

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи



Федоткина Анастасия Николаевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСФЕРА ТЕПЛОТЫ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ С
ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
теплотехники и теплоэнергетики
Лебедев В.А.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.2 Классификация современных технологий трансфера геотермальной энергии	16
1.3 Сравнительный анализ технологий по эффективности и применимости.....	18
1.4 Анализ выбора технологий геотермальных термосифонов для трансфера геотермальной энергии	23
1.5 Выводы по первой главе	29
ГЛАВА 2 ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ.....	30
2.1 Разработка технических и технологических решений геотермальных термосифонов.....	30
2.2 Разработка математической модели функционирования ГТЕЦ	35
2.3 Анализ влияния параметров работы на эффективность ГТЕЦ	48
2.4 Выводы по второй главе	48
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ.....	50
3.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований	50
3.1.1 Разработка математической модели процесса	51
3.1.2 Проверка воспроизводимости эксперимента.....	55
3.2 Описание экспериментальной модели ГТЕЦ	57
3.3 Условия проведения эксперимента.....	60
3.4 Методика обработки результатов эксперимента	64
3.5 Выводы по третьей главе	70
ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ.....	72
4.1 Технико-экономическое обоснование использования ГТЕЦ.....	72
4.2 Применение ГТЕЦ в промышленности	75
4.2 Выводы по четвертой главе	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ А	100
Акт о внедрении результатов диссертационного исследования.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	102
Патент на полезную модель	102
ПРИЛОЖЕНИЕ В	104
Критическое значение критерия Пирсона.....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	105
Протокол эксперимента	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	117
Значение критерия Кохрана ($P=0,95$)	117

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Для реализации целей устойчивого развития современного общества и увеличения доли использования возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе Российской Федерации с минимальным антропогенным воздействием на окружающую среду необходимо активно развивать технологии, позволяющие использовать «экологически нейтральные» возобновляемые источники энергии.

Геотермальная энергия обладает практически неисчерпаемыми запасами, широко используется в энергетике, сельском хозяйстве и промышленности. Применение геотермальной энергии оказывает минимальное антропогенное влияние на экосистему и не требует затрат на добычу топлива.

Одной из распространенных технологий являются геотермальные термосифоны. Несмотря на высокую надежность, их существенным недостатком являются большие тепловые потери при транспортировке энергии на поверхность, которые могут достигать 30%.

Актуальной является задача по разработке новых технических и технологических решений конструкции теплопередающей установки, направленных на улучшение эксплуатационных и технико-экономических характеристик для увеличения энергетической эффективности при транспортировании тепловой энергии с помощью геотермальных термосифонов.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами исследования повышения энергетической эффективности в геотермальных системах транспортирования тепловой энергии занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Алексеенко С.В., Агафонов А.Р., Богуславский Э.И., Дядькин Ю.Д., Мамедов П.Я., Томаров Г.В., Никольский А.И., Семёнов В.Н., Шипков А.А., Bist N., M. El-HajAssad, Koenraad F. Beckers, Fridleifsson, I.B., R. Bertani, E. и другие.

Идеи, сформулированные в их работах, имеют широкую практическую и теоретическую значимость. Однако вопрос экономически обоснованных методов повышения энергоэффективности геотермальных систем проработан

недостаточно, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования – система трансфера геотермальной энергии с помощью термосифона.

Предмет исследования – процесс переноса энергии при технических и технологических особенностях замкнутого геотермального термосифона.

Цель исследования – разработать экономически обоснованные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности трансфера теплоты при использовании геотермальных термосифонов.

Задачи исследования:

1. Проклассифицировать и систематизировать существующие технологии извлечения геотермальной энергии и определить рациональный метод трансфера тепла в зависимости от условий внешней среды с применением усовершенствованного метода выбора проектных решений – метод интегральной оценки;

2. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме работы с выявлением факторов, влияющих на эффективность функционирования геотермального термосифона с естественной циркуляцией (далее – ГТЕЦ);

3. Разработать математическую модель тепломассообмена в ГТЕЦ с учетом выявленных факторов и выполнить компьютерное моделирование процесса тепломассообмена в усовершенствованном термосифоне;

4. Провести экспериментальные исследования для определения закономерности функционирования термосифона с естественной циркуляцией с изменением его конструктивных параметров;

5. Провести технико-экономическое обоснование применения ГТЕЦ при сравнении с альтернативной технологией трансфера геотермальной энергии.

Научная новизна:

1. Установлена зависимость количества тепла, транспортируемого с помощью геотермального термосифона с естественной циркуляцией от различных

технических и термодинамических параметров: температура грунта, длина установки, наличие конструктивного разделителя сред восходящих и нисходящих потоков.

2. Установлена зависимость эффективности передачи геотермальной энергии в разработанной математической модели от наличия теплоизолированного разделителя сред и внутренних и внешних тепловых потерь в ГТЕЦ.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации «Повышение эффективности технологии трансфера теплоты с использованием геотермальных термосифонов с естественной циркуляцией» соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника:

4. Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах.

8. Новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров, использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан модернизированный метод выбора технологий трансфера геотермальной энергии, основанный на интегральном подходе к определению критериев для принятия проектных решений;

2. Разработана математическая модель, описывающая термодинамический процесс функционирования ГТЕЦ с разделителем сред с учетом внутренних и внешних тепловых потерь;

3. Разработана конструкция ГТЕЦ с установленным теплоизолированным разделителем сред с низким коэффициентом теплопроводности, защищенная

полученным патентом РФ на полезную модель «Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела»;

4. Проведены экспериментальные исследования на опытной установке с целью определения основных параметров рабочего режима трансфера теплоты и установлены соответствие результатов численного моделирования и результатов, полученные опытным путём.

5. Практические результаты, полученные в результате диссертационного исследования, внедрены в проектно-техническую документацию предприятия Проектного центра филиала Невский ПАО «ТГК-1» (акт внедрения от 13.03.2025).

Методология и методы исследования. В ходе выполнения работы принят комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, применение системного анализа и теории принятия решений, теорию тепломассопереноса в ГТЕЦ, проведение экспериментальных исследований, использован метод планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование внутреннего конструктивного разделителя сред позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 20 %.

2. Использование теплоизолированного слоя на внутреннем конструктивном разделителе сред с низким коэффициентом теплопроводности позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 10 %.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций. Достоверность полученных результатов диссертационной работы достигнута за счет корректного использования теории системного анализа при выборе рационального метода транспортирования тепла; использования современных апробированных методов исследований, включающих математическое моделирование функционирования ГТЕЦ; подтверждена экспериментальными

исследованиями и сходимостью результатов численных расчетов и моделирования в программном комплексе.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: II Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов», Санкт-Петербург, 5-6 апреля 2023 года; Молодежная научная конференция «Математическое моделирование в теплоэнергетике», Москва, 12 апреля 2023 года; Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 27 мая 2023 года; XX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 2-6 декабря, 2024 года; Международная научно-практическая конференция «Системная трансформация – основа устойчивого инновационного развития», г. Магнитогорск, 2 апреля 2025 года; Международная научно-практическая конференция «Синтез науки и образования как инструмент решения глобальных проблем современности», г. Челябинск, 7 апреля 2025 года.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в **10** печатных работах, в том числе **2** статьи, входящие в перечень ВАК и **2** статьи, входящие в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получен **1** патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 5 приложений. Диссертация изложена на 117 страницах, содержит 21 рисунок и 15 таблиц.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ теоретических и экспериментальных исследований современных технологий трансфера геотермальной энергии

Современные глобальные вызовы, такие как изменение климата, истощение запасов ископаемого топлива и ужесточение экологических требований в ряде отраслей промышленности, обуславливают необходимость пересмотра структуры энергобаланса в сторону увеличения доли возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ). Для России развитие ВИЭ имеет стратегически важное значение по некоторым ключевым направлениям [59, 60].

В первую очередь это вопрос диверсификации энергетического сектора и снижения зависимости от традиционных углеводородов. Несмотря на богатые запасы нефти, газа и угля, их доминирование в энергобалансе создаёт риски, связанные с волатильностью цен на мировых рынках и геополитическими ограничениями. Развитие солнечной, ветровой, геотермальной, гидро- и биоэнергетики позволит повысить устойчивость энергосистемы страны и снизить зависимость от экспорта ископаемого топлива [4].

Переход на ВИЭ критически важен для соблюдения экологических обязательств России. В рамках Парижского соглашения и национальной стратегии низкоуглеродного развития страны взяли на себя обязательства по сокращению выбросов парниковых газов. Возобновляемая энергетика минимизирует вредное воздействие на окружающую среду, сокращает углеродный след и способствует улучшению экологической ситуации в регионах [15-16].

ВИЭ играют ключевую роль в обеспечении энергобезопасности, особенно в удалённых и труднодоступных районах, таких как Дальний Восток и Арктика. Там, где строительство централизованных энергосетей экономически нецелесообразно, автономные солнечные и ветровые электростанции становятся оптимальным решением [3, 129]. Это также снижает потери при передаче электроэнергии и повышает надёжность энергоснабжения.

Кроме того, развитие ВИЭ стимулирует технологический прогресс и конкурентоспособность российской экономики. Мировые тренды показывают, что

«зелёная» энергетика — это перспективное направление для инвестиций и инноваций. Активное внедрение современных технологий в данной сфере позволит России занять достойное место на международном рынке, включая такие перспективные направления, как геотермальная энергетика [2].

В долгосрочной перспективе возобновляемая энергетика способствует повышению экономической эффективности. Себестоимость энергии от ВИЭ продолжает снижаться, что делает её всё более выгодными по сравнению с традиционной генерацией [13-14]. Это особенно важно в условиях роста внутреннего потребления электроэнергии и необходимости модернизации энергетической инфраструктуры.

В настоящее время геотермальная энергия рассматривается как один из перспективных источников энергии, поскольку такой вид энергии широко применяется в ряде отраслей промышленности: энергетика, сельское хозяйство, теплоснабжение; при её применении негативное антропогенное влияние на экосистему значительно снижено; современные геотермальные системы имеют возможность масштабирования; геотермальная энергетика относится к неисчерпаемым энергоресурсам [119, 133].

Широкое промышленное использование геотермальных ресурсов во многом зависит от решения сложных научно-технических, экономических и организационных задач [116, 123].

Применение геотермальной энергии демонстрирует устойчивый рост с ежегодным увеличением его использования. Прямое использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии составляет более 58% от общего объема тепловой энергии, извлекаемой из недр Земли. На втором месте по объему использования находится обогрев помещений, занимающий 21%; применение в сельском хозяйстве занимает третью позицию с долей 16%. Остальные направления использования геотермальной энергии составляют около 5% (рисунок 1.1) [10, 20, 42].

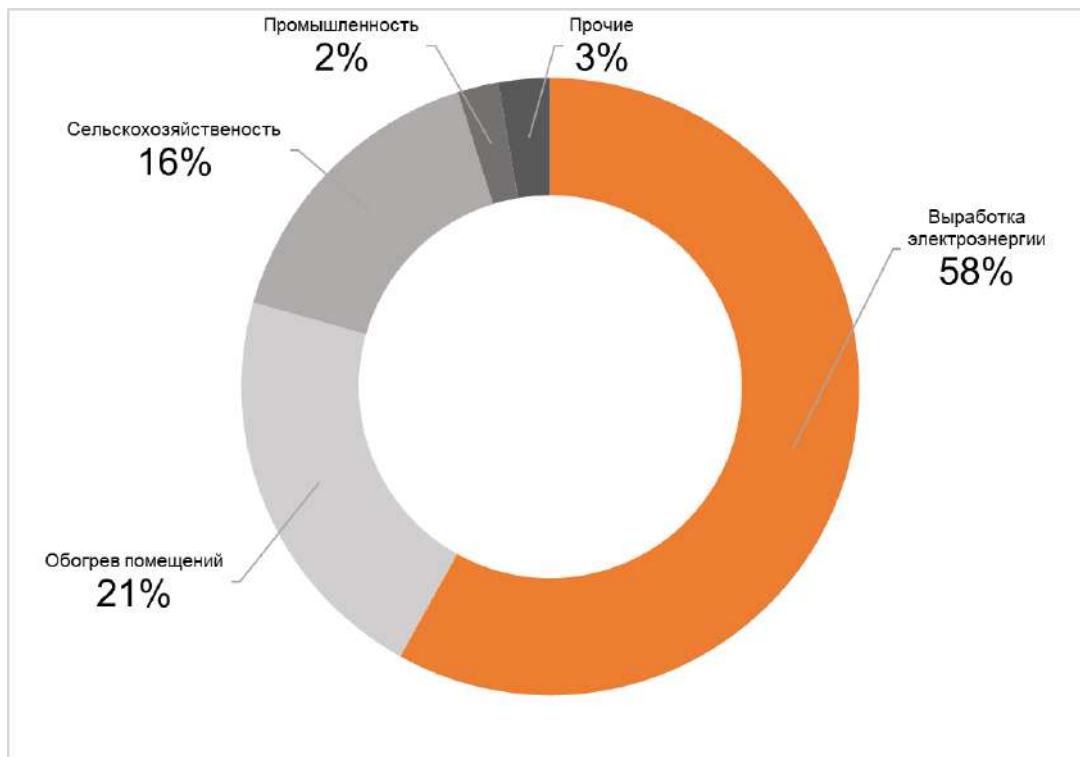


Рисунок 1.1 – Основные направления теплоэнергетического использования геотермальных ресурсов мира, %

В настоящее время в России действует три геотермальные станции, расположенные на полуострове Камчатка: Паужетская ГеоЭС, Менделеевская ГеоЭС и Мутновская ГеоЭС. Их суммарная мощность составляет более 70 МВт электрической энергии. Также на Курильских островах работают три маломощные геотермальные установки [14, 37].

Согласно статистическим данным, извлечение энергии с использованием геотермальных технологий демонстрирует устойчивый рост по всему миру и сопровождается значительным увеличением установленной мощности геотермальных электростанций с 2020 года (рисунок 1.2).

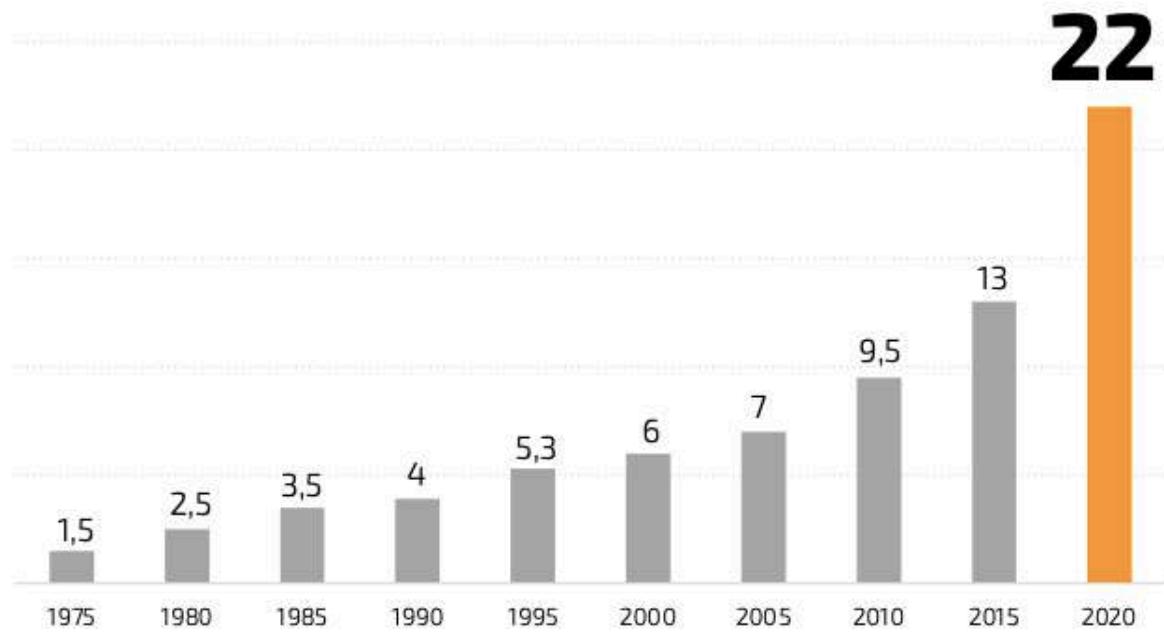


Рисунок 1.2 – Установленная мощность вырабатываемой энергии на ГеоЭС в ГВт

В настоящее время разрабатываются современные технологии и способы по извлечению геотермальной теплоты. Геотермальные технологические системы по извлечению геотермального тепла разделены на две группы: гидротермальные и петротермальные [46, 65].

