насос; 10 – скважины-теплообменники; 11 – устьевая задвижка; 12–17 – задвижки

В отопительный период в системе задвижки 13 и 14 закрыты и вся термальная вода из скважины 1 поступает на первый тепловой насос. Охлажденная в испарителе теплового насоса вода поступает на блок химической водоочистки 5 и далее направляется на холодное водоснабжение. В отопительный период работает и второй тепловой насос с отбором тепла с горной породы вокруг скважин-теплообменников 10. В межотопительный период задвижки 12, 15, 16 и 17 закрываются и открываются задвижки 13 и 14, вода из скважины поступает

в скважины-теплообменники, где отдавая тепло горной породе вокруг скважины, охлаждается и далее поступает на блок химводоочистки.

Эффективное освоение низкопотенциальных термальных вод с применением новых комплексных технологий позволит решить проблемы теплоснабжения и горячего водоснабжения, а также питьевого и технического водоснабжения. В комплексных системах достигается максимальное использование продукции термальных артезианских скважин.

Рассмотрена возможность вовлечения среднепотенциальных геотермальных ресурсов для получения электроэнергии в бинарных ГеоЭС. Результаты проведенных оптимизационных расчетов для гидрогеолого-геотермических условий Тернаирского геотермального месторождения (Таблица 2) свидетельствуют о неэффективности прямого использования среднепотенциальных термальных вод для получения электроэнергии в бинарных ГеоЭС.

Таблица 2 – Технологические параметры ГеоЭС (Тернаирское месторождение)

Дебит ГЦС, кг/с	Расстояние между скважинами, м	Давление нагнетания, МПа	Общая мощность ГеоЭС, кВт	Мощность нагнетательного насоса, кВт	Полезная мощность ГеоЭС, кВт
Температура термальной воды $T_T = 80\text{ }^\circ\text{C}$					
4	343	Режим СЦС	16,4	0	16,4
5	384	0,063	20,5	3,2	17,3
10	542	0,6	40,9	6,2	34,7
14	641	1,25	57,3	17,9	39,4
20	767	2,59	81,8	53,0	28,8
24	840	3,73	98,2	91,7	6,5
25	857	4,05	102,3	103,6	0
Температура термальной воды $T_T = 100\text{ }^\circ\text{C}$					
7	455	Режим СЦС	72,6	0	72,6
8	487	0,087	83,0	0,7	82,3
23	826	3,18	238,5	75,5	163,0
35	1018	7,77	363,0	280,2	82,8
39	1075	9,73	404,4	391,4	13,0
40	1089	10,3	414,8	423,2	0

В зависимости от начальной температуры термальной воды максимальная полезная мощность бинарной ГеоЭС с контуром ГЦС составляет всего

39...163 кВт, что свидетельствует о неэффективности использования среднепотенциальных вод для выработки электроэнергии в ГеоЭС с обратной закачкой.

С увеличением расхода в ГЦС мощность нагнетательной насосной станции растет быстрее мощности ГеоЭС и с определенного небольшого расхода начинает превосходить мощность ГеоЭС. При малых расходах циркуляционная система еще работает в режиме самоциркуляционной системы.

Решена проблема освоения среднепотенциальных геотермальных ресурсов для выработки электроэнергии в комбинированных системах с использованием газотурбинных технологий. Предлагаемые ГПЭС позволяют эффективно использовать для выработки электроэнергии термальные воды с температурами 80–100 °С. На Рисунке 4 приведена схема комбинированной ГПЭС. Выхлопные газы газотурбинной электростанции используются для испарения и перегрева рабочего тела, циркулирующего в контуре ГеоЭС. Нагрев до температуры испарения низкокипящего рабочего тела в ГеоЭС осуществляется термальной водой, циркулирующей в контуре ГЦС. Использование ресурсов низконапорного газа совместно с термальными водами позволит осуществить эффективное автономное электро- и тепло-снабжение объектов нефтегазового сектора путем строительства ГПЭС.

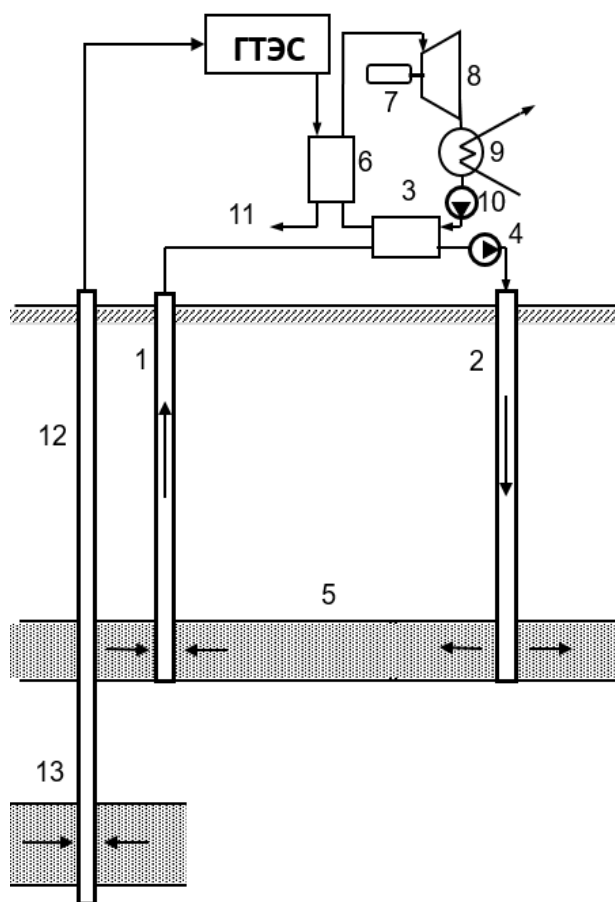


Рисунок 4 – Комбинированная ГПЭС:
1 и 2 – добычная и нагнетательная скважины; 3 – теплообменник; 4 – насос ГЦС; 5 – термоводоносный пласт; 6 – испаритель; 7 – генератор; 8 – турбина; 9 – конденсатор; 10 – циркуляционный насос; 11 – отвод отработанных газов; 12 – газовая скважина; 13 – газовый пласт

Реализация технологии на Махачкала-Тернаирском месторождении позволит получить мощность ГПЭС до 65 МВт при полном использовании ресурсного потенциала.

В Таблице 3 приведены параметры комбинированной ГПЭС и бинарной ГеоЭС для условий Тернаирского месторождения. Из таблицы следует, что ГПЭС имеет неоспоримые преимущества перед ГеоЭС.

Таблица 3 – Параметры энергоустановок ГПЭС и ГеоЭС

Наименование параметра	ГПЭС	ГеоЭС
Мощность блока ГТУ-4П, МВт	4,3(э); 9,63(т)	–
Мощность блока на низкокипящем рабочем агенте, МВт	1,5	1,5
Расход термальной воды в контуре ГЦС, кг/с	21	144
Удельный расход рабочего агента (изобутан), кг/с	1,6	0,4
Расход рабочего агента (изобутан), кг/с	33,6	57,6
Температура термальной воды, °С	100	100
Температура отработанной воды, °С	40	64
Температура испарения рабочего агента, °С	89	62
Давление испарения рабочего агента, МПа	1,6	0,9
Мощность нагнетательной станции, МВт	0,065	20,84
Расстояние между скважинами, м	790	2065

Разработаны схемы комплексного освоения высокотемпературных гидрогеотермальных рассолов (Рисунок 5 а–в).

В схеме на Рисунке 5 а тепловой потенциал высокотемпературной воды используется для получения электроэнергии в бинарной ГеоЭС. Отработанный рассол с низкой температурой из ГеоЭС поступает на завод, где при полном извлечении химических компонентов вода на выходе опресняется. Далее опресненная вода используется на различные водохозяйственные нужды. Преимуществом системы является полная реализация теплового и химического потенциалов высокопараметрических геотермальных ресурсов. Отсутствует необходимость в обратной закачке, что исключает значительные капитальные затраты на строительство нагнетательных скважин, насосной станции и эксплуатационные затраты на их обслуживании.

В схеме на Рисунке 5 б отработанный в ГеоЭС рассол разделяется на два потока, один из которых поступает на завод по извлечению химических компонентов, а другой закачивается по нагнетательной скважине обратно в эксплуатируемый коллектор. Опресненная после выделения химических компонентов вода используется на нужды самого завода и других потребителей. Такая схема комплексного освоения предпочтительна для высокодебитных скважин, в которых добываются высокоминерализованные рассолы, однако при извлечении химических компонентов из всего объема поднимаемой воды возникают проблемы хранения и реализации больших количеств пищевой соли, являющейся основным компонентом присутствующих в рассоле соединений.