Использование гидротермальных систем базируется на циркуляции жидкости в нагнетательных и добывающих геотермальных скважинах. Гидротермальные системы применяются для отбора теплоты из естественных водоносных пластов для аккумулирования тепла в теплоприемниках и для процессов генерации электроэнергии [76, 79, 82].

При применении петротермальных систем для извлечения геотермальной энергии предполагается транспортирование теплоносителя в зону подземного теплового котла с помощью специальных геотермальных устройств, где рабочее тело прогревается до температуры массива горных пород, после чего теплоноситель транспортируется до зоны отбора теплоты [94, 103].

Геотермальные установки по расположению зоны отбора подразделяются на извлечение геотермальной энергии с выпуском и без выпуска тепла на поверхность [118, 122]. При расположении зоны отбора над поверхностью земли геотермальное

тепло может быть направлено на выработку электроэнергии, отопление помещений, горячего водоснабжения и холодопроизводительность (рисунок 1.3).

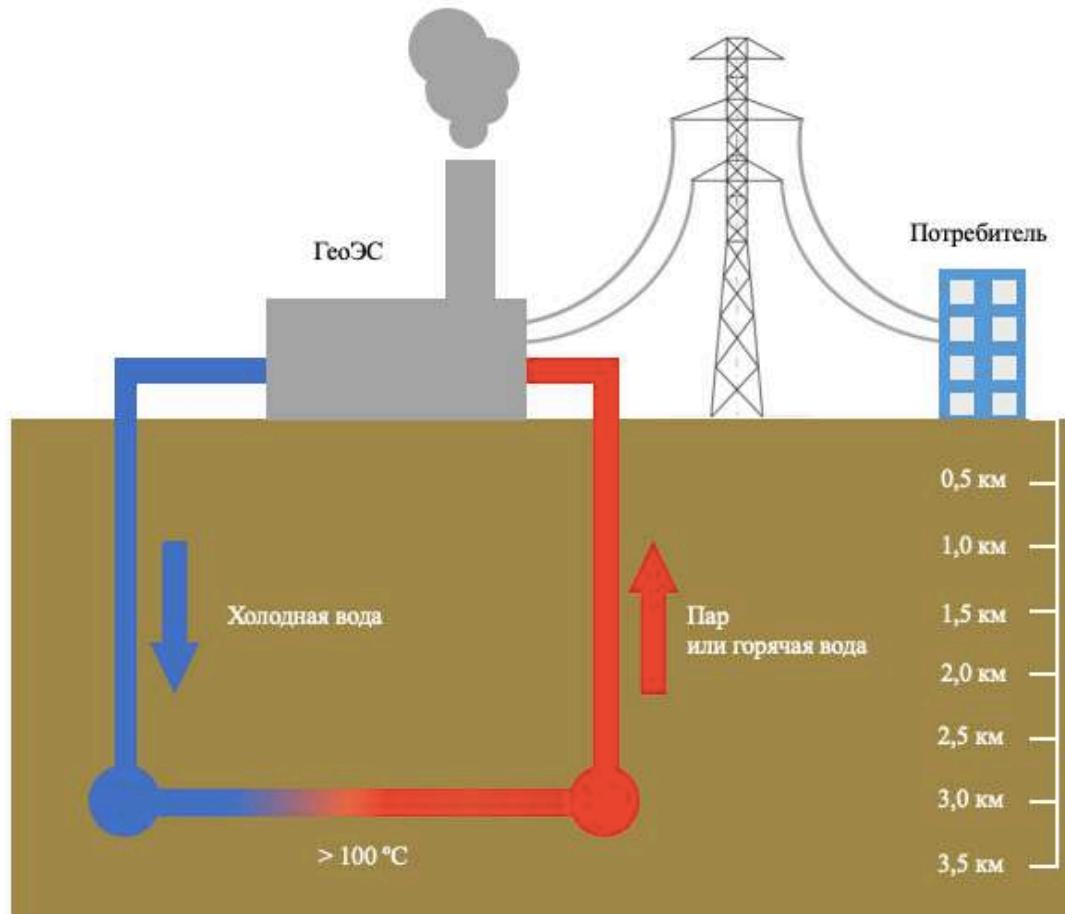


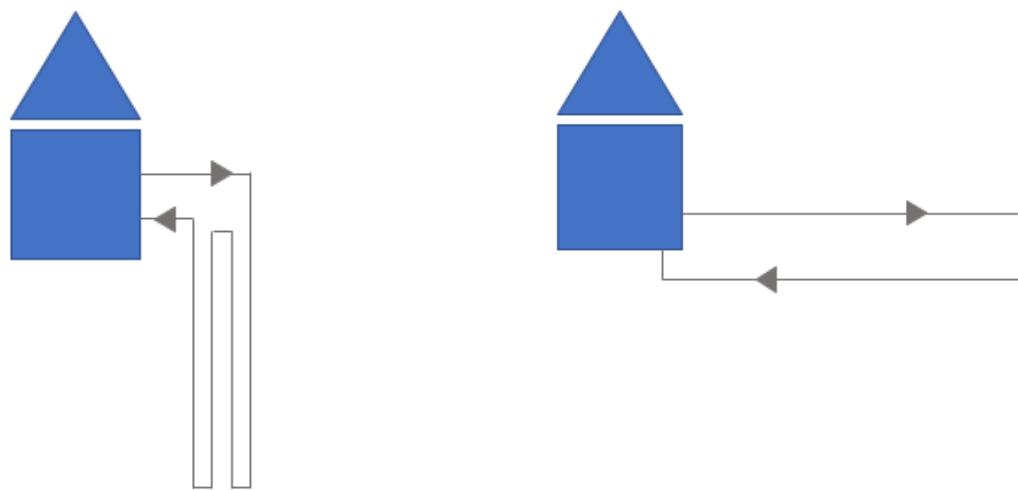
Рисунок 1.3 – Принципиальная схема выработки электроэнергии на ГеоЭС

При расположении зоны отбора под поверхностью, тепло Земли используется в основном для аккумуляции энергии в подземных теплоприемниках. Выбор расположения зоны отбора происходит в зависимости от назначения геотермальной установки [107, 114, 110].

По расположению зоны отбора тепла технологии разделяют на приповерхностные и глубинные. Для извлечения энергии из области с низкопотенциальным температурным режимом грунта в приповерхностных геотермальных системах используют добывочную и нагнетательную скважину глубиной от 200 до 400 м. На данной глубине температура грунта значительно колеблется в зависимости от внешних условий, состава грунта, тепловых характеристик, влажности и других факторов, поэтому для применения таких систем необходимо использование дополнительного оборудования для повышения их энергоэффективности и производительности. Примером вспомогательного

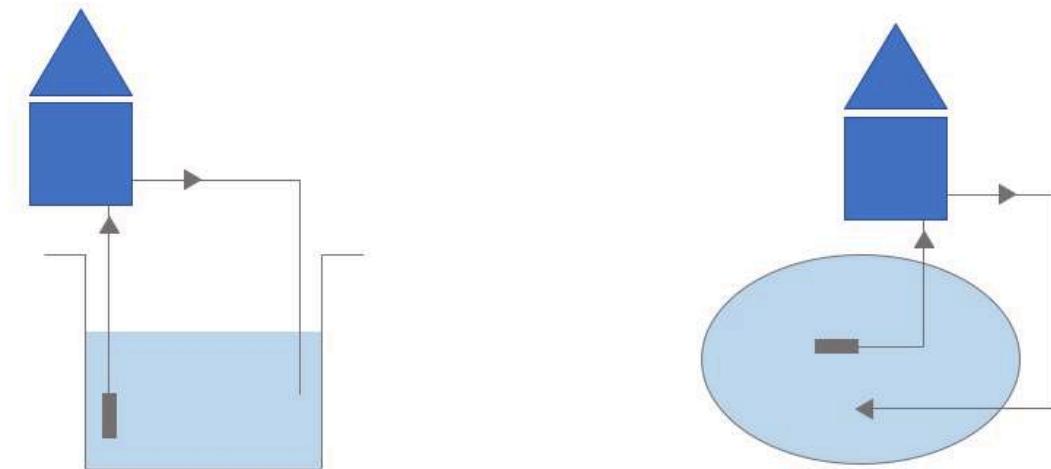
оборудования служат тепловые насосы, парокомпрессионные установки, двухфазные термосифоны, пиковые-водогрейные котельные и др. [21, 41, 120].

Приповерхностные гидротермальные системы по принципу реализации технологии разделяются на две группы: закрытая петля, где система соединяется в грунте и открыта петля, где устройства транспортирования располагаются в грунтовых водах (рисунок 1.4). Технологии приповерхностных гидротермальных систем могут реализовываться с применением как горизонтальных, так и вертикальных геотермальных скважин [72, 96, 126].



а) Петля закрытая вертикальная

б) Петля закрытая горизонтальная



в) Петля открытая вертикальная

г) Петля открытая горизонтальная

Рисунок 1.4 – Схемы открытая и закрытая петля геотермальных технологий

Эффективность функционирования приповерхностных геотермальных систем зависит от изменений метеорологических условий. Для обеспечения работы

установки в холодный период работы при пиковых нагрузках необходимо поддерживать заданные параметры дополнительными источниками тепла. Кроме того, использование данных систем возможно не повсеместно, так как источник геотермальной теплоты может находиться на значительном расстоянии от потребителя, что несет увеличение эксплуатационных и капитальных затрат.

На сегодняшний день для извлечения теплоты из зоны с высоким температурным режимом грунта в глубинных геотермальных системах используют фонтанные и циркуляционные технологии [26, 32, 51].

В фонтанных технологиях по эксплуатационным скважинам (более 400 м) поднимается нагретый теплоноситель на поверхность за счет избыточного давления в коллекторе, после отбора теплоты сбрасывается в естественные или искусственные водоемы. Фонтанные технологии характеризуются низкой энергоэффективностью эксплуатационных скважин, ограниченным сроком службы и необходимостью применения вспомогательных средств для увеличения давления в геоскважинах [56, 64, 108].

Основным направлением развития глубинной геотермальной технологии в настоящее время считается циркуляционный метод извлечения тепловой энергии из горных пород с использованием добывной и нагнетательной скважины. Традиционные геотермальные системы по методу извлечения геотермальной энергии классифицируются следующим образом: с естественными проницаемыми коллекторами, с преобразуемыми трещинными зонами, с искусственно создаваемыми коллекторами в слабопроницаемых скальных породах. Геотермальные устройства помещаются внутрь добывной и нагнетательной скважины для реализации циркуляции теплоносителя внутри системы [18, 36, 47]. В случае если давление на устье добывных скважин недостаточно, для создания дополнительной депрессии могут применяться погружные насосы.

Среди основных недостатков для широкого внедрения этой технологии можно выделить следующие:

1. Определенные требования к геолого-геотермическим характеристикам природного коллектора;

2. Ограниченнное распространение геотермальных ресурсов.

Для извлечения глубинной геотермальной энергии применяют геотермальные термосифоны. Эта система основана на физических законах термодинамики и происходит в несколько этапов. В испарителе, расположенном в грунте, теплоноситель (чаще всего аммиак, фреон или углекислый газ) нагревается за счет геотермального тепла. При достижении определенной температуры происходит его испарение. Образовавшийся газ поднимается по трубопроводу вверх - к конденсатору. В надземной части системы теплоноситель отдает тепловую энергию через конденсатор в окружающую среду или систему отопления. При этом происходит его охлаждение и конденсация [54, 71]. Охлажденный и ставший более плотным теплоноситель под действием силы тяжести стекает обратно в испаритель.

Важной особенностью геотермальных термосифонов является их способность работать в двух режимах:

- В зимний период система переносит тепло из грунта на поверхность, предотвращая промерзание фундаментов и других конструкций;
- В летнее время возможно использование обратного процесса для охлаждения зданий, когда избыточное тепло отводится в грунт.

Геотермальный термосифон не требует дополнительных источников энергии для поддержания циркуляции, поскольку циркуляция теплоносителя происходит за счет естественных процессов, таких как конвекция [76, 85]. Это делает технологию более экономичной и надежной, особенно в удаленных и труднодоступных районах, где обслуживание и ремонт могут быть затруднены. Кроме того, такая система минимизирует воздействие на окружающую среду [38, 73, 125].

1.2 Классификация современных технологий трансфера геотермальной энергии

Традиционные схемы часто не учитывают разнообразие технологий и их специфические особенности, что может затруднить выбор рационального решения для конкретных условий эксплуатации. С развитием новых технологий извлечения геотермальной теплоты становится актуальным создание новой классификации

геотермальных систем. Современные методы требуют более детального и структурированного подхода к их классификации и должна отражать различные аспекты [47].

Предлагаются усовершенствованные классификации, которые призваны углубить научное понимание исследуемых объектов, а также систематизировать существующие и развивающиеся технологии и методы их применения.

Предложена классификация методов по извлечению геотермальной теплоты (рисунок 1.5) по следующим признакам: по типу источника теплоты; по расположению зоны отбора тепла; по глубине залегания; по принципу реализации; по типу извлечения теплоносителя [135].

Технологиям в классификации был присвоен пятиуровневый классификационный код.

I уровень – источник теплоты: технологии извлечения энергии разделяются на гидротермальные и петротермальные. II уровень – расположение зоны отбора: с выпуском и без выпуска теплоносителя на поверхность. III уровень – глубина залегания источника геотермальной энергии: приповерхностные и глубинные системы. IV уровень – принцип реализации: открытые и закрытые петли, геотермальные термосифоны, фонтанные технологии и технологии принудительной циркуляции. V уровень – тип извлечения: извлечение геотермальной энергии из горизонтальных и вертикальных скважины, из естественного коллектора, трещин зон, искусственного коллектора. Использование горизонтальных скважин, вертикальных скважин и технологии с принудительной циркуляцией подразумевает наличие добывающей и нагнетательной скважин. Извлечение геотермальной энергии с помощью геотермальных термосифонов подразумевает наличие только добывающей скважины.

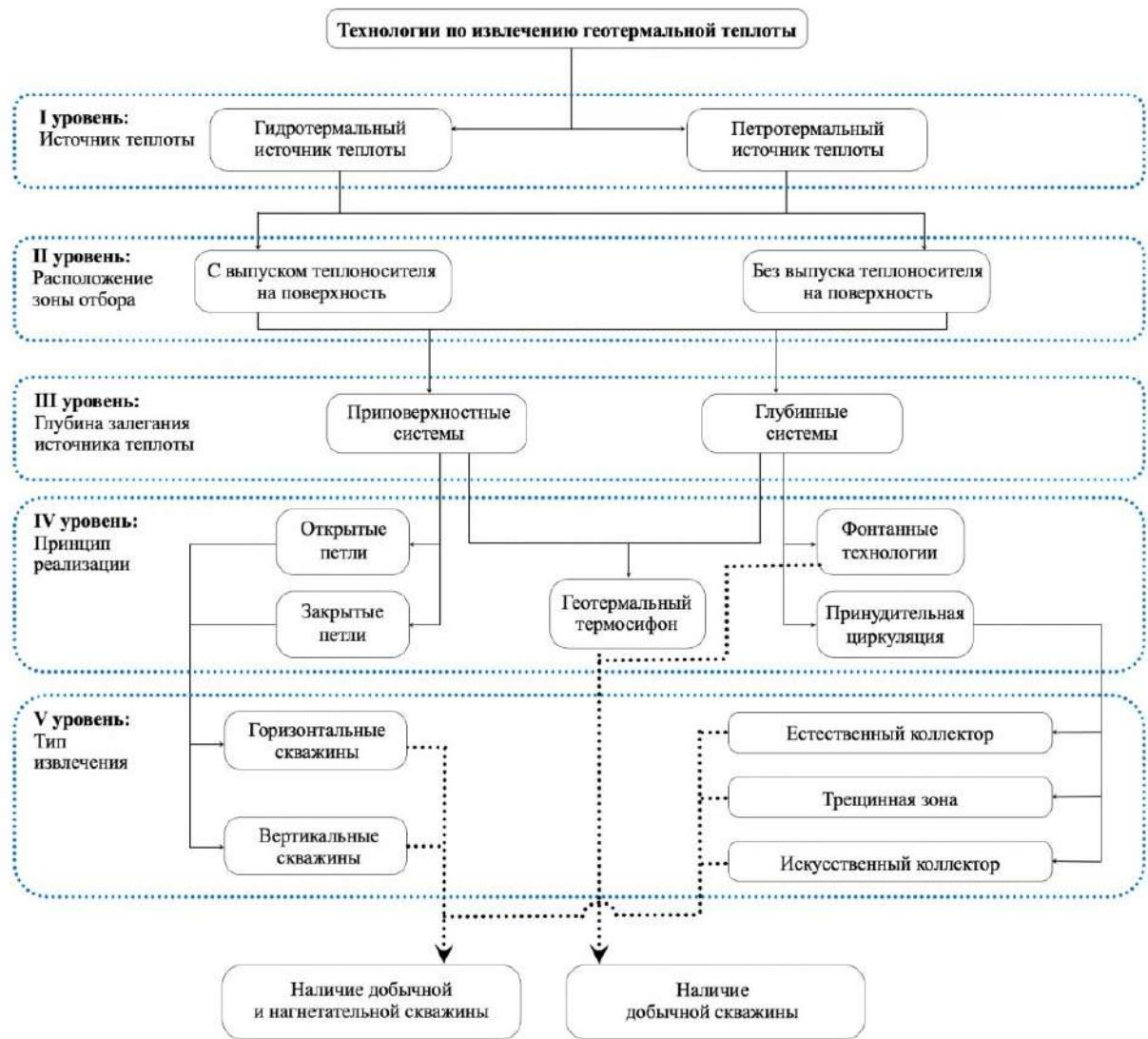


Рисунок 1.5 – Классификация технологий по извлечению геотермальной энергии

Определение подходящего классификатора на каждом уровне формирует окончательную структуру системы извлечения геотермальной энергии, что критически важно для определения её окончательной архитектуры. Этот выбор напрямую влияет на конструктивные особенности системы и, в конечном итоге, на её целесообразность [69, 97].

Такая схема позволяет осуществлять выбор необходимого комплекса, ориентируясь на наличие добывчной и нагнетательной скважины.

1.3 Сравнительный анализ технологий по эффективности и применимости

По результатам классификаций технологий для извлечения геотермальной энергии проведено ранжирование геотермальных технологий по характеризующим технико-экономическим критериям на основе инженерно-логического анализа.

Ранжирование проведено по 4 уровню, поскольку закрытые и открытые петли имеют похожий принцип реализации – они объединены в одну группу и рассматриваются по совместно. При ранжировании осуществляется проведение технического обоснования выбора технологии в зависимости от внешних условий и ее реализации с повышенной эффективностью. Для проведения рационального выбора технологий сформирован список критериев: стоимость, экологическая безопасность, надежность и потенциал для масштабирования извлекаемой тепловой мощности [40, 44, 71].

Каждая система была проанализирована в соответствии с указанными критериями, и были определены соответствующие ранги, приведенные в таблице 1.1. Присвоение экспертных оценок производилось в результате анализа значительного объема информации из открытых источников литературы.

Таблица 1.1 – Присвоение оценок для систем по извлечению геотермальной энергии

Критерии	Технологии извлечения геотермальной энергии		
	Гидротермальные приповерхностные технологии	Фонтанные технологии	Геотермальные термосифоны
Стоимость реализации	3	2	1
Экологическая безопасность	4	3	1
Надежность геотермального устройства	2	1	2
Возможность масштабирования	4	2	3

При реализации гидротермальных приповерхностных технологий требуется наличие нагнетательной и добывающей скважин, что существенно увеличивает капитальные затраты на обустройство геотермальных зон. Для реализации

фонтанной технологии требуется применение вспомогательных средств для возникновения движения рабочего тела внутри установки при их эксплуатации, что существенно увеличивает эксплуатационные затраты. Для функционирования геотермальных термосифонов требуется лишь одна добычная скважина, а циркуляция рабочего тела происходит посредством конвекционных процессов [99, 108].

При транспортировании геотермальной энергии с помощью гидротермальных приповерхностных систем происходит перемещение гидротермальной воды, что влечет к нарушению естественного гидрологического режима экосистемы. Для геотермальных термосифонов в качестве теплоносителя возможна реализация при применении вода в качестве рабочего тела, которая при возможной утечке не оказывает существенного негативного влияния на окружающую среду [33, 78].

При использовании гидротермальных приповерхностных технологий необходима разработка дополнительной скважины, что увеличивает риски возникновения чрезвычайных ситуаций, а введение вспомогательного оборудования повышает риск возникновения отказов системы [35].

Возможность масштабирования приповерхностных систем может быть ограничено технологическими аспектами, такими как глубина бурения, сложность установки оборудования и необходимость поддержания высоких стандартов безопасности. Увеличение числа скважин требует значительных инвестиций [86].

Для определения наиболее рациональной системы трансфера геотермальной энергии необходимо проверить согласованность экспертных оценок по выставленным оценкам с помощью метода анализа иерархии. Коэффициента конкордации определяется по формуле (1.1) [7, 88]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^n (S_j - S_{cp})^2}{m^2 \cdot n(n^2 - 1) - m \sum_{i=1}^m T_i}, \quad (1.1)$$

где $(S_j - S_{cp})^2$ – сумма квадратов отклонений суммы рангов по отдельным показателям от средней суммы рангов;

m – количество критериев;

n – количество сравниваемых систем;

$T_i = \sum_{l=1}^{k_i} n_{i,l} \cdot (n_{i,l}^2 - 1)$ – поправочный коэффициент, вычисляемые для каждого критерия.

Для оценки значимости коэффициент конкордации необходимо проверить статистическую значимость критерия хи-квадрат и должно выполняться следующее условие (1.2):

$$m(n-1)W > \chi_{n-1}^2, \quad (1.2)$$

где χ_{n-1}^2 – табличное число степеней свободы $\gamma = (n-1)$ и уровнем доверительной вероятности P . Значение P рекомендуется принимать в интервале 0,95-0,99 [86, 92].

Для определения рациональной технологии трансфера геотермальной энергии необходимо выполнить следующие вычисления:

- Вычисление поправочного коэффициента для каждого критерия по каждой технологии:

$T_1 = 1 \cdot (1^2 - 1) = 0$ – поправочный коэффициент для критерия «стоимость реализации»;

$T_2 = 1 \cdot (1^2 - 1) = 0$ – поправочный коэффициент для критерия «экологическая безопасность»;

$T_3 = 2 \cdot (2^2 - 1) = 6$ – поправочный коэффициент для критерия «надежность геотермального устройства»;

$T_4 = 1 \cdot (1^2 - 1) = 0$ – поправочный коэффициент для критерия «возможность масштабирования».

- Средняя сумма рангов для каждого критерия по каждой технологии:

$$S_{cp} = \frac{m \cdot (n+1)}{2} = \frac{4 \cdot (3+1)}{2} = 8.$$

- Коэффициент конкордации для каждого критерия по каждой технологии:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^n (S_j - S_{cp})^2}{m^2 \cdot n \cdot (n^2 - 1) - m \sum_{i=1}^m T_i} = \frac{12 \cdot ((13-8)^2 + (8-8)^2 + (7-8)^2)}{4^2 \cdot 3 \cdot (3^2 - 1) - 4 \cdot (0 + 0 + 6 + 0)} = 0,867.$$

Результаты расчета определения коэффициента конкордации представлены в таблице 1.2 [5, 11].

Таблица 1.2 – Сводная таблица определения рациональной технологии извлечения геотермальной энергии

Критерии	Технологии извлечения геотермальной энергии			Поправочный коэффициент
	Гидротермальные приповерхностные технологии	Фонтанные технологии	Геотермальные термосифоны	
Стоимость реализации	3	2	1	0
Экологическая безопасность	4	3	1	0
Надежность геотермального устройства	2	1	2	6
Возможность масштабирования	4	2	3	0
Сумма рангов	13	8	7	6

Проверка согласованности экспертных оценок:

- Значение $m(n - 1)W = 4 \cdot (3 - 1) \cdot 0,867 = 6,933$;

- $\chi^2_{n-1} = 5,991$ – α -процентная точка распределения Хи-квадрат с $(n - 1)$

степенями свободы определяется по таблице значения критерия Пирсона (Приложение В) [27].

Полученное значение коэффициента конкордации для сравниваемых систем с выставленными экспертными оценками равно 0,867. Величина $m(n - 1)W$ равна 6,933, а значение χ^2_{n-1} при доверительной вероятности 0,95 равно 5,991. Следовательно, условие (1.2) $6,933 > 5,991$ выполняется и согласованность экспертных оценок не случайна.

Исходя из результатов анализа рациональной системой для трансфера геотермальной энергии является система с наименьшей суммой рангов. Наименьшая сумма рангов у технологии с применением геотермальных термосифонов.

1.4 Анализ выбора технологий геотермальных термосифонов для трансфера геотермальной энергии

Современные геотермальные термосифоны подразделяются на три основные категории, различающихся конструктивными особенностями, принципами функционирования и сферами использования. Определены основные виды геотермальных термосифонов: тепловые трубы, термосифоны с принудительной циркуляцией и термосифоны с естественной циркуляцией [105, 113].

При выборе наиболее эффективной технологии учитывались следующие параметры: энергоэффективность, стоимость реализации и эксплуатации, вероятность отказа, экологичность, температурный диапазон работы, гидравлическое сопротивление, скорость реакции на изменение нагрузки, совместимость с существующими инфраструктурной, срок службы, возможность утилизации компонентов, безопасность для персонала, потенциал для модернизации [29, 39].

Для упрощения принятия решения и повышения его обоснованности был выполнен метод свертки критериев – процедура агрегирования множества показателей в ограниченное число ключевых факторов [63, 66,].

Первоначальные критерии были объединены в четыре логических кластера, где для каждого параметра внутри каждого кластера назначается вес, отражающий его относительную важность [61, 81, 90]:

1. Экономические:

- 1.1 стоимость реализации и эксплуатации – 0,5;
- 1.2 потенциал для модернизации – 0,2.

2. Энергетические:

- 2.1 энергоэффективность – 0,4;
- 2.2 скорость реакции на нагрузку – 0,2;

2.3 температурный диапазон – 0,2.

3. Экологические:

3.1 экологичность – 0,5;

3.2 возможность утилизации – 0,3;

3.3 безопасность для персонала – 0,2.

4. Технические:

4.1 вероятность отказа – 0,4;

4.2 гидравлическое сопротивление – 0,3;

4.3 срок службы – 0,5;

4.4 совместимость с инфраструктурой – 0,3.

Для каждого кластера выбирается наиболее репрезентативный параметр, имеющий максимальный вес:

1. экономический кластер → стоимость реализации (0,5), так как капитальные затраты критичны на этапе внедрения и определяют рентабельность проекта;

2. энергетический кластер → энергоэффективность (0,4), так как прямо влияет на долгосрочную экономию ресурсов и эксплуатационные расходы;

3. экологический кластер → экологичность (0,5), так как интегральный показатель, включающий безопасность и соответствие ESG-стандартам;

4. технологический кластер → срок службы (0,5), так как надежность системы косвенно определяет срок службы, который важнее для итоговой оценки.

В результате проведения процедуры критериального синтеза для последующей оценки были отобраны четыре ключевых интегральных показателя: стоимость реализации, энергоэффективность, экологичность и срок службы. Данный подход обеспечит сбалансированную оценку более значимых аспектов, обеспечив при этом комплексный анализ технологических решений [30, 43].

Для обоснованного выбора оптимальной технологии транспортировки геотермальной энергии был проведен всесторонний анализ существующих методов принятия решений, на основании которого разработан усовершенствованный метод интегральной оценки. Данный подход основан на принципах количественной оценки значимости различных критерии и их сведения к единой интегральной форме, что

позволяет объективно сравнивать альтернативные решения. Данный метод позволяет определить отрезок расстояния от точки значения каждого критерия до расстояния между фактическими значениями характеристик рассматриваемых технологий и их идеальными показателями, при этом в качестве оптимального выбирается вариант с минимальным отклонением от идеала [2, 132].

Определены значения критериев для каждой альтернативы, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Присвоение оценок критериям видов геотермальных термосифонов

Критерии	Система		
	Термосифон с естественной циркуляцией	Термосифон с принудительной циркуляцией	Тепловые трубы
Стоимость реализации, млн. руб.	10	15	12
Энергоэффективность, КПД, %	85	90	80
Экологичность, баллы	87	85	80
Надежность, срок службы, лет	20	15	18

Весовые коэффициенты, присвоенные критериям стоимость реализации, энергоэффективность и срок службы, имеют конкретное практическое обоснование и взяты из авторитетных информационных источников [68-70].

Весовой коэффициент критерия «Экологичность» рассчитывается для систем по отраслевым стандартам для промышленных предприятий [70-72]. Для объективной оценки уровня экологичности предприятия, применяется балльная система, учитывающая воздействие на окружающую среду, эффективность использования ресурсов и систему экологического менеджмента. По каждому экологическому критерию начисляются количество баллов, для дальнейшего его анализа [34, 84].

Начисление баллов по критерию «Воздействие на окружающую среду» – параметр А [8]:

- выбросы в атмосферу (CO₂, NO_x, SO₂) – до 15 баллов;
- водопотребление и сбросы – до 10 баллов;
- образование отходов (классы опасности I-IV) – до 10 баллов;
- шум/вибрация/ЭМ-воздействие – до 5 баллов.

При суммировании значений максимальное количество баллов по критерию воздействие на окружающую среду – 40 баллов.

Начисление баллов по критерию «Ресурсная эффективность» – параметр Б [12]:

- использование ВИЭ (доля в энергобалансе) – до 10 баллов;
- системы рециклинга (% замкнутые циклы) – до 8 баллов;
- энергоэффективность (кВт·ч/ед. продукции) – до 7 баллов;
- водооборотные системы – до 5 баллов.

При суммировании значений максимальное количество баллов по критерию ресурсная эффективность – 30 баллов.

Начисление баллов по критерию «Управление экологичность» – параметр В [45]:

- наличие сертификация (ISO 14001, EMAS) – 5 баллов.
- проведение экологический мониторинг – 4 баллов;
- внедрение программы модернизации – 4 баллов;
- проведение экологический менеджмент – 4 баллов;
- подготовка персонала – 3 баллов.

При суммировании значений максимальное количество баллов по критерию управление экологичность – 20 баллов.

Дополнительно при рассмотрении влияния производства на экологию учитываются следующие показатели – параметр Г [22]:

- зеленые технологии (патенты) – 3 б;
- экологический след продукции – 3 б;
- социальные инициативы – 2 б;
- участие в рейтингах (экологические) – 2 б.

Расчет общего балла по критерию «Экологичность» определяется по формуле (1.3):

$$\Theta = A \cdot 0,4 + B \cdot 0,3 + C \cdot 0,2 + \Gamma \quad (1.3)$$

где А, Б, В, Г – параметры по каждому из параметров.

Результаты оценки экологического влияния для трех систем трансфера геотермальной энергии представлены в таблице 1.3 [12].

В рамках проведенного исследования были проанализированы системы геотермальных термосифонов, для каждого из которых определены нормализованные значения оценочных критериев в диапазоне от 0 до 1. Идеальная точка, соответствующая наилучшим показателям по всем параметрам, принята за единицу. Для обеспечения сопоставимости разнородных критериев, выполнена процедура нормализации данных, что позволило устранить влияние различий в единицах измерения [74, 91].

Для критериев «Энергоэффективность», «Экологичность» и «Срок службы» значения необходимо максимизировать по формуле:

$$x_{ij}^{\text{норм}} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (1.4)$$

Для критерия «Стоимость» значения необходимо минимизировать по формуле:

$$x_{ij}^{\text{норм}} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (1.5)$$

Расчет расстояния до идеальной точки рассчитывается по формуле:

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij}^{\text{норм}} - x_j^{\text{идеал}})^2} \quad (1.6)$$

Нормализованные значения оценок критериев по трем системам представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Нормализация оценок критериев видов геотермальных термосифонов

Критерии	Система		
	Термосифон с естественной циркуляцией	Термосифон с принудительной циркуляцией	Тепловые трубы
Стоимость реализации, млн. руб.	$\frac{15 - 10}{15 - 10} = 1$	$\frac{15 - 15}{15 - 10} = 0$	$\frac{15 - 12}{15 - 10} = 0,6$
Энергоэффективность, КПД, %	$\frac{85 - 80}{90 - 80} = 0,5$	$\frac{90 - 80}{90 - 80} = 1$	$\frac{80 - 80}{90 - 80} = 0$
Экологичность, баллы	$\frac{87 - 80}{87 - 80} = 1$	$\frac{85 - 80}{87 - 80} = 0,7$	$\frac{80 - 80}{87 - 80} = 0$
Надежность, срок службы, лет	$\frac{20 - 15}{20 - 15} = 1$	$\frac{15 - 15}{20 - 15} = 0$	$\frac{18 - 15}{20 - 15} = 0,6$

Расчет расстояния до идеальной точки для каждого термосифона:

$$D_1 = \sqrt{(1 - 1)^2 + (1 - 0,5)^2 + (1 - 1)^2 + (1 - 1)^2} = 0,50 \quad - \quad \text{для}$$

термосифона с естественной циркуляцией;

$$D_2 = \sqrt{(1 - 0)^2 + (1 - 1)^2 + (1 - 0,7)^2 + (1 - 0)^2} = 2,09 \quad - \quad \text{для}$$

термосифона с принудительной циркуляцией;

$$D_3 = \sqrt{(1 - 0,6)^2 + (1 - 0)^2 + (1 - 0)^2 + (1 - 0,6)^2} = 2,56 \quad \text{для тепловых}$$

труб.