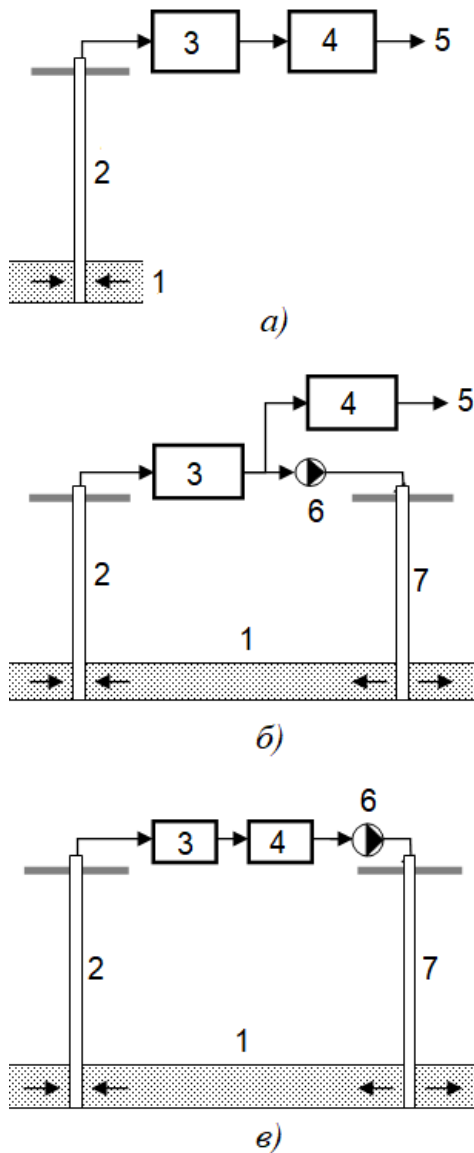


Рисунок 5 – Схемы (а–в) комплексного освоения высокотемпературных геотермальных рассолов: 1 – эксплуатируемый коллектор; 2 – добычная скважина; 3 – бинарная ГеоЭС; 4 – завод по извлечению химических компонентов; 5 – использование отработанной воды на водохозяйственные цели; 6 – насосная станция; 7 – нагнетательная скважина

В схеме на Рисунке 5 в поток высокопараметрического геотермального теплоносителя проходит через ГеоЭС и химзавод, на котором избирательно извлекаются один или несколько наиболее востребованных в промышленности редкометалльных элементов, и далее рассол с основной массой солей закачивается в материнский коллектор.

В приведенных технологиях производство ценных неорганических материалов обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой на ГеоЭС, чем достигается полная автономия производства и независимость от внешних условий.

Принципиальная схема комплексного освоения геотермальных рассолов Берикейского месторождения с полным извлечением всех имеющихся

в них ресурсов приведена на Рисунке 6.

Геотермальный рассол из добычных скважин 1 поступает в сборный пункт 2, откуда часть рассола направляется в ГПЭС, а другая часть подводится в теплицу 3. Рассол, проходя в теплообменнике 5 типа «труба в трубе», нагревает низкокипящее рабочее тело до определенной температуры и после, в охлажденном состоянии, поступает на завод по извлечению химических компонентов 4, куда также из теплицы поступает другая часть рассола. Из теплообменника 5 рабочее тело последовательно проходит через теплообменники 6, 7 и 8, где происходит его нагрев до температуры испарения, испарение и перегрев за счет тепла выхлопных газов ГТЭС. Далее перегретое рабочее тело поступает на турбину 9 с генератором 10, где вырабатывается электроэнергия. Отработанный в турбине пар проходит в конденсатор 12, где происходит его конденсация и далее циркуляционным насосом направляется в теплообменник 5. На заводе 4 из рассола извлекаются химические компоненты, что приводит к его опреснению. Опресненная вода используется на различные водохозяйственные цели, в том числе и для конденсации рабочего тела в цикле

Ренкина. Часть охлажденных выхлопных газов подводится в теплицу для углекислотной подкормки растений, остальная часть выбрасывается наружу.

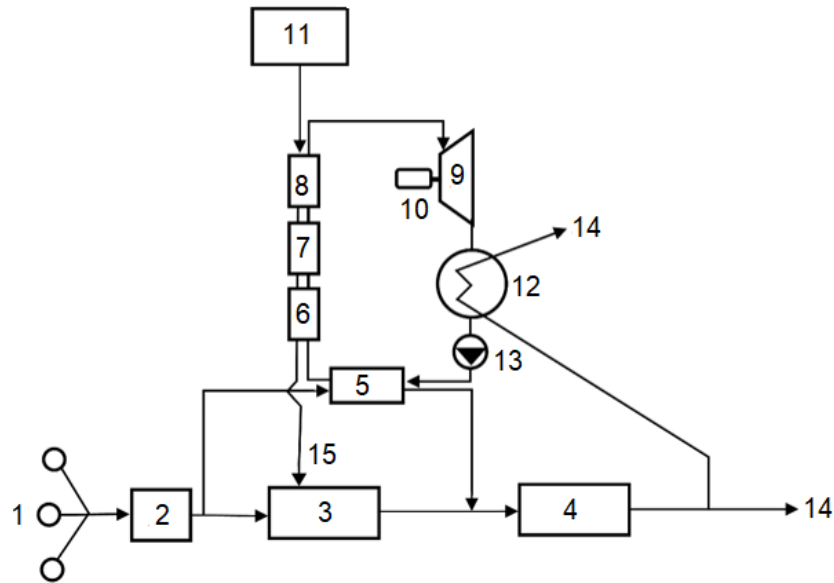


Рисунок 6 – Схема комплексного освоения геотермальных рассолов Берикейского месторождения:

1 – геотермальные скважины; 2 – сборный пункт; 3 – теплица; 4 – завод по извлечению химкомпонентов; 5 – теплообменник для нагрева низкокипящего рабочего тела; 6 – теплообменник для догрева рабочего тела до температуры испарения; 7 – испаритель; 8 – перегреватель; 9 – турбина; 10 – генератор; 11 – газотурбинная электростанция; 12 – конденсатор; 13 – циркуляционный насос; 14 – опресненная вода; 15 – подвод отработанных выхлопных газов в теплицу

В Таблице 4 приведены расчетные характеристики ГПЭС для Берикейского месторождения на основе ГТУ-4П.

Таблица 4 – Характеристики геотермально-парогазовой электростанции

Наименование параметра	ГПЭС
Мощность блока ГТУ-4П, МВт	4,3(э); 9,63(т)
Мощность блока на низкокипящем рабочем агенте, МВт	1,5
Расход термальной воды, кг/с	18,2
Удельный расход рабочего агента (изобутан), кг/с	1,54
Расход рабочего агента (изобутан), кг/с	28
Температура термальной воды, °С	70
Температура отработанной воды, °С	40
Температура испарения рабочего агента, °С	89
Давление испарения рабочего агента, МПа	1,6

При вовлечении всех ресурсов Берикейского месторождения можно извлекать (т/год) карбоната лития – 2000, магнезии – 4000, карбоната кальция – 26000, пищевой соли – 582000.

Освоение всех гидрогеотермальных ресурсов Берикейского месторождения (10 млн м³/год) со снижением их температуры до 40 °С позволит отапливать 15 га теплиц, куда, для углекислотной подкормки растений, будут поступать отработанные выхлопные газы из ГПЭС. Тепличный блок существенно улучшит эколого-экономические показатели всей системы комплексного освоения месторождения.

Освоение ресурсов Тарумовского геотермального месторождения предлагается по схеме на Рисунке 5 а. Извлечение ценных неорганических продуктов обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой на бинарной ГеоЭС мощностью 15,4 МВт на сверхкритическом термодинамическом цикле, чем достигается полная автономия производства. Сверхкритический цикл Ренкина осуществляется при давлении испарения $P_{и} = 5,0$ МПа. Освоение Тарумовского месторождения позволит решить проблему импортозамещения по карбонату лития и пищевой соли, количество извлекаемого карбоната лития составит 4380 т/год, пищевой соли – 583000 т/год.

На Рисунке 7 приведена технология съема тепла с высокотемпературных рассолов непосредственно в геотермальном пласте скважиной горизонтальной конструкции.

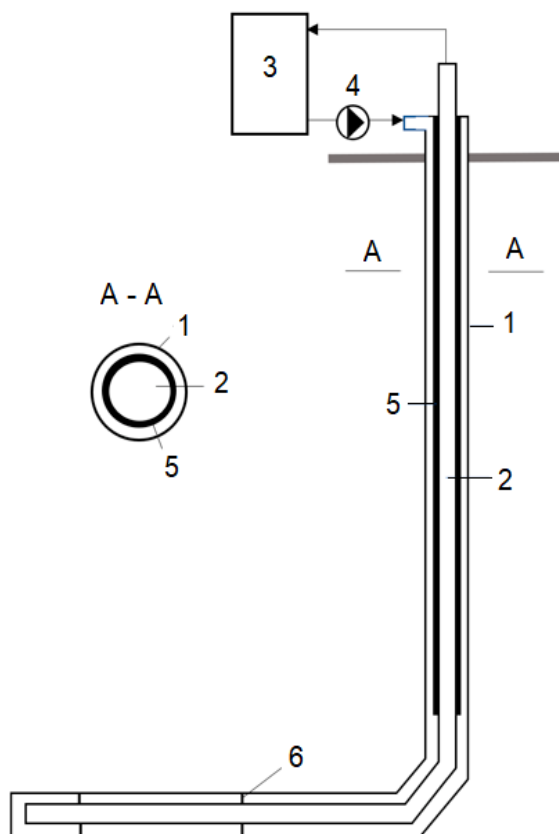


Рисунок 7 – Технологическая схема горизонтальной скважины:

- 1 – наружная колонна; 2 – лифтовая колонна;
3 – потребитель тепла; 4 – насос; 5 – теплоизоляция; 6 – центратор

Преимуществом такой системы является то, что термальная вода не поднимается по скважине на поверхность, что решает важную проблему утилизации агрессивного отработанного теплоносителя, отсутствует необходимость в обратной его закачке и, естественно, исключаются затраты на строительство насосной станции и на ее эксплуатацию и, самое главное, отпадает необходимость в нагнетательной скважине с привлечением огромных капитальных вложений на ее строительство.

Уравнение баланса тепла в скважине

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{2\pi\lambda_n}{\pi r_c^2 \rho C_e} (T_n - T) Nu(t), \quad Nu(t) = \frac{1}{\ln(R(t)/r_c)}; \quad (4)$$

$$T_{x=0} = T_{\text{ex}} .$$

Решение задачи методом Лагранжа

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = (T_n - T) Nu_1(t), \quad Nu_1(t) = \frac{\lambda_n}{r_c^2 \rho C_e} \frac{2}{\ln(R(t)/r_c)} = \frac{2\lambda_n}{r_c^2 \rho C_e} Nu(t);$$

$$\frac{dT}{dt} = Nu_1(t)(T_n - T), \quad \frac{dT}{dt} \equiv \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (5)$$

$$T = T_n - (T_n - T_{\text{ex}}) e^{-\int Nu_1(t) dt}; \quad (6)$$

$$t - \tau = \frac{x}{u} \Rightarrow \tau = t - \frac{x}{u} \Rightarrow$$

$$T = T_n - (T_n - T_{\text{ex}}) e^{-\int Nu_1(t) dt - \frac{x}{u}}, \quad Nu_1(t) = \frac{\lambda_n}{r_c^2 \rho C_e} \frac{2}{\ln(R(t)/r_c)}. \quad (7)$$

Получено решение задачи в размерном виде для расчетов температуры воды в скважине на произвольном расстоянии x от входа в скважину в произвольный момент времени t

$$T(x, t) = T_n - (T_n - T_{\text{ex}}) e^{-\int Nu_1(t) dt - \frac{x}{u}}, \quad Nu_1(t) = \frac{\lambda_n}{r_c^2 \rho C_e} \frac{2}{\ln(R(t)/r_c)}; \quad (8)$$

$$R(t) = r_c + \gamma \sqrt{at}, \quad \gamma \sim 1, \quad a = \frac{\lambda_n}{\rho_s C_s (1-m) + \rho_e C_e m}. \quad (9)$$

Формула справедлива начиная со времени $t \gg L/u$, где L – длина скважины.

Здесь T – температура воды в скважине; T_n – температура насыщенных пород горных пород вне скважины; T_{ex} – температура воды на входе в скважину; λ_n – теплопроводность пород; C_e – удельная теплоемкость воды; ρ_e – плотность воды; x – координата-расстояние вдоль скважины, отсчитываемое от входа в скважину; t – время; r_c – радиус скважины; Q – объемный расход воды в скважине; u – скорость воды в скважине; $Nu(t)$ – безразмерное число Нуссельта зависящее от

времени; $Nu_1(t)$ – функция пропорциональная числу Нуссельта и имеющая размерность обратную времени, т.е. $1/t$; $R(t)$ – эффективный радиус фронта возмущений температуры в породах, вызванного теплообменом со скважиной, m – пористость пласта.

Расчеты проведены для следующих значений параметров: внутренний и внешний диаметры внутренней НКТ $d_{li} = 40,3$ мм, $d_{le} = 48,3$ мм; внутренний и внешний диаметры обсадной трубы $d_{ci} = 124$ мм, $d_{ce} = 146$ мм; толщина изоляции $\delta_{iz} = 12$ мм; глубина залегания водоносного пласта $H = 3000$ и 4000 м; температура закачиваемой воды $T_{зак} = 20$ °С; $m = 20$ %; геотермический градиент $\Gamma = 0,035$ °С/м; $\lambda_n = 2,5$ Вт/(м·°С). Теплоизоляция внутренней трубы считается идеальной.

Зависимости извлекаемой мощности N от длины горизонтального ствола L скважины для различных дебитов при глубинах залегания водоносного пласта $H = 3000$ и 4000 м приведены на Рисунке 8.

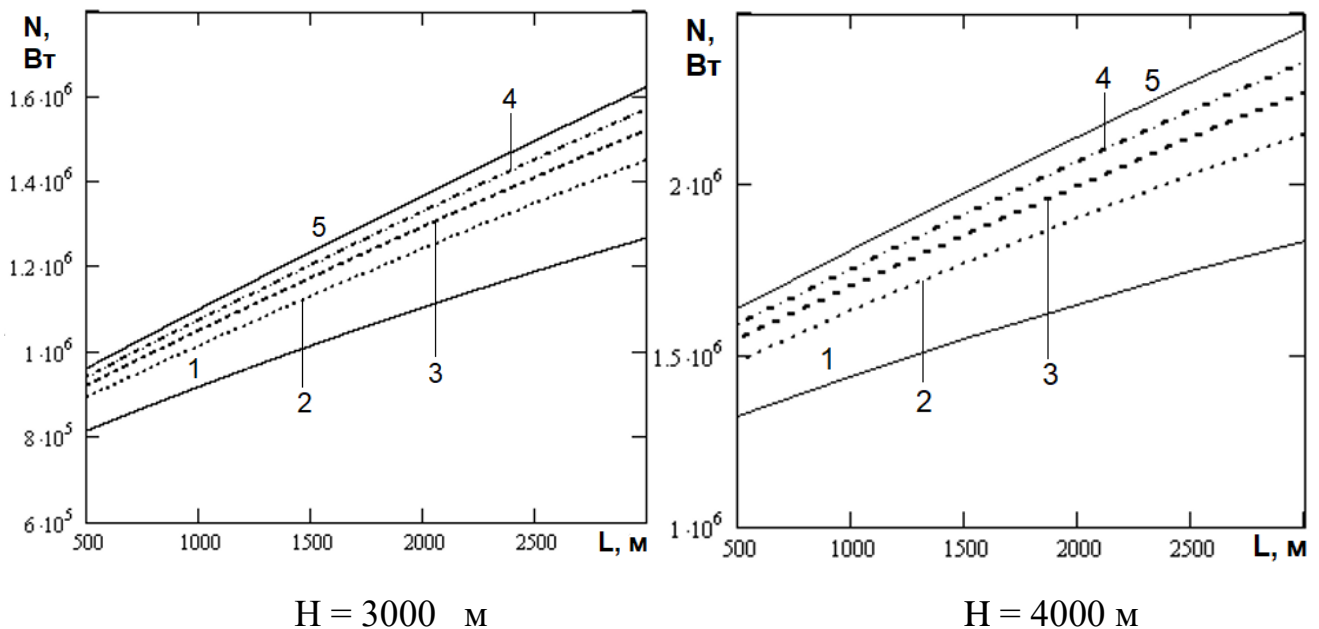


Рисунок 8 – Зависимости извлекаемой мощности от длины горизонтального ствола:

1 – $Q = 500 \text{ м}^3/\text{сут}$; 2 – $800 \text{ м}^3/\text{сут}$; 3 – $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$; 4 – $1200 \text{ м}^3/\text{сут}$; 5 – $1500 \text{ м}^3/\text{сут}$

С увеличением времени эксплуатации системы радиусы возмущения температурного фронта вокруг вертикального и горизонтального участков растут, что сказывается на снижении температуры теплоносителя на выходе. Зависимости на Рисунке 8 демонстрируют возможность получения до 2 МВт и более тепловой мощности при расходах промежуточного теплоносителя $Q = 1000\text{--}1500 \text{ м}^3/\text{сут}$.