Таким образом, анализ показал, что геотермальный термосифон с естественной циркуляцией является наиболее эффективным методом транспортировки геотермального тепла. Это подтверждается минимальным расстоянием до идеальной точки $D_i=0,5$, рассчитанным с помощью модернизированного метода интегральной оценки [95, 100].

По результату выполненного анализа наиболее рациональный метод по трансферу геотермальной энергии является геотермальный термосифон. Однако при анализе исследований было выявлено, что в геотермальном термосифоне при передаче геотермальной энергии возникают тепловые потери до 30% [15, 104, 127]. Данный факт связан с конструкцией системы, свойствами теплоносителя и условиями эксплуатации. Термосифон не обеспечивает достаточную циркуляцию из-за неправильного уклона,

засорения или неоптимального заполнения хладагентом, часть тепла не передаётся эффективно. Использование материалов с высокой теплопроводностью, которое увеличивает потери по длине трансфера теплоносителя. Тепловые потери в геотермальном термосифоне неизбежны, но их можно значительно снизить за счёт правильного проектирования, качественных материалов и грамотной эксплуатации. Оптимизация системы позволяет повысить КПД передачи геотермальной энергии.

1.5 Выводы по первой главе

На основании выполненного анализа представляется возможным сформулировать цель исследования следующим образом – разработать технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности при трансфере теплоты с использованием геотермальных термосифонов с естественной циркуляцией рабочего тела.

Для достижения цели требуется решение следующего ряда задач:

1. Выполнить анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме работы с выявлением факторов, влияющих на эффективность функционирования геотермального термосифона с естественной циркуляцией (далее – ГТЕЦ);
2. Разработать математическую модель тепломассообмена в ГТЕЦ с учетом выявленных факторов и выполнить компьютерное моделирование процесса тепломассообмена с усовершенствованным термосифоном;
3. Провести экспериментальные исследования для определения закономерности функционирования термосифона с естественной циркуляцией с изменением его конструктивных параметров;
4. Провести технико-экономическое обоснование применения ГТЕЦ при сравнении с альтернативной технологией трансфера геотермальной энергии.

ГЛАВА 2 ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

2.1 Разработка технических и технологических решений геотермальных термосифонов

Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией функционирует на принципе свободной конвекции. Движение теплоносителя обусловлено разницей плотностей в различных участках среды, возникающей вследствие изменения температуры. Неровномерное распределение температуры создает изменяющееся поле плотности, что приводит к перемещению масс с различной плотностью вдоль термосифона.

Работа геотермального термосифона включает несколько этапов: нагрев рабочего вещества в области с высокой температурой (кондуктивный теплообмен между горными породами и термосифоном); транспортировка рабочего тела в область с более низкой температурой (конвективный теплообмен); передача тепла рабочего вещества в устройство для накопления тепла (кондуктивный теплообмен между термосифоном и теплоаккумулирующим оборудованием) [58, 121, 136].

Основной элемент геотермальной установки представляет собой трубу, установленную в скважине, которая находится в бесконечном непроницаемом массиве горных пород. Условия её работы зависят от теплофизических характеристик пород и параметров окружающей среды на поверхности в зоне, где происходит отбор тепла [77].

Процесс теплообмена осуществляется во время движения теплоносителя по трубке. При этом тепловое сопротивление стенок трубы можно считать незначительным, так как скважина окружена практически неограниченным массивом пород, теплообмен между этим массивом и потоком теплоносителя, движущимся по трубке, является нестационарным, с уменьшением интенсивности теплопередачи по мере подъема рабочего тела [117, 132].

При анализе работы однофазного термосифона установлено, что при его функционировании будет возникать смешение горячего и холодного потока

теплоносителя, что приведет к уменьшению энергоэффективности работы установки в связи с увеличением тепловых потерь при трансфере геотермальной теплоты. Для противодействия смешиванию потоков предлагается внедрить конструктивный разделитель потока сред восходящих и нисходящих потоков с теплоизолированным слоем для исключения теплообмена между двумя потоками.

Для ориентирования потоков в зоне передачи тепла к теплоаккумулирующему устройству предложено ввести воронку на конструктивном разделителе сред.

Предлагается ввести концевые крышки, выполненные из материала с высоким коэффициентом теплопроводности – для увеличения эффективности отбора геотермального тепла (рисунок 2.1).

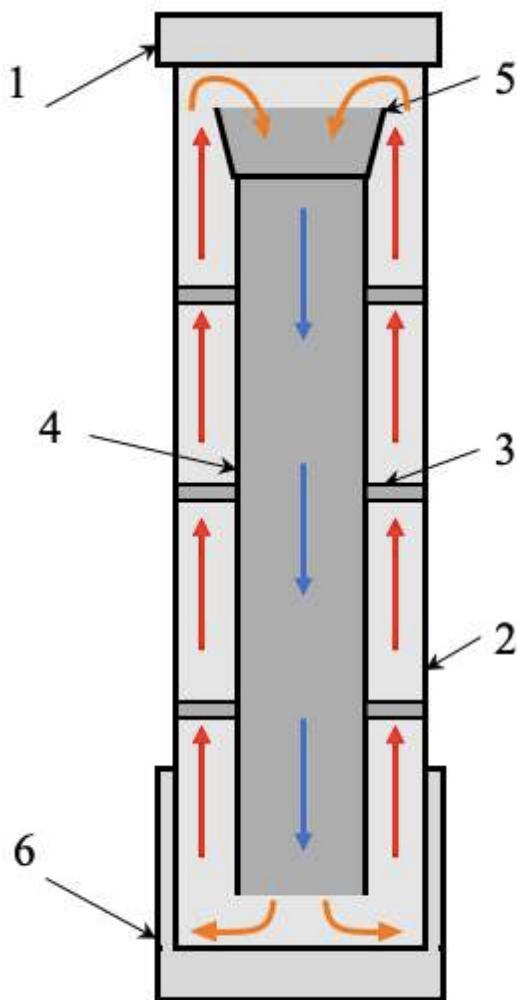


Рисунок 2.1 – Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией:
1, 6 –концевые крышки; 2 – внешняя секция; 3 – соединитель внешней секции и
разделителя сред; 4 – разделитель сред; 5 – воронка

Внедрение теплоизолированного разделителя сред предотвращает смешение горячего и холодного потоков теплоносителя, минимизируя потери тепла за счет конвекции и теплопередачи между средами. Концевые крышки из материала с высокой теплопроводностью (например, медь или алюминий) обеспечивают интенсивный теплообмен между термосифоном и окружающей средой. Высокая теплопроводность материала способствует равномерному распределению тепла по поверхности крышек, что снижает локальные перегревы и минимизирует тепловое сопротивление [62, 70].

Механизм передачи тепла в геотермальном термосифоне основан на конвективном теплообмене, который сочетает в себе конвекцию и теплопроводность [19, 23].

Плотность теплового потока в процессе конвективного теплообмена вычисляется с помощью следующей формулы:

$$\vec{q}_{\text{кто}} = \vec{q}_{\text{конд}} + \vec{q}_{\text{конв}} = -\lambda_f \nabla T + p \vec{w} h, \quad (3.14)$$

где $\vec{q}_{\text{кто}}$ – плотность теплового потока при конвективном теплообмене, Вт/м²;

$\vec{q}_{\text{конд}}$ – плотность теплового потока при кондуктивном (за счет теплопроводности) теплообмене в текучей среде, Вт/м²;

$\vec{q}_{\text{конв}}$ – плотность теплового потока за счет конвекции текучей среды (флюида), Вт/м²;

λ_f – коэффициент теплопроводности флюида, Вт/м·°C;

∇T – градиент температурного поля флюида, °C/м;

p – плотность флюида, кг/м³;

\vec{w} – скорость движения флюида, м/с;

h – удельная энталпия флюида, Дж/кг.

Было выявлено, что на процесс конвективного теплообмена оказывают влияние не только температурные характеристики текучей среды, но и скорость движения флюида.

Геотермальные термосифоны с естественной циркуляцией работают на основе свободной конвекции, при которой движение жидкости происходит без внешнего воздействия, а обусловлено разницей плотностей в различных участках среды, возникающей из-за изменения температуры. Неровное распределение

температуры создает изменяющееся поле плотности, что приводит к перемещению масс с различной плотностью вдоль термосифона [24-26].

При расчете конвективного теплообмена используют три параметра: поле температуры, поле скорости и поле давления. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена с соответствующими условиями однозначности в общем случае не получено, поэтому в данной работе используются методы инженерного расчета [27-29].

Инженерные методы вычислений основываются на данных, полученных в ходе лабораторных или промышленных экспериментов, а также на теории аналогии физических процессов, которая опирается на систему дифференциальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен.

Количество перенесенного тепла определяется по формуле:

$$Q = \alpha F \Delta t = \alpha F (t_f - t_w), \quad (3.15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

F – поверхность теплообмена, м²;

Δt – температурный напор, °С;

t_f – средняя температура рабочего тела, °С;

t_w – средняя температура стенки термосифона, °С.

Одной из основных задач при анализе конвективного теплообмена является вычисление коэффициента теплоотдачи в определенных условиях. Это обусловлено тем, что аналитический расчет этого коэффициента невозможен из-за его зависимости от множества факторов, включая параметры процесса, размеры оборудования и граничные условия. Поэтому коэффициент теплоотдачи определяется с помощью эмпирических формул в критериальной форме, основываясь на принципах теории подобия [16, 30].

Для конвективного теплообмена используют следующие пять чисел подобия: число Рейнольдса Re , число Прандтля Pr , число Нуссельта Nu , число Грасгофа Gr и число Эйлера Eu [8, 31].

При проектировании теплообменных аппаратов необходимо определить два параметра: коэффициент теплоотдачи α и перепад давления Δp . Они входят в числа

Нуссельта и Эйлера, поэтому эта определяемая числа подобия, а числа Рейнольдса, Грасгофа и Прандтля – определяющие. Таким образом, при исследовании процесса трансфера теплоты с помощью геотермальных термосифонов с естественной циркуляцией рабочего тела необходимо установление двух зависимостей: $Nu = f_1(Re, Pr, Gr)$; $Eu = f_2(Re, Pr, Gr)$.

Общее уравнение подобия для конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu = c Re^n Pr^m Gr^d \left(\frac{Pr_f}{Pr_2} \right)^{0,25}, \quad (3.16)$$

где коэффициенты c , n , m , d определяются экспериментальными исследованиями, множитель $\left(\frac{Pr_f}{Pr_2} \right)^{0,25}$ учитывает направление потока, при этом Pr_f – число Прандтля для жидкости при ее температуре; Pr_w – число Прандтля для жидкости при температуре стенки.

Число Грасгофа характеризует интенсивность свободного конвективного теплообмена и определяется уравнением:

$$Gr = \frac{g \beta l^3 \Delta t}{\nu^2}, \quad (3.17)$$

где g — ускорение свободного падения, на поверхности Земли $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
 l — определяющий характерный линейный размер поверхности теплообмена, м;

Δt – разница температур между температурой поверхности теплообмена и температурой теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$;

ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

β — температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя, К-1 [21, 22].

Из анализа зависимостей (3.16) и (3.17) следует, что для исследования процесса интенсивности теплопереноса в геотермальных термосифонах с естественной циркуляцией рабочего тела в зависимости от его геометрических параметров и конструктивных особенностей определяющим показателем является число Грасгофа [32-33].

На основе экспериментальных данных необходимо произвести расчет числа Грасгофа и коэффициента теплоотдачи при ламинарном течении в экспериментальной установке с учетом естественной конвекции [34-35]. При величине комплекса $GrPr$ больше $8 \cdot 10^5$ расчет коэффициента теплоотдачи необходимо проводить с учетом влияния естественной конвекции в потоке жидкости по формуле:

$$Nu_{ж} = 0,15 Re_{ж}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_L. \quad (3.17)$$

На основе анализа принципа функционирования геотермального термосифона разработана экспериментальная модель с целью установления закономерностей в процессе тепломассопереноса в термосифоне с естественной циркуляцией в зависимости от высоты установки и введения конструктивного разделения потоков рабочего тела внутри системы.

2.2 Разработка математической модели функционирования ГТЕЦ

Для исследования зависимостей работы геотермального термосифона с естественной циркуляцией (ГТЕЦ) предложена математическая модель, которая описывает процесс тепломассообмена и гидродинамики, позволяет оценить влияние физико-химических свойств рабочего тела и определить влияние наличия теплоизолированного слоя на разделителе сред восходящих и нисходящих потоков на эффективность передачи тепла и минимизацию тепловых потерь. В качестве рабочего тела в ГТЕЦ рассматривается [1, 23, 44].

Эффективность применения ГТЕЦ зависит от геотермической ступени, так как она обусловлена повышению температуры горных пород на 1°C с увеличением глубины в земной коре. Геотермическая ступень по России определяется от 5 до 170 м/ $^{\circ}\text{C}$ в зависимости от региона и глубины залегания.

Математическая модель, описывающая процесс тепломассообмена включает основные уравнения теплового баланса ГТЕЦ (рисунок 2.2) и уравнения движения теплоносителя с учетом движущего напора естественной циркуляции в контуре ГТЕЦ, сопротивление по длине и сопротивление на преодоление местных сопротивлений [40, 134].

2.1. Общая нестационарная модель

ГТЕЦ расположен в геотермальной скважине, помещенный в массив грунта. На границе ГТЕЦ с диаметром $D_b/2 = r$ происходит теплообмен между теплоносителем и грунтом. Температура теплоносителя $t(x, \tau)$ зависит от координаты x , отсчитываемой вдоль канала ГТЕЦ, и от времени τ . На входе в ГТЕЦ при $x = 0$ температура задается постоянной и равной $t(0, \tau) = t_0 = \text{const}$. В начальный момент времени температура теплоносителя в канале равна температуре окружающей среды $t(x, 0) = T_p$.

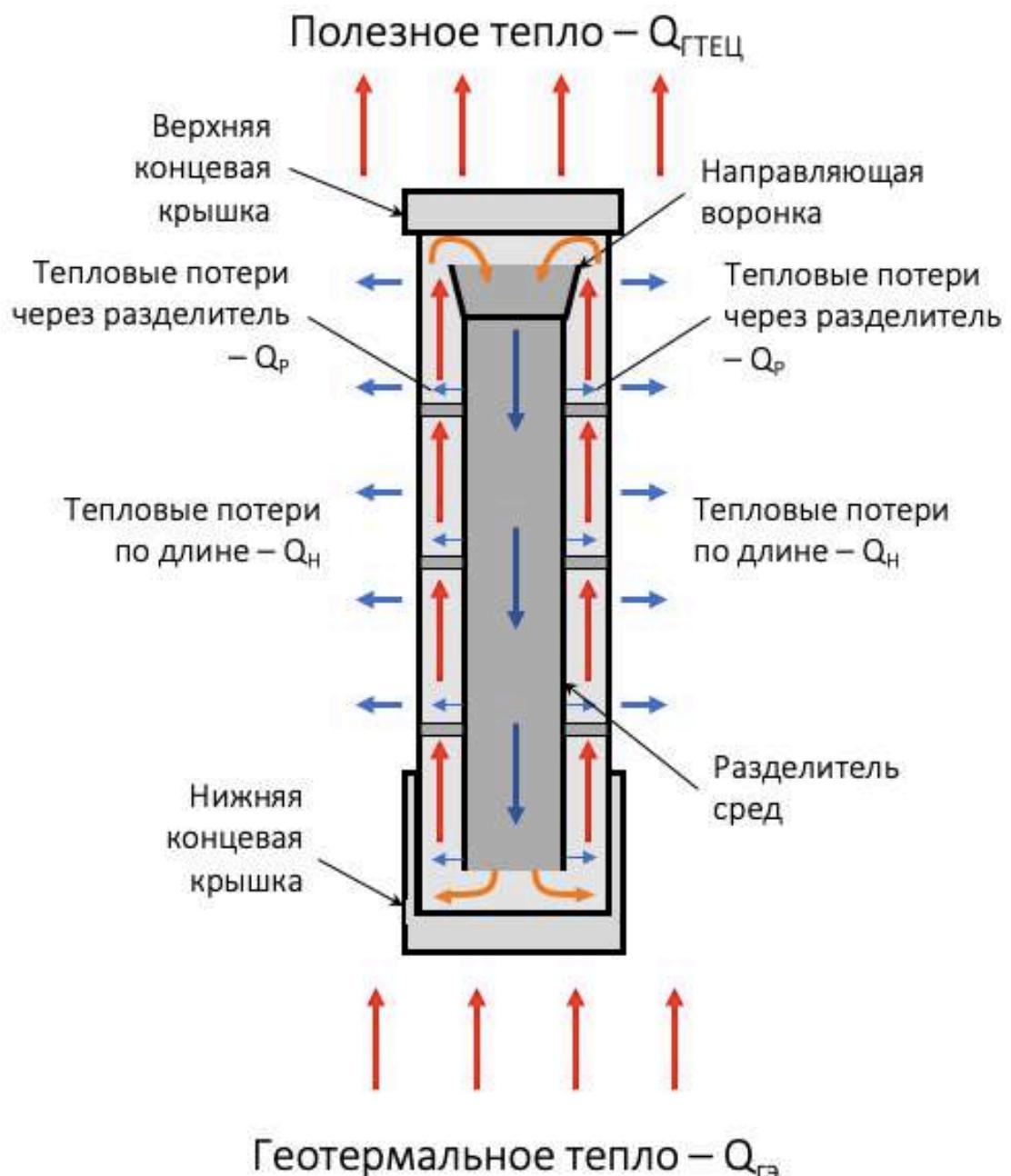


Рисунок 2.2 – Тепловой баланс ГТЕЦ с учетом тепловых потерь

Математическая модель представляет систему дифференциальных уравнений в частных производных, включающая:

- Уравнение для температуры теплоносителя в ГТЕЦ;
- Уравнение теплопроводности для грунта в цилиндрических координатах.

Система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} + \nu \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \frac{\sigma}{\rho_1 c_1} \alpha_1 (t(x, \tau) - T(R, x, \tau)) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \left(\frac{\partial^2 T(x, r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (2.2)$$

Начальные условия:

$$t(0, \tau) = t_0, T(x, r, 0) = T_{\Pi}$$

Границные условия на границе раздела грунт-теплоноситель:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (t - T) \Big|_{r=R}$$

где ν – скорость течения теплоносителя по трубе, м/с, σ – $2/R$ отношение площади поверхности теплоносителя к его объему, $1/\text{м}$, R – радиус ГТЕЦ, м, α_1 – коэффициент теплоотдачи границы раздела теплоносителя и грунта Земли, который определяется геометрическими характеристиками системы и тепловыми свойствами грунта, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, ρ_1, c_1 – плотность и теплоемкость теплоносителя, τ – время, сек, t – текущая температура теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$, T – температура грунта Земли, $^{\circ}\text{C}$, x – координата вдоль ГТЕЦ, м, r – текущий радиус, м, λ_2, ρ_2, c_2 – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность грунта Земли.

Так как теплообмен между теплоносителем и массивом Земли начинается с момента прихода гидродинамической волны в данную точку с координатой x , необходимо перейти в систему отсчета $x, \tau^* = \tau - x$.

В новых координатах система дифференциальных уравнений и граничных и начальных условий запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial t(x, \tau^*)}{\partial x} = \frac{\sigma}{\rho_1 c_1} \alpha_1 (t(x, \tau^*) - T(R, x, \tau^*)) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T(x, r, \tau^*)}{\partial \tau^*} = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \left(\frac{\partial^2 T(x, r, \tau^*)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(x, r, \tau^*)}{\partial r} \right) \quad (2.4)$$

Начальные условия

$$t(0, \tau) = t_0, T(x, r, 0) = T_{\Pi}$$

Границные условия на границе грунта Земли

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (t - T) \Big|_{r=R}$$

2.2. Установившийся стационарный режим

Общая система уравнений (2.3), (2.4) описывает динамический процесс выхода ГТЕЦ на рабочий режим. Для анализа долговременной, установившейся работы системы, когда температуры больше не изменяются во времени ($\partial/\partial\tau = 0$), модель может быть существенно упрощена.

Упрощающие допущения для стационарного режима:

- Стационарность: Все временные производные равны нулю: $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$.
- Постоянство свойств теплоносителя: Плотность ρ_1 , теплоемкость c_1 и скорость потока v считаются постоянными.
- Линейный геотермический градиент: Температура невозмущенного грунта зависит от глубины по линейному закону: $T_{\text{гр}}(r \rightarrow \infty, x) = T_{\text{пов}} + \gamma x$, где γ - геотермический градиент.
- Стационарное поле температуры грунта: Уравнение теплопроводности для грунта сводится к уравнению Лапласа в цилиндрических координатах.

2.3. Уравнение теплового баланса для теплоносителя

При $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ и вводе массового расхода $G = \rho_1 \cdot v \cdot F$, уравнение (2.3)

преобразуется к виду, описывающему изменение теплосодержания потока вдоль координаты x :

$$G \cdot c_p \cdot \frac{dt}{dx} = -q_L(x) \quad (2.5)$$

где $q_L(x)$ - плотность теплового потока с поверхности ГТЕЦ на единицу длины, Вт/м. Для цилиндрической трубы, окруженной грунтом, этот поток выражается через коэффициент теплопередачи k , Вт/(м·К):

$$q_L(x) = k \cdot \pi \cdot D \cdot (t(x) - T_{\text{gp}}(x)) \quad (2.6)$$

Окончательный вид дифференциального уравнения:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{k \cdot \pi \cdot D}{G \cdot c_p} \cdot (t(x) - T_{\text{gp}}(x)) \quad (2.7)$$

Это уравнение описывает изменение температуры теплоносителя вдоль длины ГТЕЦ из-за теплообмена с окружающей землей.

2.4. Уравнение для температуры грунта

В стационарном случае $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$ уравнение (2) становится:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.8)$$

Решение этого уравнения с граничным условием $-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1(t - T)|_{r=R}$

и условием $T_{\text{gp}}(r \rightarrow \infty, x) = T_{\text{пгр}}(x)$ приводит к логарифмическому профилю температуры в грунте вокруг трубы. Тепловой поток на единицу длины тогда равен:

$$q_L(x) = 2\pi \cdot \frac{\lambda_2}{\ln\left(\frac{r_\infty}{R}\right)} \cdot (t(x) - T_{\text{gp}}(x)) \quad (2.9)$$

Сравнивая с выражением выше, получаем коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{2\lambda_2}{D \cdot \ln\left(\frac{r_\infty}{R}\right)} \quad (2.10)$$

где r_∞ - расстояние, где температура грунта равна невозмущенной $T_{\text{gp}}(x)$.

2.5. Уравнение движения

Для описания циркуляции теплоносителя в замкнутом контуре ГТЕЦ используется уравнение движения. В дифференциальной форме для установившегося течения — это уравнение баланса импульса. Проекция на ось x (вдоль трубы):

$$\frac{dp}{dx} = -\rho \cdot g \cdot \cos\theta - \left(\frac{\lambda}{D_3}\right) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2.11)$$

где $\frac{dp}{dx}$ - градиент давления; $\rho \cdot g \cdot \cos\theta$ - гидростатическая составляющая; $\left(\frac{\lambda}{D_3}\right) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$ - сопротивление трения; θ - угол между осью x и вертикалью; D_3 - эквивалентный диаметр; λ - коэффициент гидравлического трения.

Для ламинарного режима течения: $\lambda = 64/Re$.

2.6. Уравнение неразрывности

Для установившегося течения с постоянными свойствами уравнение неразрывности имеет алгебраический вид:

$$G = \rho \cdot v \cdot F = const \quad (2.12)$$

2.7. Связь с интегральными уравнениями

Решение дифференциальных уравнений (2.7), (2.11) позволяет найти распределения $t(x)$ и $p(x)$. Интегральные величины затем вычисляются как:

Общие теплопотери: $Q_H = G \cdot c_p \cdot [t(0) - t(L)]$

Полезная мощность: $Q_{ГТЕЦ} = G \cdot c_p \cdot [t(L) - t_{вх}]$

Движущий напор: $P_{дв} = g \cdot H \cdot (\rho_x - \rho_r)$

Гидравлические потери: $\Delta P_{цк} = \int \left(\frac{dp}{dx}\right) dx$

Интегральные уравнения баланса являются следствием решения соответствующих дифференциальных уравнений для стационарного режима.

Разработана математическая модель функционирования ГТЕЦ. Математическая модель представляет систему уравнений включающую уравнение теплового баланса, уравнение движения и уравнение тепломассообмена при естественной циркуляции рабочего тела с учетом теплоизолированного разделителя сред, внутренних тепловых потерь, конструктивных размеров, глубины залегания источника теплоты [2, 17, 57]:

2.8. Тепловой баланс:

$$Q_{ГЭ} = Q_H + Q_P + Q_{ГТЕЦ} \quad (2.13)$$

при $Q_H = \frac{2\pi\lambda_{ГТЕЦ}H\Delta T}{\ln\frac{D_6}{D_M}}$ - тепловые потери по длине ГТЕЦ, Вт:

где $\lambda_{\text{гтец}}$ – теплопроводность стенки ГТЕЦ, Вт/м·К, H – высота ГТЕЦ, м, ΔT – разность температур между внутренней и внешней средой, К, D_6, D_M – внешний и внутренний диаметр ГТЕЦ, м;

при $Q_P = \frac{\Delta T_{\text{раздел}}}{R_{\text{раздел}}}$ - тепловые потери через разделитель, Вт:

где $\Delta T_{\text{раздел}}$ – разность температур теплоносителя между горячей и холодной средой, °C, $R_{\text{раздел}}$ – тепловое сопротивление разделителе, $(\text{м}^2\text{К})/\text{Вт}$;

при $Q_{\text{ГТЕЦ}} = 73,3 \cdot \left(H \cdot \frac{\Delta T_3}{\Delta h} \right)^{1,33} \cdot (D_6 - D_M)^2$ – транспортируемое тепло от ГТЕЦ, Вт:

где ΔT_3 – разность температуры в массиве Земли, °C, Δh – изменение глубины залегания ГТЕЦ, м.

2.9. Уравнение движения:

$$P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{под}} + \Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{цк}} \quad (2.14)$$

при $P_{\text{дв}} = g \cdot H \cdot (\rho_x - \rho_g)$ - движущий напор естественной циркуляции в контуре ГТЕЦ, Па:

где H – высота циркуляционного контура ГТЕЦ, м; ρ_x и ρ_g – плотность холодного и горячего контура соответственно, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²;

при $\Delta P_{\text{цк}} = \Delta P_l + \Delta P_M$ - полезный напор циркуляции в контуре ГТЕЦ, Па;

где $\Delta P_l = \lambda \cdot \frac{H \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot v^2}{2 \cdot D_M}$ - сопротивление по длине, Па и $\Delta P_M = \sum \xi \cdot \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot v^2}{2}$ -

сопротивление на преодоление местных сопротивлений, Па,

где λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине; v – средняя скорость рабочей среды, м/с; $\rho_{\text{ср}}$ – плотность рабочей среды при средней температуре кг/м³, ξ – местные сопротивления.

2.10. Уравнения тепломассообмена - уравнение сплошности

$$G = v \cdot \rho \cdot F \quad (2.15)$$

где F – площадь проходного сечения контура, м² [50].

Принятые следующие допущения:

1. Ламинарный режим течения теплоносителя.
2. Теплоноситель – вода.
3. Физические свойства теплоносителя постоянные.

4. Изменение температуры грунта по длине ГТЕЦ подчиняется линейному закону.

5. Контакт стенки ГТЕЦ с грунтом непрерывен.

При проведении компьютерного моделирования в программном комплексе SolidWorks была получена скорость теплоносителя для модели ГТЕЦ и коэффициент теплоотдачи (рисунок 2.3). Полученные результаты были использованы в расчетах для определения количества теплоты.

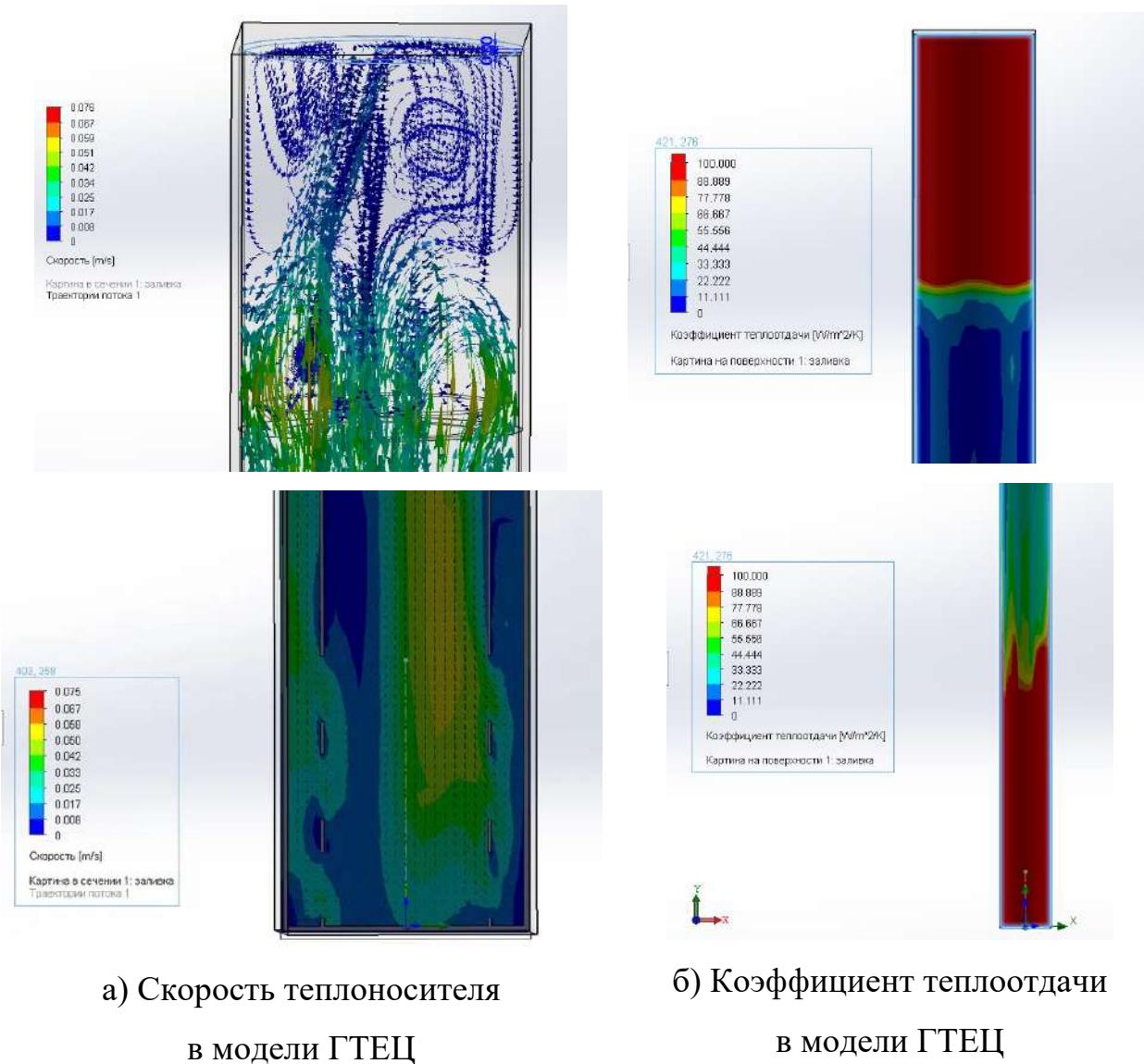


Рисунок 2.3 – Компьютерное моделирование работы модели ГТЕЦ

Скорость теплоносителя в модели ГТЕЦ при компьютерном моделировании определяется в пределе от 0,017 м/с до 0,075 м/с (рисунок 2.3 – а). Коэффициент теплоотдачи в модели ГТЕЦ определяется в пределе от 11,111 м/с до 88,889 м/с (рисунок 2.3 – б).

На основании проведенных расчетов устанавливается количество теплоты, переносимой ГТЕЦ, с учетом теплопотерь в случаях с установленным и без разделителя сред для восходящих и нисходящих потоков.