В ближайшей перспективе наиболее оптимальным является освоение части ресурсов ВПАБ с использованием простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях. Приведенная разработанная технология освоения

высокотемпературных термальных вод может быть успешно реализована с использованием простаивающих скважин с дополнительным пробуриванием горизонтального ствола.

В четвертой главе приведены разработанные комбинированные технологии освоения возобновляемых энергоресурсов.

Разработана и запатентована комбинированная солнечно-геотермальная система для обеспечения горячей водой и теплом децентрализованных потребителей небольшой мощности, включающая скважинный теплообменник неглубокого заложения, тепловой насос и солнечные коллектора (Рисунок 9).

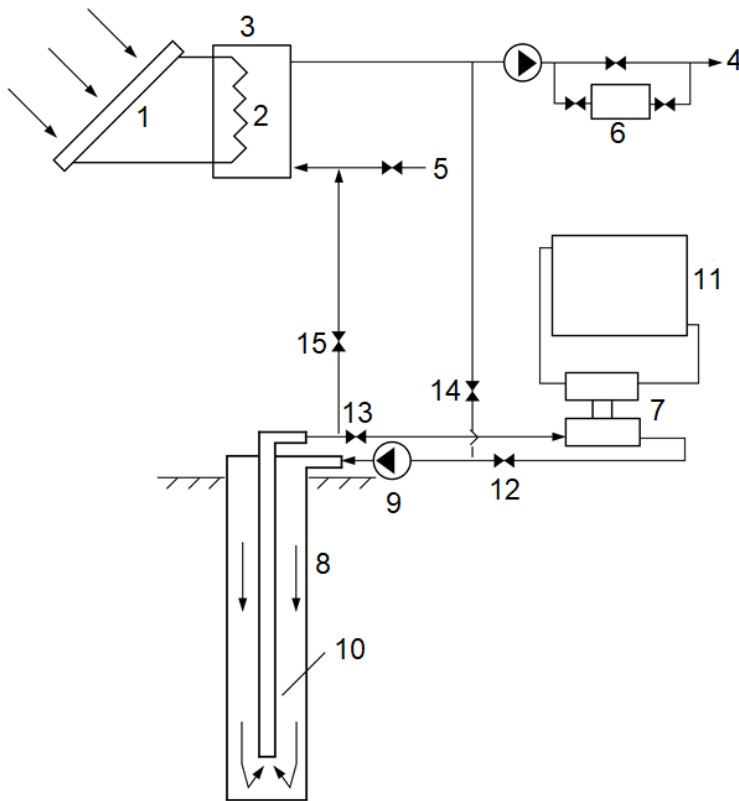


Рисунок 9 – Принципиальная схема солнечно-геотермальной системы отопления и горячего водоснабжения жилого дома:
 1 – солнечный коллектор; 2 – теплообменник; 3 – теплоизолированный бак-аккумулятор горячей водоснабжения; 4 – на горячее водоснабжение; 5 – подвод холодной воды; 6 – электронагреватель; 7 – тепловой насос; 8 – скважина-теплообменник; 9 – циркуляционный насос; 10 – теплоизолированная лифтовая колонна; 11 – система напольного отопления;
 12, 13, 14, 15 – вентили

Технологией предусмотрены отбор тепла с горной породы в отопительный период, и передача этого тепла в систему отопления с тепловым насосом, восстановление в межотопительный период температурного поля вокруг скважины путем аккумуляции в горной породе тепла, поступающего с горячей водой в скважинный теплообменник из бака-аккумулятора.

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

В цикле теплового насоса холодная вода с температурой 5 °С опускается в межтрубном пространстве скважины-теплообменника и отбирает низкопотенци-

альное тепло с окружающей горной породы. Далее, нагретая в зависимости от глубины скважины до температуры 10–15 °С вода поднимается по центральной колонне труб на поверхность. Для предотвращения обратного оттока тепла центральная колонна снаружи теплоизолирована. На поверхности вода из скважины поступает в испаритель теплового насоса, где происходит нагрев и испарение низкокипящего рабочего агента. После испарителя охлажденная вода вновь направляется в скважину. За отопительный период при постоянной циркуляции воды в скважине происходит постепенное охлаждение окружающей ее горной породы.

В межотопительный период, когда система отопления отключается, происходит частичное (до 90 %) восстановление температурного поля вокруг скважины за счет притока тепла от пород вне зоны охлаждения; достичь полного восстановления температурного поля вокруг скважины за время ее простоя не удастся. В летний период избыток тепловой энергии в виде горячей воды из бака-аккумулятора направляется в скважину для полного восстановления температуры в горной породе вокруг нее.

Проведены исследования по отбору тепла с горной породы скважинным теплообменником. Проведенные расчеты показывают, что оптимальный расход промежуточного теплоносителя составляет 0,5–0,6 кг/с (Рисунок 10). Дальнейшее увеличение расхода практически не приводит к увеличению теплосъема с горной породы.

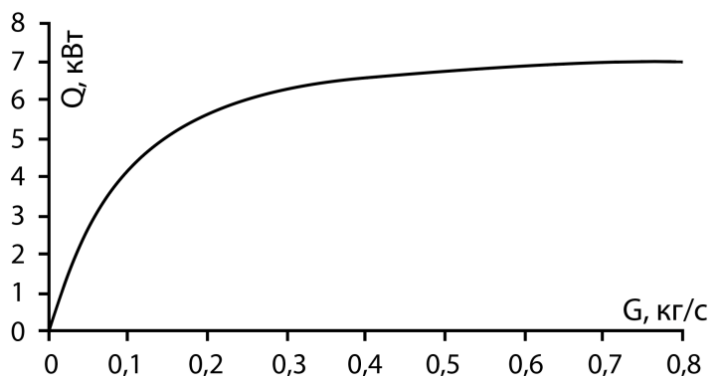


Рисунок 10 – Зависимость теплосъема Q грунтового теплообменника от массового расхода G теплоносителя

Комбинированная солнечно-геотермальная система для отопления и горячего водоснабжения дома

коттеджного типа построена на полигоне Объединенного института высоких температур РАН в г. Махачкале. Система включает в себя скважинный теплообменник глубиной 100 м для отбора тепла с горной породы, солнечные коллекторы (20 шт.) общей площадью 20 м², теплоизолированный бак-аккумулятор горячей воды объемом 1,2 м³ с встроенным теплообменником, линию горячей воды, а также энергоблок низкотемпературного отопления с тепловым насосом мощностью 15 кВт и циркуляционным насосом для прокачки промежуточного теплоносителя.

Вырабатываемая солнечными коллекторами тепловая энергия используется полностью. В летний период часть тепловой энергии, теряемая безвозвратно в других конструкциях солнечных установок, в предлагаемой системе накапливается в

грунтовым аккумуляторе и в отопительный период тепловым насосом подается для отопления дома.

По результатам проведенных испытаний комбинированная солнечно-геотермальная система показала высокую эффективность для теплоснабжения децентрализованных потребителей небольшой мощности.

Разработана (Рисунок 11) схема комплексного использования термальных вод Речнинского геотермального месторождения в проекте энергобиологического комплекса (ЭБК).