Разность давлений рабочей среды в ГТЕЦ вызывает движение в контуре и называется движущим напором естественной циркуляции, который определяется по выражению [48, 98]:

$$P_{\text{дв}} = g \cdot H \cdot (\rho_x - \rho_g), \quad (2.16)$$

где H – высота циркуляционного контура ГТЕЦ, м; ρ_x и ρ_g – плотность холодного и горячего контура соответственно, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

При установившемся режиме работы в ГТЕЦ движущий напор идет на преодоление суммы внутренних сопротивлений в опускном и подъемном участке системы ГТЕЦ:

$$P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{под}} + \Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{цк}}, \quad (2.17)$$

Определение скорости течения жидкости:

Полезный напор циркуляции расходуется на преодоление сопротивления по длине системы в ГТЕЦ и на преодоление местных сопротивлений:

$$\Delta P_{\text{цк}} = \Delta P_l + \Delta P_m, \quad (2.18)$$

ΔP_l определяется по формуле:

$$\Delta P_l = \lambda \cdot H \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot v^2 / 2 \cdot d_{\text{вн}}, \quad (2.19)$$

где λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине; v – средняя скорость рабочей среды, м/с; H – высота циркуляционного контура ГТЕЦ, м; $\rho_{\text{ср}}$ – плотность рабочей среды при средней температуре кг/м³; $d_{\text{вн}}$ – диаметр внутренней трубы ГТЕЦ, м.

Потери давления на местных сопротивлениях ΔP_m определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P_m = \sum \xi \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot v^2 / 2, \quad (2.20)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – плотность рабочей среды при средней температуре кг/м³; v – средняя скорость рабочей среды, м/с; ξ – местные сопротивления, определяется по формуле:

$$\xi = 0,94 \cdot \sin(\alpha/2) + 2,047 \cdot \sin(\alpha/2)^2, \quad (2.21)$$

где α — это угол поворота потока в ГТЕЦ [6, 31].

Коэффициент гидравлических потерь λ определяется для конкретных режимов течения:

- ламинарный - $\lambda=64/R$, где $0 < Re < 2300$;
- переходный - $\lambda \sim 0,003$, где $2300 < Re < 4000$;
- для гидравлически гладкой трубы - $\lambda=0,3164/\sqrt[4]{Re}$, где $4000 < Re < 40d/k$.

В предлагаемой конструкции ГТЕЦ на внешней стороне разделителя сред будет установлена изоляция для уменьшения тепловых потерь. Для определения коэффициента λ для шероховатых труб используются формула Никурадзе:

$$\lambda = 1/(2 \cdot \log(d_{bh}/\Delta) + 1,14)^{0,25}, \quad (2.22)$$

где Δ — значение эквивалентной шероховатости, мм.

Следовательно, потери в циркуляционном контуре будут определяться по формуле:

$$\Delta P_{цк} = (\lambda \cdot 2 \cdot H/d_{bh} + \sum \xi) \cdot \rho_{cp} \cdot v^2/2, \quad (2.23)$$

Для расчета потерь давления во всем контуре необходимо иметь ввиду, что длина циркуляционного контура равна двойной высоте данной системы.

Из уравнения сплошности определяем расход рабочего среды:

$$G = v \cdot \rho \cdot F, \quad (2.24)$$

где F — площадь проходного сечения контура, m^2 .

Следовательно, для расчета количества теплоты от ГТЕЦ необходимо определить среднюю скорость рабочей среды в ГТЕЦ:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot (\rho_x - \rho_r)/\rho_{cp} \cdot (\lambda \cdot 2 \cdot H/d_{bh} + \sum \xi)}, \quad (2.25)$$

По выражениям (2.16-2.25) определены основные характеристики рабочего процесса транспортирования теплоносителя для определения тепловой мощности,рабатываемой ГТЕЦ.

Для повышения точности определения количества тепловой энергии, передаваемой геотермальным термосифоном, необходимо учитывать тепловые потери, возникающие в процессе транспортировки энергии, а также внутренние

потери, обусловленные теплообменом между разделителем холодной и горячей среды [9, 111].

Тепловые потери на границе разделения горячей и холодной среды необходимо оценить с учетом теплового сопротивления разделителя при наличии и отсутствии теплоизолированного материала на внешней стороне разделителя сред [128]:

$$Q_p = \frac{\Delta T_{раздел}}{R_{раздел}}, \quad (2.26)$$

где $\Delta T_{раздел}$ – разность температур между горячей и холодной средой, $^{\circ}\text{C}$; $R_{раздел}$ – тепловое сопротивление разделителе, $(\text{м}^2\text{К})/\text{Вт}$.

Для анализа функционирования системы транспортирования тепла, как пример выбран район с геотермической ступенью $5 \text{ м}/^{\circ}\text{C}$. Расчетные случаи приведены при температуре зон с повышенной термической активностью от $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Диаметр расчетной установки $D_y=75 \text{ мм}$ (внешний трубопровод) и $D_y=50 \text{ мм}$ (внутренний трубопровод). Расчет температуры грунта отсчитывается от глубины нейтральной зоны $H_{н.з.}=5 \text{ м}$.

Результаты расчета количества теплоты, транспортируемой с помощью ГТЕЦ без разделителя и с внедрением разделителем сред восходящих и нисходящих потоков представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Количество теплоты транспортируемая геотермальным термосифоном с естественной циркуляции относительно наличия разделителя сред

Высота ГТЕЦ	Температура грунта	Без разделителя среды		С разделителем сред
			$Q, \text{Вт}/\text{м}^2$	
100	25	73,1		95,0
200	45	252,5		328,2
300	65	435,0		565,5
400	85	903,7		1 174,8
500	105	1 373,9		1 786,1
600	125	1 929,8		2 508,8
700	145	2 570,7		3 341,9
800	165	3 295,7		4 284,4
900	185	4 104,3		5 335,6
1000	205	4 666,2		6 066,1

На основании моделирования установлено количество теплоты, переносимой ГТЕЦ, с учетом теплопотерь в случаях с установленным и без разделителя сред для восходящих и нисходящих потоков (рисунок 2.4).

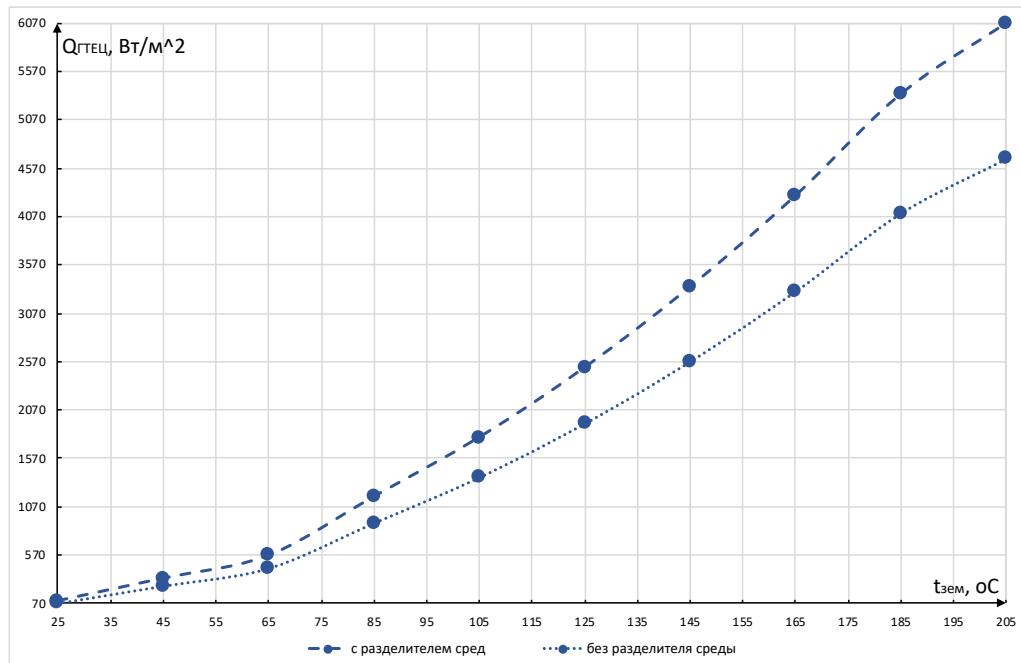


Рисунок 2.4 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры залегания грунта при наличии и отсутствии разделителя сред

Результат математического моделирования демонстрирует увеличение энергетической эффективности ГТЕЦ при внедрении разделителя сред восходящих и нисходящих потоков на 20%.

Результаты расчета количества теплоты при внедрении теплоизолированного слоя на внешней стороне разделителя сред восходящих и нисходящих потоков представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Количество теплоты транспортируемая геотермальным термосифоном с естественной циркуляции относительно наличия теплоизолированного слоя на разделителе сред

Высота ГТЕЦ	Температура грунта	Без разделителя среды	С разделителем сред	С теплоизолированным разделителем сред
$H_{\text{ГТЕЦ}}, \text{ м}$	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q, \text{ Вт/м}^2$		
100	25	73,1	95,0	104,5
200	45	252,5	328,2	361,0
300	65	435,0	565,5	622,0
400	85	903,7	1174,8	1292,3
500	105	1373,9	1786,1	1964,7

Высота ГТЕЦ	Температура грунта	Без разделителя среды	С разделителем сред	С теплоизолированным разделителем сред
$H_{ГТЕЦ}, м$	$t, ^\circ C$	$Q, Вт/м^2$		
600	125	1929,8	2508,8	2759,6
700	145	2570,7	3341,9	3676,1
800	165	3295,7	4284,4	4712,8
900	185	4104,3	5335,6	5869,1
1000	205	4666,2	6066,1	6672,7

Также результаты расчета показали, что внедрение теплоизолированного слоя на внутреннем разделителе сред восходящих и нисходящих потоков позволяет увеличить энергетическую эффективность на 10 % (рисунок 2.5).

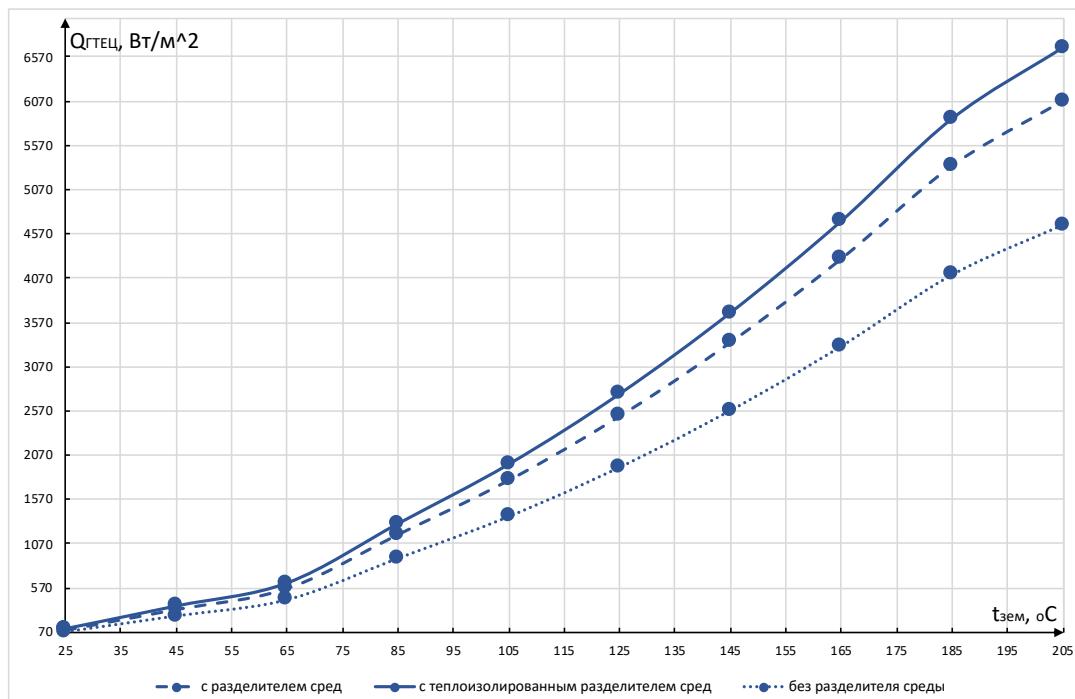


Рисунок 2.5 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры залегания грунта при наличии и отсутствии теплоизолированного разделителя сред

Таким образом разработана математическая модель функционирования ГТЕЦ, учитывающая внедрение теплоизолированного слоя на разделителе сред восходящих и нисходящих потоков, которая позволила оценить влияние конструктивных изменений на эффективность теплообмена. Расчет показал, что новые конструкторские решения способствуют увеличению транспортируемого количества тепла на 30%.

2.3 Анализ влияния параметров работы на эффективность ГТЕЦ

Конструктивное решение с теплоизолированным разделителем сред позволяет эффективно разделять горячий и холодный потоки теплоносителя, что обеспечивает:

- предотвращение смешения разнотемпературных сред;
- минимизацию тепловых потерь за счет снижения конвективного теплообмена;
- уменьшение теплопередачи между потоками.

Концевые элементы системы, выполненные из высокотеплопроводных материалов (медь, алюминий), выполняют следующие функции:

- обеспечивают интенсивный теплообмен между рабочим телом термосифона и окружающей средой;
- способствуют равномерному распределению теплового потока по всей поверхности;
- исключают образование локальных перегревов;
- снижают общее термическое сопротивление системы.

Такое конструктивное исполнение позволяет достичь максимальной эффективности теплопередачи при сохранении стабильности работы термосифона.

Применение теплоизоляционного покрытия на внутреннем разделителе потоков обеспечивает повышение энергоэффективности системы на 10%.

2.4 Выводы по второй главе

Проведенный анализ подтвердил, что геотермальный термосифон является оптимальным решением для передачи геотермальной энергии. Однако выявлено, что существующие конструкции могут терять до 30% тепловой энергии из-за следующих факторов:

- особенностей конструкции;
- свойств теплоносителя;
- эксплуатационных условий;

Основные факторы, снижающие эффективность транспортирования геотермальной энергии с помощью ГТЕЦ:

- недостаточная циркуляция (из-за неправильного угла наклона, засоров или неоптимального количества хладагента);
- теплопотери через высокопроводящие материалы.

Предложенные конструктивные усовершенствования для ГТЕЦ:

- теплоизолированный разделитель потоков;
- направляющая воронка;
- высокопроводящие концевые крышки (медь, алюминий).

Разработанная математическая модель работы ГТЕЦ позволила:

- проанализировать гидродинамические процессы;
- учесть геотермические особенности (ступень 5-170 м/°C).

Результаты математического моделирования:

- вода показала наилучшие характеристики как рабочее тело (высокая теплоемкость, экологичность, экономичность);
- внедрение разделителя сред восходящих и нисходящих потоков в ГТЕЦ повысил энергоэффективность на 20%;
- теплоизолированный разделитель повысил энергоэффективность на 10%;
- максимальная тепловая мощность достигла $6,066 \text{ кВт}/\text{м}^2$ при температуре грунта 205°C.

Предложенные технические решения и математическая модель демонстрируют значительный потенциал для повышения эффективности геотермальных термосифонов. Реализация этих разработок позволит существенно снизить энергетические потери и повысить рентабельность геотермальных энергетических установок.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

3.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований

Основной целью теории планирования эксперимента является построение математической модели исследуемого процесса. В рамках планирования эксперимента по выявлению зависимости транспортируемой геотермальной энергии с помощью ГТЕЦ исследуемая система рассматривается как «черный ящик», внутренняя структура которого остается неизвестной. Такой подход позволяет установить статистические зависимости между управляющими переменными и выходными характеристиками системы, применяя методы математического моделирования и оптимизационные процедуры. Данная методология особенно эффективна для анализа сложных технологических процессов, где полное описание внутренних механизмов требует значительных вычислительных затрат [19].

Система «черный ящик» характеризуется тремя группами параметров:

- входные (управляющие) параметры x_i являются параметрами, которые вариируются по своему усмотрению – температура грунтового массива и длина экспериментальной установки;
- выходные параметры y_i являются параметрами, которые характеризуют исследуемые свойства транспортированной энергии – изменение температуры теплоносителя;
- возмущающие параметры w_i являются параметры, которые не поддаются контролю и являются случайными – температура и влажность окружающей среды.

В общем случае объект исследования можно представить в виде структурной схемы (рисунок 3.1).

Переменные x_i представляют собой контролируемые факторы, количественно оцениваемые с помощью измерительных приборов (например, термометра для температуры грунта или линейного датчика для длины установки). Контролируемые переменные x_i должны удовлетворять следующим критериям:

1. Управляемость – возможность точной установки и поддержания заданного уровня фактора;
2. Измерительная точность - минимальная погрешность измерений;
3. Однозначность – фактор не должен быть функционально зависим от других факторов, так как это затрудняет его контроль;
4. Совместимость и независимость, при наличии следующих факторов:
 - 4.1 Физическая реализуемость любых комбинаций уровней;
 - 4.2 Отсутствие взаимных ограничений при варьировании факторов.