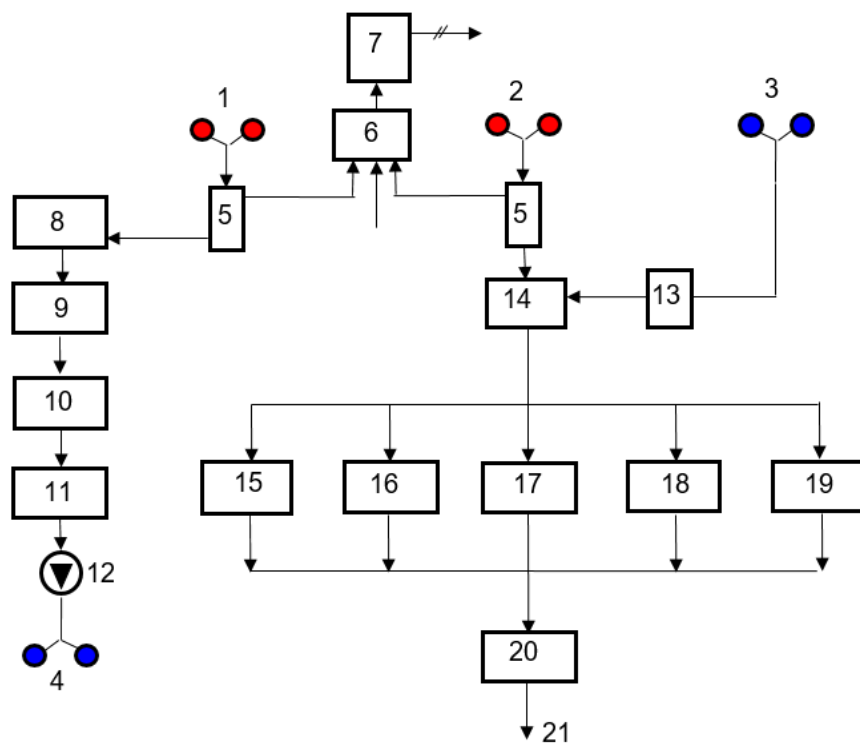


Рисунок 11 – Схема комплексного использования термальных вод в ЭБК:
 1 – скважины №№ 2т, 3т ($T = 104\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 192\text{ т/ч}$); 2 – скважины №№ 1т, 4т ($T = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 46\text{ т/ч}$); 3 – скважины №№ 1а, ... 5а ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 263\text{ т/ч}$); 4 – скважины №№ 5т, 6т; 5 – дегазатор; 6 – газораспределительная станция; 7 – газотурбинная установка ($N_{ГТУ} = 1\text{ МВт}$); 8 – отопление жилых зданий; 9 – блочная теплица; 10 – птицефабрика; 11 – обогреваемый грунт (2,3 га); 12 – насосная станция закачки; 13 – аэратор; 14 – смеситель; 15 – блок выращивания молоды осетровых; 16 – блок выращивания товарных осетровых; 17 – блок выращивания микроводорослей; 18 – блок производства х/п дрожжей; 19 – физиотерапевтический блок; 20 – блок фильтров; 21 – сброс в реку

Высокотемпературная вода из скважин №№ 2т, 3т поступает в дегазатор, где происходит отделение растворенных газов. Далее вода последовательно направляется

ется на обогрев жилого комплекса, теплицы, птицефабрики и грунта, где происходит максимально эффективное использование теплового потенциала скважин. Отработанная вода после обогрева грунта поступает на насосную станцию для закачки в скважины №№ 5т, 6т. Термальная вода из скважин №№ 1т, 4т также направляется в дегазатор и далее в смеситель, куда из артезианских скважин поступает низкопотенциальная вода, предварительно обогащенная кислородом воздуха в аэраторе. Вода из смесителя поступает в рыбохозяйственный комплекс, блок для выращивания микроводорослей, производства хлебопекарных дрожжей и физиотерапевтический блоки. Отработанная вода проходит через фильтры и сбрасывается в реку. Газы, отделенные из термальной воды после их осушки, поступают в газораспределительный пункт и далее утилизируются в газотурбинной установке (ГТУ) мощностью 1 МВт. ГТУ полностью обеспечивает потребности ЭБК в электроэнергии.

Блок выращивания микроводорослей представляет собой открытые круглые бассейны, глубиной до 0,5 м и площадью по 0,1 га, всего – 20 га. Высокая продуктивность хлореллы на геотермальной воде объясняется наличием в ней легко усвояемых солей, микроэлементов, углекислого газа и оптимальной рН среды. С 1 га водной поверхности в пересчёте на сухое вещество можно получить до 7 т хлореллы. В рыбохозяйственном блоке ЭБК геотермальные воды используются, прежде всего, как эффективный источник воды и тепла, необходимый для подпитки садков и бассейнов при искусственном разведении в них деликатесных пород рыб.

Перспективными являются комбинированные системы утилизации биомассы и геотермальной энергии. Одной из таких технологий является переработка животноводческих отходов, в которой часть термальной воды подводится в блок конверсии биомассы для поддержания в биореакторах необходимого температурного режима, остальная высокотемпературная вода направляется в ГПЭС для нагрева низкокипящего рабочего тела в блоке бинарной ГеоЭС до температуры испарения. В конверсионном блоке из биомассы получают обеззараженные удобрения высокого качества и биогаз. После осушки биогаз поступает в блок ГТЭС, где вырабатывается электроэнергия. Отработанные в цикле ГТЭС высокотемпературные выхлопные газы направляются в блок ГеоЭС для испарения и перегрева рабочего тела в цикле Ренкина. Далее отработанные газы поступают в блок по выращиванию белково-витаминной биомассы. Отработанная термальная вода закачивается в материнский пласт.

В **пятой главе** рассмотрены радиально-симметричные задачи, связанные с притоком теплоносителя к скважине с учетом фазовых переходов, изучены режимы тепломассопереноса с фазовыми переходами вокруг добывающей скважины, реализуемые в высокотемпературном геотермальном пласте.

Получено решение, описывающее фронтальной режим теплопереноса при извлечении пара из высокотемпературного пласта. Для характерных пластовых параметров фронт кипения продвигается на очень малые расстояния, так, что в первом приближении этим расстоянием можно пренебречь и считать, что кипение происходит в скважине. Таким образом, фронтальной режим извлечения пара из геотермального пласта в общем случае маловероятен. Полученное в работе решение показывает, при каких условиях фронт кипения может продвинуться на значительные расстояния. Например, когда начальное состояние воды в пласте близко к состоянию фазового перехода, и по мере приближения к термодинамической критической точке, когда плотности пара и воды на фронте кипения сближаются. В противном случае фронт кипения отходит от скважины лишь на незначительное расстояние.

Рассмотрена задача о теплопереносе в геотермальном пласте, насыщенном пароводяной смесью, при извлечении теплоносителя одиночной скважиной. Предполагается, что в начальный момент времени геотермальный пласт, насыщенный пароводяной смесью, имеет давление P_0 , температуру насыщения $T_0 = F(P_0)$ и водонасыщенность S_0 . В результате эксплуатации скважины ее давление падает до значения P^0 . Это приведет к изменению водонасыщенности в окрестности скважины и, как показали расчеты, необязательно к дополнительному парообразованию. Водонасыщенность у скважины в зависимости от параметров задачи может и увеличиться, несмотря на падение давления. Система уравнений, описывающая теплоперенос в пласте, заполненном пароводяной смесью, находящейся в термодинамическом равновесии

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{\partial}{\partial t} S \rho_w + \operatorname{div} \rho_w v_w = M_v \\ m \frac{\partial}{\partial t} (1-S) \rho_v + \operatorname{div} \rho_v v_v = -M_v \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho e)_m + \operatorname{div} (\rho_w h_w v_w + \rho_v h_v v_v) = \operatorname{div} (\lambda_m \operatorname{grad} T) \\ v_j = -\frac{k}{\mu_j} f_j(S) \operatorname{grad} P, \quad j = w, v \\ \rho_w = \rho_{w0} (1 + \alpha (P - P_0) - \beta (T - T_0)) \\ P = \rho_v R T \\ \ln \frac{P}{P_a} = A + \frac{B}{T} \end{array} \right. , \quad (10)$$

где $dh_w = C_w dT + \frac{1 - \beta T}{\rho_w} dP$, $dh_v = C_p dT$, $\lambda_m = mS \lambda_w + m(1-S) \lambda_v + (1-m) \lambda_s$,

$$(\rho e)_m = mS\rho_w e_w + m(1-S)\rho_v e_v + (1-m)\rho_s e_s, \quad de_s = C_s dT, \quad e_j = h_j - \frac{P}{\rho_j}.$$

Начальные и граничные условия

$$t = 0: P = P_0, S = S_0;$$

$$r = r_c: P = P^0;$$

$$r = L: P = P_0, S = S_0.$$

Получено точное решение стационарной и квазистационарной нелинейных задач, которые допускает математическая модель, описывающая теплоперенос в пласте, заполненном пароводяной смесью, находящейся в термодинамическом равновесии.

Из (10) нетрудно заметить, что в стационарном случае сумма первых двух уравнений интегрируется, что означает постоянство массового расхода смеси через границу произвольного круга с центром в скважине. Далее, учитывая условие равновесия воды и пара, а также уравнения состояния, удастся проинтегрировать и третье уравнение, т.е. уравнение переноса тепла. В результате точное стационарное решение имеет вид

$$\int_{T^0}^T \frac{dT}{\left[\frac{N(S(T), T) T \lambda_{m0}}{N_0 \lambda_m(T)} - \frac{\lambda_{m0}}{\lambda_m(T)} T_0 - \frac{M_0 \lambda_{m0}}{N_0 \lambda_m(T)} \right]} = -(b-1) \ln r, \quad b = \frac{N_0 Q}{\lambda_{m0}} + 1,$$

$$S(T) = \frac{(N_0 T_0 + M_0) \rho_v \mu_w - (C_w T + q) \rho_v \mu_w - \frac{dT}{dP} \frac{\mu_w \mu_v}{k} [(1-m)\lambda_s + m\lambda_v]}{C_w T (\rho_w \mu_v - \rho_v \mu_w) - \rho_v \mu_w q + \frac{dT}{dP} \frac{\mu_w \mu_v m (\lambda_w - \lambda_v)}{k} - (N_0 T_0 + M_0) (\rho_w \mu_v - \rho_v \mu_w)},$$

$$\ln \frac{P}{P_a} = A + \frac{B}{T}, \quad (11)$$

$$\rho_v = P / (RT), \quad \rho_w = \rho_{w0} (1 + \alpha(P - P_0) - \beta(T - T_0)),$$

$$N(S, T) = C_w + \frac{\rho_v \mu_w (1-S)}{\rho_w S \mu_v + \rho_v (1-S) \mu_w} \frac{q}{T}, \quad N_0 = N(S_0, T_0),$$

$$M(S, T) = \lambda_m \frac{dT}{dP} \frac{\mu_w \mu_v}{k (\rho_w S \mu_v + \rho_v (1-S) \mu_w)}, \quad M_0 = M(S_0, T_0),$$

$$\lambda_m = mS\lambda_w + m(1-S)\lambda_v + (1-m)\lambda_s.$$

Здесь за единицу длины принят радиус скважины r_c ; $L \gg r_c$ – характерный

радиус рассматриваемой области пласта вокруг добывающей скважины; m – пористость пласта; S – водонасыщенность; ρ_w, ρ_v – плотности воды и пара; M_v – интенсивность парообразования; f – функция относительной проницаемости фаз; v_w, v_v – скорости фильтрации воды и пара; $(e)_m, e_w, e_v, e_s$ – удельные внутренние энергии насыщенной пористой среды, воды, пара и скелета пористой среды; $(h)_m, h_w, h_v$ – удельные энтальпии насыщенной пористой среды, воды и пара; P, T – давление и температура смеси; P_a – атмосферное давление; k – проницаемость; μ_w, μ_v – вязкости воды и пара; α, β – коэффициенты сжимаемости и теплового расширения; R – удельная газовая постоянная; $\lambda_m, \lambda_w, \lambda_v, \lambda_s$ – коэффициенты теплопроводности насыщенной пористой среды, воды, пара и скелета пористой среды; P_0, T_0, S_0 – невозмущенные давление, температура и водонасыщенность смеси в пласте; P^0, T^0, S^0 – давление, температура и водонасыщенность смеси в скважине.

Массовый расход смеси $2\pi Q$ находится из условия

$$b = 1 - \frac{1}{\ln L} \int_{T^0}^{T_0} \frac{dT}{\left[\frac{N(S(T), T) T \lambda_{m0}}{N_0 \lambda_m(T)} - \frac{\lambda_{m0}}{\lambda_m(T)} T^0 - \frac{M_0 \lambda_{m0}}{N_0 \lambda_m(T)} \right]}, \quad Q = \frac{\lambda_{m0}}{N_0} (b - 1). \quad (12)$$

Здесь L – радиус области пласта вокруг добывающей скважины, насыщенной пароводяной смесью, на границе которой заданы значения P_0, T_0, S_0 .

Получена зависимость проницаемости пласта от водонасыщенности на входе в скважину

$$k(S^0) = \frac{M(S^0, T^0) - M_0}{N_0 T_0 - N(S^0, T^0) T^0}.$$

Предположив, что $S^0=1$ (если при этом правая часть положительна), можно найти одну из критических проницаемостей, когда пароводяная смесь у скважины полностью конденсируется, образуя чистую воду. Также полагая, что $S^0=0$, в случае положительности правой части, определяется критическая проницаемость, когда пароводяная смесь у скважины полностью превращается в пар. Если же какое-либо из указанных уравнений не имеет решения, то соответствующая фаза в чистом виде не может быть получена ни при каких проницаемостях для данных значений остальных параметров.

Распределения температуры, давления и водонасыщенности, отнесенные к невозмущенным значениям, в зависимости от отношения расстояния от скважины к ее радиусу приведены на Рисунке 12. Результаты расчетов показали, что если проницаемость достаточно мала, водонасыщенность становится больше единицы, что, естественно, не имеет физического смысла. Это значит, что рассматриваемый режим тепломассопереноса нарушается и необходимо расширить рассматриваемую

модель введением вокруг скважины области с чистой водой, сопряженной с областью пароводяной смеси. С другой стороны, при больших проницаемостях пласта происходит резкое увеличение паросодержания теплоносителя у скважины, т.е. уменьшение водонасыщенности.

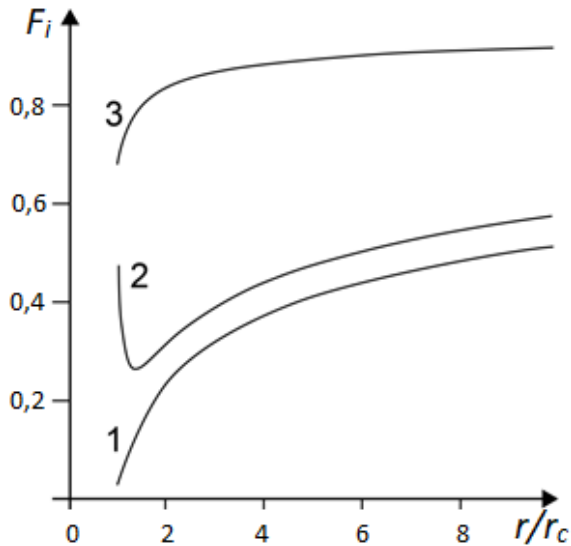


Рисунок 12 – Распределение приведенных термомеханических полей вокруг добывающей скважины при $P_0 = 15$ МПа, $P^0 = 0,45$ МПа, $S_0 = 0,6$, $k = 0,6 \cdot 10^{-16}$ м²:
1 – P/P_0 , 2 – S/S_0 , 3 – $F_i=T/T_0$

Расчеты показывают, если начальная водонасыщенность пласта достаточно мала, водонасыщенность у скважины в рамках данной модели для достаточно большой проницаемости или малых давлений в скважине становится отрицательной. Таким образом, при этих параметрах рассматриваемый режим тепломассопереноса также нарушается и модель необходимо расширять введением дополнительной области чистого пара вокруг скважины, сопряженного с областью пароводяной смеси. Все это подтверждено Рисунком 13, где приведена диаграмма различных режимов тепломассопереноса.

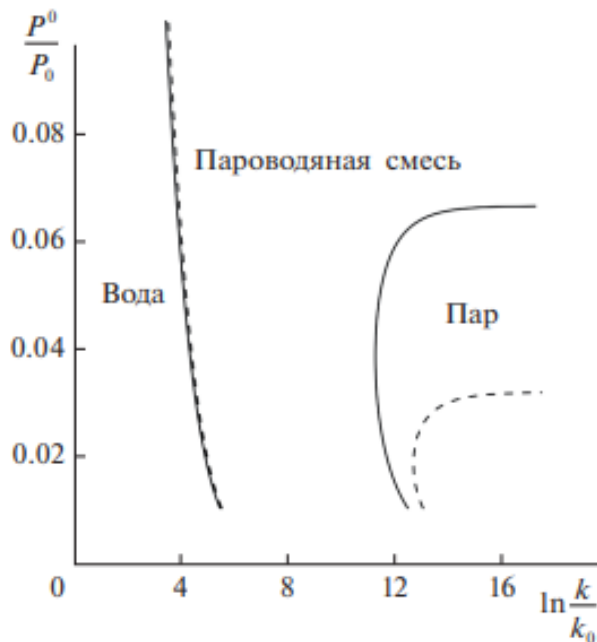


Рисунок 13 – Критические проницаемости в зависимости от отношения давления в скважине к пластовому давлению при $k = 10^{-19}$ м², $P_0 = 15$ МПа:
сплошные линии – $S_0 = 0,2$; пунктирные – $S_0 = 0,25$

При давлении в скважине больше критического (при фиксированных прочих параметрах), образование чистого пара у скважины невозможно ни при каких проницаемостях.

Эволюция распределения температуры вокруг скважины по мере продвижения радиуса фронта возмущений $R_T(t)$, полученная в рамках квазистационарного решения задачи, приведена на Рисунке 14.