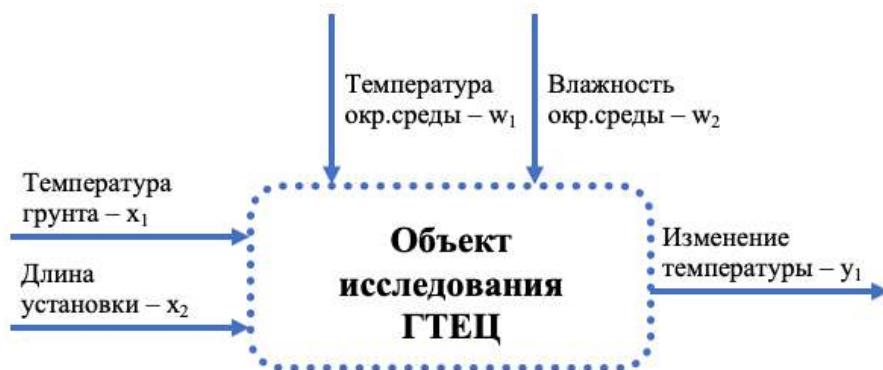


Рисунок 3.1 – Параметрическая схема «черного ящика» исследования трансфера геотермальной энергии

На этапе определения области эксперимента устанавливаются граничные условия исследования. Температурный режим грунта выбирается в диапазоне 40-70°C с шагом 10°C, что соответствует зонам с повышенным геотермальным потенциалом на глубинах свыше 200 метров. Параллельно определяется геометрия экспериментальной установки, где длина варьируется от 0,5 до 2 метров с дискретностью 0,5 метра, что обеспечивает оптимальные условия для наблюдения температурной динамики теплоносителя.

3.1.1 Разработка математической модели процесса

Основная цель исследования заключается в установлении функциональной зависимости (3.1) при минимальном количестве измерений значений управляемых параметров x_i :

$$y = f(x_1, x_2) \quad (3.1)$$

Фиксированное значение фактора называют уровнем фактора. Для облегчения построения эксперимента фактор должен иметь определенное число

дискретных уровней. Фиксированный набор уровней факторов определяет одно из возможных состояний «черного ящика». Одновременно это есть условие проведения одного из возможных опытов. Если перебрать все возможные наборы состояний, то получается множество различных состояний «черного ящика». Одновременно это будет минимальным числом возможных различных опытов.

В рамках метода полного факторного эксперимента (ПФЭ) рассматривается линейная составляющая разложения в ряд Тейлора, включающая члены с произведениями факторов в первой степени. Данный подход является оптимальным при отсутствии априорных данных, позволяющих обосновать структуру модели с позиций физико-химической природы исследуемых процессов, а также при невозможности количественной оценки степени влияния факторов на выходной параметр объекта [80, 95].

Коэффициенты регрессионного уравнения определяются экспериментальным путём, что обуславливает их зависимость от погрешностей измерений. В ПФЭ математическая модель процесса представляется в виде уравнения регрессии, где коэффициенты b_n – коэффициенты регрессии (3.2):

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_n X_n + b_{12} X_1 X_2 + \cdots + b_{(n-1)n} X_{n-1} X_n \quad (3.2)$$

Коэффициенты регрессии определяются по выражениям (3.3):

$$\begin{aligned} b_0 &= \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N} \\ b_i &= \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} \bar{y}_j}{N} \\ b_{lm} &= \frac{\sum_{j=1}^N X_{jl} X_{jm} \bar{y}_j}{N} \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $l \neq m$, N – число опытов, j – номер опыта, i, l, m – номера факторов.

В рамках методологии планирования эксперимента общее количество необходимых опытов определяется выражением (3.4):

$$N = p^k \quad (3.4)$$

где N – число опытов, p – число уровней, k – число факторов.

При условии доказанной линейности функции отклика количество уровней может быть минимизировано до $p = 2$ без потери точности моделирования. В этом

случае реализуется двухуровневый факторный эксперимент, где для каждого фактора x_i определяются две граничные точки вариации:

- минимальный $x_{i \min}$ уровень;
- максимальный $x_{i \max}$ уровень.

На следующем этапе планирования эксперимента необходимо выбрать область определения факторов x_i . Так как факторы независимы, пусть каждому фактору соответствует координатная ось. Нижний и верхний уровень соответствует минимальному и максимальному уровню области действия факторов.

Для построения аппроксимирующей функции достаточно выбрать основной (нулевой) уровень – середина диапазона и интервал варьирования управляющего параметра x_i .

Интервал варьирования факторов определяется по формуле (3.5):

$$\Delta x_i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (3.5)$$

Основной уровень определяется, как среднее значение (3.6):

$$x_{i0} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2} \quad (3.6)$$

Для нормализации факторов, т.е. для перевода факторов в стандартизованный масштаб или к безразмерной шкале необходимо применить формулу (3.7):

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \quad (3.7)$$

Таким образом, для переменной X_i в стандартизованном масштабе начало координат совмещено с центром эксперимента, а в качестве единицы измерения используется шаг варьирования фактора (рисунок 3.2). В кодированном виде верхний уровень любого фактора имеет значение +1, нижний – -1, основной – 0. Кодирование уровней факторов проводится для удобства записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных.

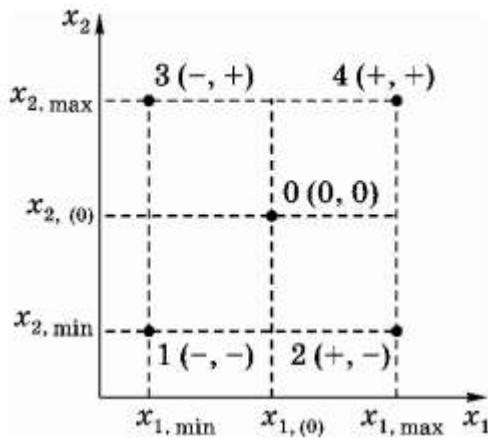


Рисунок 3.2 – Геометрическая интерпретация области двухфакторного эксперимента

В результате x_i принимает значения на границах $X_i = \pm 1$, на основном уровне $X_i = 0$. Применение безразмерных переменных (факторов) X_i существенно облегчает математические выкладки и запись конечных результатов, поэтому такое представление факторов применим для данного эксперимента [109].

Результаты конечных результатов факторов эксперимента должны быть представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты конечных результатов факторов эксперимента:

Уровни факторов	Наименование и обозначение факторов		Кодированные значения факторов	
	Фактор – X_1	Фактор – X_2	$X1$	$X2$
Интервал варьирования	Δx_1	Δx_2	1	1
Верхний уровень	x_{1max}	x_{2max}	+1	+1
Нижний уровень	x_{1min}	x_{2min}	-1	-1
Основной уровень	x_{10}	x_{20}	0	0

При проведении эксперимента по выявлению зависимости транспортируемой геотермальной энергии с помощью ГТЕЦ двухуровневыми факторами являются температурный режим грунта и длина ГТЕЦ. Следовательно, количество экспериментов по (3.4) $N = 2^2 = 4$.

В таблице 3.2 приведены условия опытов полного двухфакторного эксперимента. Эти опыты соответствуют в факторном пространстве вершинам куба с центром в начале координат.

Таблица 3.2 – Матрица планирования двухфакторного эксперимента:

№ опыта	Факторы				Функция отклика
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+	+	-	-	y ₁
2	+	+	+	+	y ₂
3	+	-	-	+	y ₃
4	+	-	+	-	y ₄

Из таблицы 3.2 видны основные принципы построения матрицы планирования ПФЭ:

- уровни варьирования первого фактора чередуются от опыта к опыту;
- частота смены уровней варьирования каждого последующего фактора вдвое меньше, чем в предыдущем.

Для полного двухфакторного эксперимента уравнение линейной регрессии имеет вид (3.8):

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (3.8)$$

Коэффициенты регрессии определяются по уравнению (3.9):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{(+1)y_1 + (+1)y_2 + (+1)y_3 + (+1)y_4}{4} \\
 b_1 &= \frac{(+1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (-1)y_4}{4} \\
 b_2 &= \frac{(-1)y_1 + (+1)y_2 + (-1)y_3 + (+1)y_4}{4} \\
 b_{12} &= \frac{(+1)(-1)y_1 + (+1)(+1)y_2 + (-1)(-1)y_3 + (-1)(+1)y_4}{4}
 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Уравнение (3.8) представляет собой регрессионную модель процесса в кодированных переменных с помощью таблицы 3.2. Для перехода к модели в физических переменных (x_i) необходимо воспользоваться уравнением (3.7).

3.1.2 Проверка воспроизводимости эксперимента

Перед построением математической модели исследуемого процесса необходимо удостовериться в воспроизводимости эксперимента.

Под воспроизводимостью понимается возможность возвращения объекта исследования и измерительной аппаратуры в исходное состояние на любом этапе эксперимента с последующим его повторением. Однако в ходе лабораторных или эксплуатационных испытаний объект исследования подвергается деформации, изменению геометрических параметров или постепенному ухудшению технических характеристик, что исключает возможность его полного восстановления до начального состояния.

Для верификации воспроизводимости эксперимента проводится серия параллельных опытов (от 2 до 4 для каждого условия). Параллельными опытами называются повторяющиеся эксперименты, выполняемые при идентичных значениях контролируемых факторов. Результаты опытов представлены в протоколах проведенных экспериментов в приложении В.

Для каждой серии параллельных опытов вычисляют среднее арифметическое значение функции отклика:

$$y_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, j = 1 \dots N \quad (3.10)$$

где k – число параллельных опытов, y_{ji} – значения параметров оптимизации i -м параллельном эксперименте j -й строки матрицы, N – число экспериментов.

Далее для каждой серии параллельных опытов вычисляют оценку дисперсии:

$$S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - y_i)^2 \quad (3.11)$$

Так как результаты опытов являются величинами случайными, то значения функции цели в параллельных опытах в общем случае будут различными.

Далее нужно определить расчетное значение числа Кохрана G_p – критерий проверки воспроизводимости эксперимента, для этого находят максимальную из оценок дисперсии $\max S_j^2$ и относится к сумме S_j^2 :

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} \quad (3.12)$$

Значения критерия Кохрана приведены в статистической таблице Приложение Г. Они соответствуют доверительной вероятности $P = 0,95$, с которой принимается гипотеза о воспроизводимости опытов. Величина $p = 1 - P$ называется уровнем значимости.

Для нахождения G_t необходимо знать общее количество оценок дисперсий N и число степеней свободы f , связанной с каждой из них, причем $f = k - 1$. Если выполняется условие:

$$G_p \leq G_t \quad (3.13)$$

то опыты считаются воспроизводимыми, а ряд дисперсий – однородным.

3.2 Описание экспериментальной модели ГТЕЦ

Экспериментальная модель состоит из стальных трубных секций диаметром 75 мм, которые соединяются переходниками [16]. Высота каждой секции составляет 500 мм. В нижней и верхней части установки герметично закреплены концевые крышки. Внутри внешних секций коаксиально установлен внутренний разделитель сред, состоящий из стальных трубных секций диаметром 50 мм. Наружная поверхность внутренних секций имеет теплоизоляционный слой для препятствования передаче тепла между потоками. На верхней секции разделителя сред установлен элемент с воронкой для направления потока из зоны с пониженным температурным потенциалом в зону с повышенным через выполненные отверстия на нижней части секции. Рабочей средой является проточная вода, которая заполняет весь объем термосифона (рисунок 3.3).

В экспериментальной установке выделено 3 тепловые зоны.

Зона 1 – зона повышенного температурного потенциала, значение температуры соответствует температуре в области горных пород. В этой зоне происходит процесс отбора тепла из модели грунтового массива, который представлен речным песком с плотностью 1600 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 0,3 м³/Вт · °С. Модель грунтового массива располагалась в емкости объемом 5 л. Емкость находился в тазе большего объема, который заполнен водой, где поддерживалась температура с помощью погружного спирального кипятильника Aquabeam мощностью 500 Вт. Эксперимент проводился

при поддержании температуры в предполагаемых горных породах для четырех температурных режимов: 40°C, 50°C, 60°C и 70°C.

Зона 2 – зона активного тепломассопереноса внутри экспериментальной модели.

Зона 3 – зона пониженного температурного потенциала, в которой искусственно происходит процесс понижения температуры с помощью сухого льда.

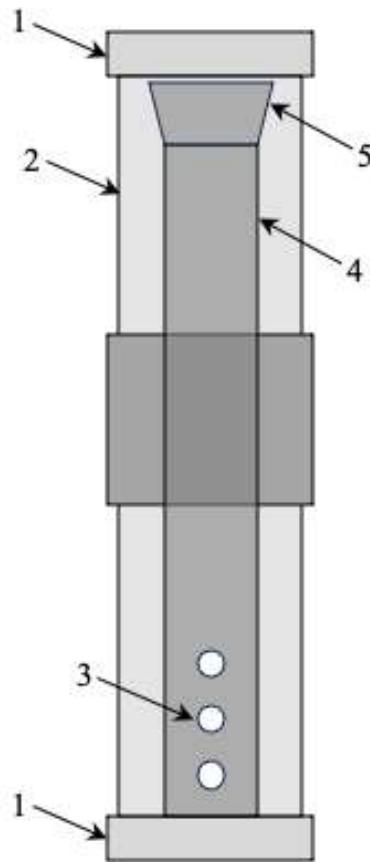


Рисунок 3.3 – Экспериментальная установка - термосифон с естественной циркуляцией: 1 – концевые крышки; 2 – внешняя секция; 3 – отверстие в нижней части разделителя сред; 4 – разделитель сред; 5 – воронка

В обозначенных зонах установлены цифровые термометры с диапазоном измерения от -50 °C до 100 °C. В зонах 2 и 3 место установки датчиков загерметизировано с помощью силиконового универсального герметика Kudo.

Разность значений температур в этих зонах определяет интенсивность процесса транспортирования тепла с помощью термосифона, и, как следствие, определяет эффективность функционирования экспериментальной модели [36].

Поэтому в установившихся режимах в зоне 2 и 3 температура теплоносителя должна оставаться постоянной (рисунок 3.4).

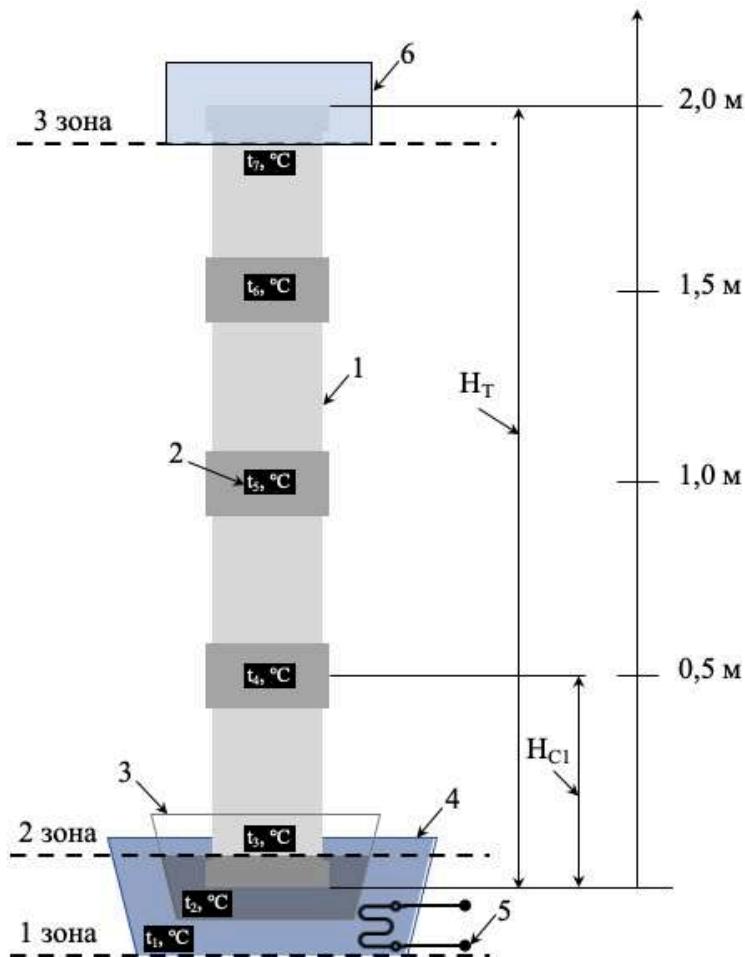


Рисунок 3.4 – Схема экспериментальной установки: 1 – термосифон с естественной циркуляцией; 2 – цифровые термометры; 3 – емкость с речным песком; 4 – емкость с подогреваемой водой; 5 – погружной спиральный кипятильник; 6 – емкость с сухим льдом; 1 зона – зона повышенного температурного потенциала; 2 зона – зона активного тепломассопереноса термосифона экспериментальной установки; 3 зона – зона пониженного температурного потенциала; H_T – высота экспериментальной установки (термосифона); H_{c1} – высота одной секции экспериментальной установки

Экспериментальная установка модели ГТЕЦ для четырех конфигураций представлена на рисунке 3.5.