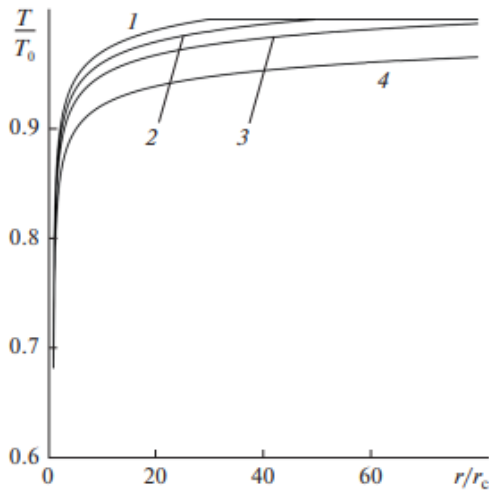


Рисунок 14 – Квазистационарное распределение температуры при различных значениях радиуса фронта возмущений температуры при $P_0 = 15$ МПа, $P^0 = 0,45$ МПа, $k = 10^{-16}$ м²:
1 – $R_T = 3$ м, 2 – 5, 3 – 10, 4 – 100

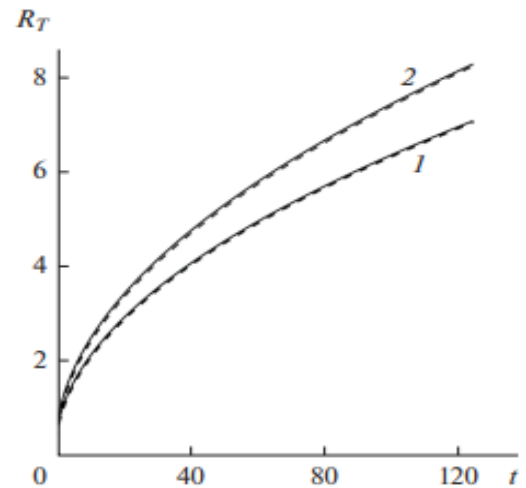


Рисунок 15 – Закон движения фронта возмущения начальных распределений полей T_0, P_0, S_0 в пласте (R_T (м), t (сут)) при $P_0 = 15$ МПа, $P^0 = 0,45$ МПа, $k = 10^{-16}$ м²:
1 – $S_0 = 0,6$, 2 – 0,2

Законы движения фронта возмущений $R_T(t)$, полученные численным интегрированием в рамках квазистационарного решения задачи, при двух разных значениях исходных водонасыщенностей приведены на Рисунке 15. Здесь пунктирами показаны полученные приближенные зависимости для $R_T(t)$. Полученный корневой закон для $R_T(t)$ достаточно точно определяет закон движения фронта возмущений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С использованием методов, основанных на максимальном использовании теплового, водоресурсного, газового и химического потенциалов термальных вод разработаны технологии освоения геотермальных ресурсов разного энергетического потенциала с привязкой к конкретным геотермальным месторождениям. Проведена оценка эффективности предложенных технологий с привлечением физико-математических, термодинамических и оптимизационных методов расчетов и проведением натурных испытаний.

2. Разработаны технологии комплексного освоения низкопотенциальных геотермальных ресурсов на основе теплонасосных систем, где достигается эффективное использование тепла артезианской воды на теплоэнергетические цели и самой воды на водохозяйственные нужды с доведением ее качества до кондиций питьевой воды на различных блоках водоочистки. Реализация технологий позволит значительно улучшить проблемы теплоснабжения и горячего водоснабжения, а

также питьевого и технического водоснабжения густонаселенного Северо-Кавказского региона.

3. Разработана технология комбинированной ГПЭС, позволяющая эффективно использовать для выработки электроэнергии термальные воды с температурой 80–100 °С. Такая система включает блоки бинарной ГеоЭС и ГТЭС. В зависимости от расхода геотермальной циркуляционной системы и температуры термальной воды низкокипящее рабочее тело в блоке ГеоЭС можно нагреть: до определенной температуры; до температуры испарения; частичного испарения. Дальнейший нагрев или испарение и перегрев рабочего тела осуществляется за счет выхлопных газов ГТЭС. В камеру сгорания ГТЭС подводится: газ, извлеченный из термальной воды, низконапорный остаточный газ из выработанных газовых месторождений, биогаз или смесь перечисленных газов. Реализация данной технологии на Махачкала-Тернаирском месторождении позволит получить мощность ГПЭС до 65 МВт. Комбинированные ГПЭС наиболее эффективны для автономного электро- и тепло-снабжения промышленных участков нефтегазового сектора.

4. Разработаны схемы комплексного освоения высокотемпературных гидрогеотермальных рассолов Северо-Кавказского региона с использованием их теплового и химического потенциалов. Освоение рассолов позволит решить значительные проблемы энергоснабжения региона и обеспечить потребности России в редких элементах. Предложена технология для гидрогеотермальных ресурсов Тарумовского месторождения, в которой тепловой потенциал высокотемпературного рассола используется для получения электроэнергии в бинарной ГеоЭС на сверхкритическом цикле, а отработанный рассол с низкой температурой поступает на завод для извлечения химических компонентов (карбонат лития, пищевая соль и др.) и далее опресненная вода используется на водохозяйственные цели. Извлечение химических компонентов обеспечивается электроэнергией, вырабатываемой на бинарной ГеоЭС, чем достигается полная автономия производства. Предложена технология комплексного освоения низкотемпературных (70 °С) рассолов Берикейского геотермального месторождения с ГПЭС для обеспечения в электроэнергии завода по извлечению химических компонентов и тепличным хозяйством для утилизации тепла геотермальных рассолов и улавливания диоксида углерода из ГТЭС. Предложена технология комплексного освоения попутно добываемых с нефтью рассолов на Южно-Сухокумском газонефтяном месторождении, где рассол последовательно проходит через бинарную ГеоЭС, блок теплообменников, узел дезактивации и завод по извлечению химических компонентов. Для снятия остаточного тепла с рассола в блок теплообменников поступает холодная артезианская вода неглубокого залегания, а опресненная вода из завода и нагретая артезианская вода используются в энергобиологическом комплексе.

5. Обоснована возможность эффективного освоения геотермальных ресурсов

региона путем строительства бинарных ГеоЭС на основе геотермальных циркуляционных систем с использованием простаивающих нефтяных и газовых скважин. Подсчитаны мощности и основные характеристики ГеоЭС на перспективных площадях, использование всего фонда простаивающих скважин позволит получить общую полезную мощность ГеоЭС до 330 МВт.

6. Предложена комбинированная солнечно-геотермальная система для теплоснабжения децентрализованных потребителей малой мощности, включающая скважинный теплообменник неглубокого заложения, тепловой насос, бак-аккумулятор и солнечные коллектора. Технологией предусмотрены отбор тепла с горной породы в отопительный период и передача этого тепла в систему отопления с тепловым насосом, восстановление в межотопительный период температурного поля вокруг скважины путем аккумуляции в горной породе тепла, поступающего с горячей водой в скважинный теплообменник из бака-аккумулятора. Комбинированная солнечно-геотермальная система реализована на полигоне ИПГВЭ ОИВТ РАН в г. Махачкале для тепло- и горячего водоснабжения коттеджного дома, результаты испытаний показали ее высокую эффективность.

7. Разработана математическая модель, описывающая процесс теплообмена между потоками в трубе и коаксиальном зазоре для оценки эффективности оребрения скважинного теплообменника. Согласно результатам проведенных многовариантных расчетов, передачу тепла в скважинных теплообменниках можно увеличить продольным оребрением до нескольких раз; продольное оребрение более эффективно при малых скоростях потока жидкости; с увеличением числа ребер отвод тепла растет пропорционально их числу, однако увеличивается гидравлическое сопротивление. Разработана методика, позволяющая рассчитывать перепад давления при движении потока по кольцевому сечению с ребрами. Сформулирован критерий оптимальности выбора параметров скважинного теплообменника с ребрами. Разработаны рекомендации по выбору конструктивных параметров теплообменников для утилизации тепла термальной воды с продольным оребрением теплопередающей поверхности.

8. Разработана технология съема тепла с высокотемпературных рассолов непосредственно в геотермальном пласте скважиной горизонтальной конструкции. Методом Лагранжа получено решение задачи для определения температуры воды в скважине в произвольный момент времени. Проведены многовариантные расчеты по оценке тепломассопереноса с использованием разработанной математической модели. Приведены зависимости извлекаемой тепловой мощности от длины горизонтального ствола при различных расходах теплоносителя.

9. Приведены математические формулировки радиально-симметричных задач об извлечении теплоносителя из высокотемпературного пласта одиночной

скважиной при различных режимах тепломассопереноса с учетом фазовых переходов и теплообмена с кровлей и подошвой. Получены условия существования фронтального режима извлечения пара из высокотемпературного пласта. Показано, что в отличие от известного плоского одномерного случая, в рассматриваемой радиально-симметричной модели радиус области пара стремится к предельному значению, т.е. фронт кипения, разделяющий области воды и пара, через некоторое время практически останавливается. Предложена математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте, насыщенном пароводяной смесью, при извлечении теплоносителя одиночной скважиной. Определены условия, при которых у скважины формируется область чистой жидкости либо чистого пара. Найден закон движения фронта возмущений исходных распределений температуры, давления и водонасыщенности в пласте, показан характер эволюции данных полей. Найдено численное конечно-разностное решение нестационарной нелинейной задачи о тепломассопереносе в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси с учетом теплообмена пласта с окружающими породами. Показано, что теплообмен пласта с кровлей и подошвой приводит к некоторому увеличению давления (температуры) фазового перехода и изменению водонасыщенности теплоносителя.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (перечень ВАК), в том числе в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI:

1. **Алхасова, Д.А.** Комбинированная солнечно-геотермальная система отопления и горячего водоснабжения / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, М.Г. Дибиров // Теплоэнергетика. – 2021. – №7. – С. 58–64. (RSCI).

2. **Алхасова, Д.А.** Технологические решения и оценка эффективности освоения тепла сухих горных пород низкого потенциала / Д.А. Алхасова, Б.А. Алхасов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – №2. – С.37–40.

3. **Алхасова, Д.А.** Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод юга России для тепло-, водоснабжения и решения экологических проблем / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. – 2019. – №5. – С.82–88. (RSCI)

4. **Алхасова, Д.А.** Оценка эффективности создания бинарных геотермальных энергоустановок с использованием отработанных нефтяных и газовых скважин на Юге России / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. – 2018. – № 2. – С. 24–32. (RSCI)

5. **Алхасова, Д.А.** Теплообменники для утилизации тепла высокотемпературных геотермальных рассолов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. – 2018. – № 3. – С. 36–41. **(RSCI)**
6. **Алхасова, Д.А.** Технологии освоения высокоминерализованных геотермальных ресурсов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С.17–24. **(RSCI)**
7. **Алхасова, Д.А.** Математическая модель тепломассопереноса в геотермальном пласте при извлечении пароводяной смеси / М.М. Рамазанов, Д.А. Алхасова // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 2. – С. 284–290. **(RSCI)**
8. **Алхасова, Д.А.** Оценка перспектив комплексного освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов // Юг России: экология, развитие. – 2017. – Т. 12, № 2. – С. 159–170.
9. **Алхасова, Д.А.** Комплексное освоение геотермальных ресурсов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, Р.М. Алиев, А.Ш. Рамазанов // Юг России: экология, развитие. – 2016. – Т.11, №1. – С.149–158.
10. **Алхасова, Д.А.** Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского геотермального месторождения /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 25– 30. **(RSCI)**
11. **Алхасова, Д.А.** Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. – 2015. – № 6. – С. 11–17. **(RSCI)**
12. **Алхасова, Д.А.** Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Известия РАН. Энергетика. – № 5. – 2014. – С. 144–157. **(RSCI)**
13. **Алхасова, Д.А.** Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 28–34. **(RSCI)**
14. **Алхасова, Д.А.** Перспективы освоения геотермальных ресурсов Восточного Предкавказья /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Юг России: экология, развитие. – 2013. – №3. – С.17–26.
15. **Алхасова, Д.А.** Электроэнергетическое освоение геотермальных ресурсов осадочных бассейнов /А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. – №2. – 2011. – С.59–66. **(RSCI)**
16. **Алхасова, Д.А.** Расчет повышения эффективности скважинного теплообменника продольным оребрением теплопередающей поверхности /Д.А. Алхасова, М.Г. Алишаев // Теплоэнергетика. – №11. – 2009. – С.69–74. **(RSCI)**

Патенты на изобретение:

1. Пат. 2650447 Российская Федерация, МПК F24T 50/00. Способ комплексной утилизации геотермальных вод / Алхасов А.Б., **Алхасова Д.А.**, Алхасов Б.А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИПГ ДНЦ РАН; заявл. 15.11.2016; опубл. 13.04.2018, Бюл. №11

2. Пат. 2596293 Российская Федерация, МПК F24J 3/08. Способ утилизации энергии геотермальных вод / Алхасов А.Б., **Алхасова Д.А.**, Алхасов Б.А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИПГ ДНЦ РАН; заявл. 31.03.2015; опубл. 10.09.2016, Бюл. №25

3. Пат. 2445554 Российская Федерация, МПК F24J 2/42. Система теплоснабжения и горячего водоснабжения на основе возобновляемых источников энергии / Алхасов А.Б., **Алхасова Д.А.**; заявитель и патентообладатель УРАН ИПГ ДНЦ РАН; заявл. 20.08.2010; опубл. 20.03.2012, Бюл. №8

4. Пат. 2336466 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Способ подогрева воды для отопления и установка для его осуществления / Мамаев Н.И., **Алхасова Д.А.**; заявитель и патентообладатель ДГУ; заявл. 04.07.2006; опубл. 20.10.2008, Бюл. №29

Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и/или Web of Science:

1. **Alkhasova, D.A.** Integrated development of low-temperature thermal waters / D.A. Alkhasova, B.A. Alkhasov // Journal of Physics: Conference Series. – Vol. 2150. – 2022.

2. **Alkhasova, D.A.** Technological design and efficiency assessment of heat production from dry rock with different energy potential / D.A. Alkhasova // Geomechanics and geophysics for geo-energy and geo-resources. – 2020. – Vol.6, Art.5.

3. **Alkhasova, D.A.** Technologies of geothermal resources development in South of Russia /A.B. Alkhasov, D.A. Alkhasova, A.Sh.Ramazanov //Geomechanics and geophysics for geo-energy and geo-resources. – 2020. – Vol.6, Art.7.

4. **Alkhasova, D.A.** Flows and heat exchange in a geothermal bed in the process of extraction of vapor –water mixture from it / М.М. Ramazanov, D.A. Alkhasova, G.M. Abasov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90. – P.606-614.

5. **Alkhasova, D.A.** Frontal regime of heat and mass transfer in a geothermal bed / A.B. Alkhasov, M.M. Ramazanov, D.A. Alkhasova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – P.1358-1365.

Монографии:

1. **Алхасова, Д.А.** Освоение геотермальной энергии / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, М.Г. Алишаев, А.Ш. Рамазанов, М.М. Рамазанов. – М.: Физматлит, 2022. – 320 с.

2. **Алхасова, Д.А.** Освоение низкопотенциального геотермального тепла / А.Б. Алхасов, М.Г. Алишаев, Д.А. Алхасова, А.Г. Каймаразов, М.М. Рамазанов. – М.: Физматлит, 2012. – 276 с.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

1. **Алхасова, Д.А.** Освоение высокотемпературных гидрогеотермальных ресурсов с использованием скважин горизонтальной конструкции / Д.А. Алхасова, М.М. Рамазанов // *Геоэнергетика* – 2022. Коллективная монография. – 2022. – С. 16–21.

2. **Алхасова, Д.А.** Технологии освоения геотермальных энергоресурсов различного потенциала / Д.А. Алхасова, Б.А. Алхасов // материалы VI Межд. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». – Махачкала, 2020. – С.109–114.

3. **Алхасова, Д.А.** Перспективные области использования гидрогеотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // материалы VI Межд. конф. «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». – Махачкала, 2020. – С. 35–41

4. **Алхасова, Д.А.** Оптимизация горизонтальной телескопической скважины на примере геотермального месторождения / Д.К. Джаватов, А.А. Азизов, Д.А. Алхасова // материалы IV Межд. Конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность». – Москва. 2018. – С. 10–15.

5. **Алхасова, Д.А.** Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, Б.А. Алхасов, А.Ш. Рамазанов, О.С. Попель // материалы IV Межд. Конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность». – Москва, 2018. – С. 16–20.

6. **Алхасова, Д.А.** Энергоэффективная технология освоения геотермальных ресурсов / Д.А. Алхасова, Б.А. Алхасов // материалы XI Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. Э.Э. Шпильрайна. – Махачкала, 2018. – С.115–118.

7. **Алхасова, Д.А.** Проблемы и перспективы освоения гидрогеотермальных ресурсов Северного Кавказа / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов // материалы XI Школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» им. Э.Э. Шпильрайна. – Махачкала, 2018. – С. 47–58.

И другие, всего 61 публикация в научных журналах, сборниках трудов, материалах международных и всероссийских конференций, форумов, симпозиумов

Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная. Печать ризографная.
Отпечатано в типографии АЛЕФ
367002, РД, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева 64
Тел.: +7 (8722) 935-690, 599-690, +7 (988) 2000-164
www.alefgraf.ru, e-mail: alefgraf@mail.ru
Формат 60×84(1/16). Усл. п. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2. Тираж 120 экз.
Заказ № 200615. Подписано в печать 25.03.2024 г.