а) $H_1=0,5$ мб) $H_2=1,0$ мв) $H_3=1,5$ мг) $H_4=2,0$ м

Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка в четырёх конфигурациях

Эксперимент проводился при нормальных условиях в лаборатории кафедры теплотехники и теплоэнергетики Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II [95].

3.3 Условия проведения эксперимента

Для исследования количества теплоты транспортируемой по ГТЕЦ использовались электронные термометры с выносным датчиком для измерения температуры воды, подогреваемая грунт, теплоносителя внутри установки и грунта.

Первый этап эксперимента проводился при следующих условиях: без разделителя сред восходящих и нисходящих потоков внутри установки; температура грунта поддерживалась при значениях от 40 °C до 70 °C с шагом 10 °C; длина установки ГТЕЦ от 0,5 м до 2,0 м с шагом 0,5 м; показания с цифровых термометров регистрировались с интервалом в 5 минут. Результаты первого этапа эксперимента представлены на рисунке 3.6. Разница температур, показанная на диаграммах, указывает перепад между зонами 2 и 3.

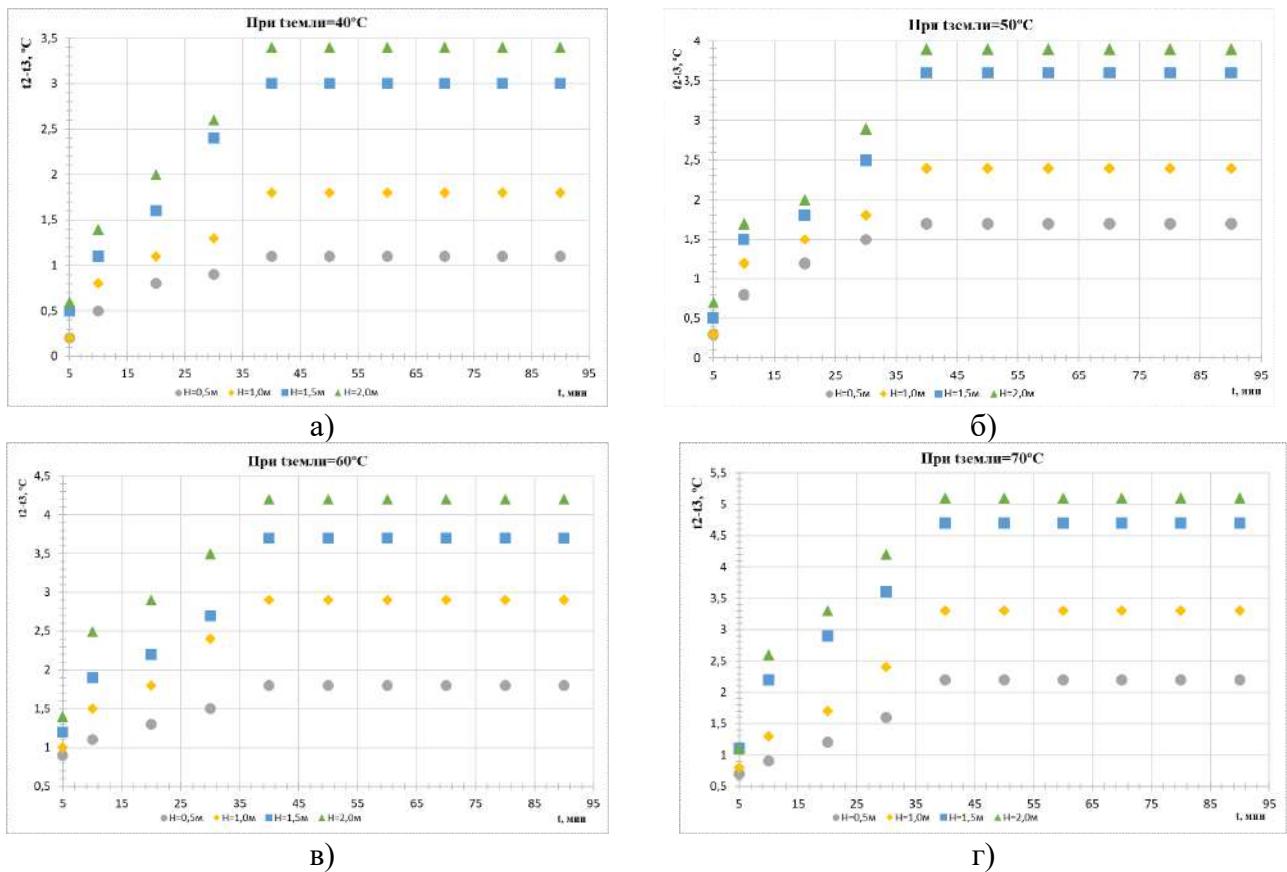


Рисунок 3.6 – Эксперимент с вариацией температур грунтового массива и высоты экспериментальной установки без разделителя сред:

- а) при температуре грунтового массива 40°C ; б) при температуре грунтового массива 50°C ; в) при температуре грунтового массива 60°C ; г) при температуре грунтового массива 70°C

Второй этап эксперимента проводился с исходными параметрами первого этапа, за исключением введения в модель конструктивного разделителя сред восходящих и нисходящих потоков внутри установки; температура грунта поддерживалась на заданных значениях для каждого режима и каждой из четырех конфигураций модели; показания с цифровых термометров регистрировались с

интервалом в 5 минут. Результаты второго этапа эксперимента представлены на рисунке 3.7. Разница температур, показанная на диаграммах, указывает перепад между зонами 2 и 3.

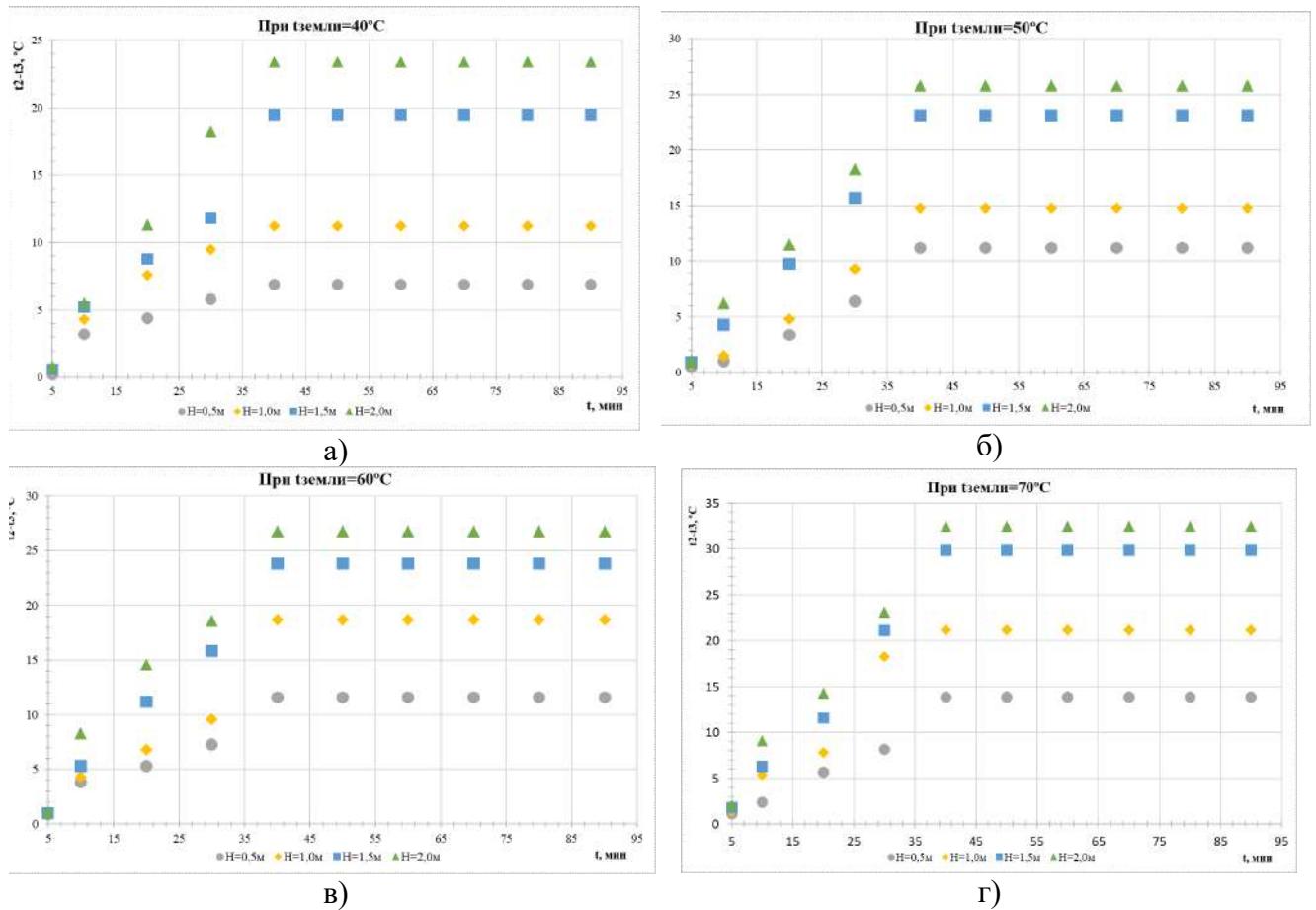


Рисунок 3.7 – Эксперимент с вариацией температур модели грунтового массива и высоты экспериментальной установки с разделителем сред:

- а) при температуре грунтового массива 40°C ; б) при температуре грунтового массива 50°C ; в) при температуре грунтового массива 60°C ; г) при температуре грунтового массива 70°C

Третий этап эксперимента проводился с исходными параметрами первого этапа, за исключением введения теплоизолированного слоя на разделителе сред восходящих и нисходящих потоков внутри установки; температура грунта поддерживалась на заданных значениях для каждого режима и каждой из четырех конфигураций модели; показания с цифровых термометров регистрировались с интервалом в 5 минут. Результаты второго этапа эксперимента представлены на

рисунке 3.8. Разница температур, показанная на диаграммах, указывает перепад между зонами 2 и 3.

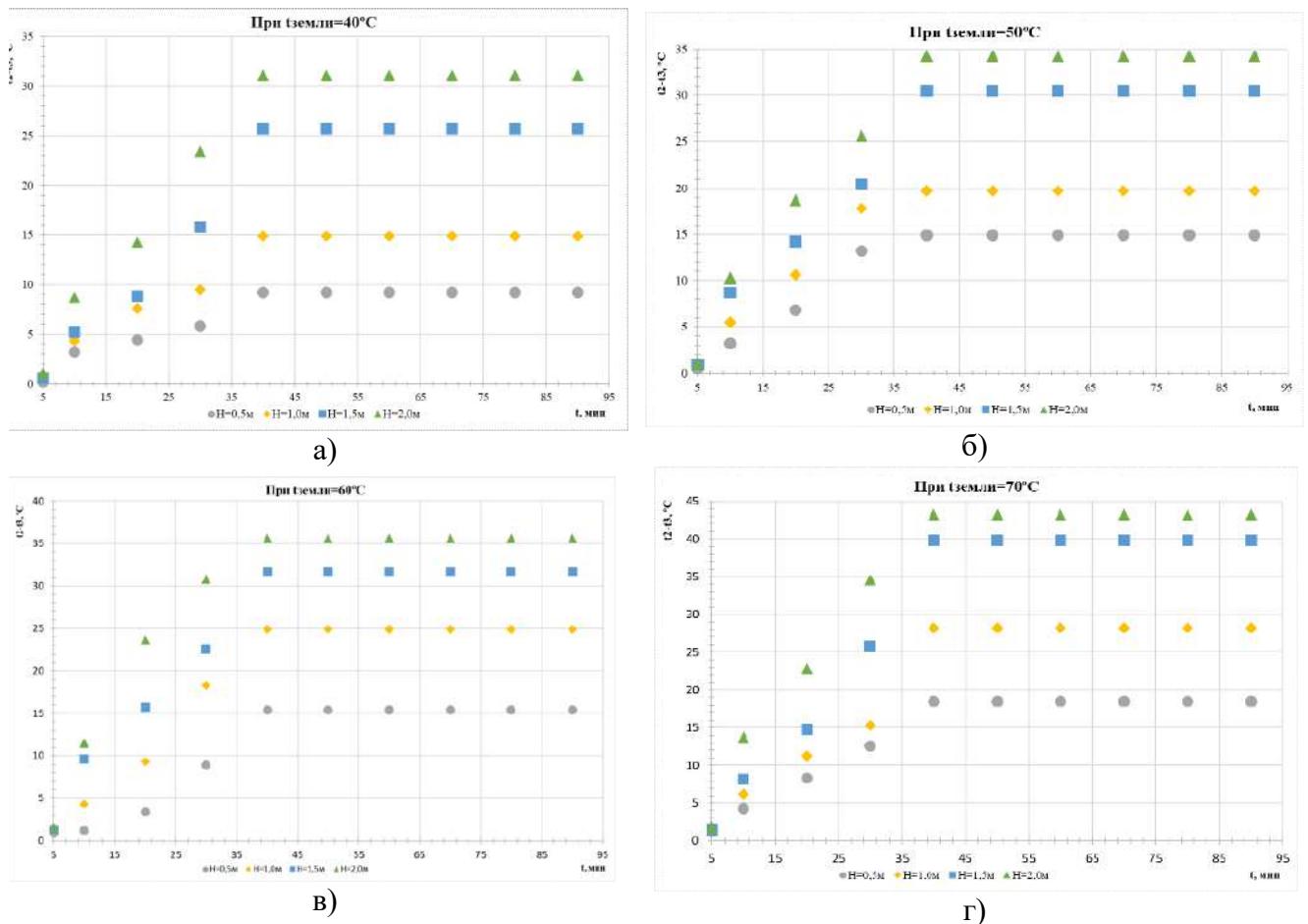


Рисунок 3.8 – Эксперимент с вариацией температур модели грунтового массива и высоты экспериментальной установки с теплоизолированным слоем на разделителе сред:

- а) при температуре грунтового массива 40°C ; б) при температуре грунтового массива 50°C ; в) при температуре грунтового массива 60°C ; г) при температуре грунтового массива 70°C

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, зафиксированы в соответствующих протоколах (Приложение Г). Для обеспечения достоверности результатов проведено три серии параллельных опытов в идентичных условиях.

В работе анализировалась величина теплового потока, транспортируемого с помощью геотермального термосифона с естественной циркуляцией (ГТЕЦ), в зависимости от конструктивных особенностей установки: базовой конфигурации без разделителя сред, модификации с разделителем сред и варианта с

теплоизолированным разделителем на разделителе сред. Дополнительными варьируемыми параметрами являлись температура грунта в диапазоне 40-70°C и длина ГТЕЦ от 0,5 до 2,0 метров. Полученные результаты систематизированы в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты проведения эксперимента:

Длина ГТЕЦ	Температура грунта 40 ° С			Температура грунта 50 ° С			Температура грунта 60 ° С			Температура грунта 70 ° С		
	Q б/p	Q с/p	Q т/p	Q б/p	Q с/p	Q т/p	Q б/p	Q с/p	Q т/p	Q б/p	Q с/p	Q т/p
0,5	1,149	1,381	1,421	1,543	1,864	1,918	1,897	2,286	2,352	2,288	2,751	2,831
1,0	0,743	0,892	0,918	0,983	1,180	1,214	1,225	1,476	1,519	1,466	1,766	1,817
1,5	0,589	0,710	0,730	0,771	0,929	0,955	0,945	1,138	1,171	1,144	1,376	1,416
2,0	0,488	0,591	0,608	0,635	0,768	0,790	0,782	0,942	0,969	0,943	1,135	1,167

Использование внутреннего разделителя сред позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 20 %, а использование теплоизолированного слоя на внутреннем разделителе сред с низким коэффициентом теплопроводности позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 10 %.

3.4 Методика обработки результатов эксперимента

Для проведенных опытов была выполнена проверка воспроизводимости. При условии доказанной линейности функции отклика количество уровней равно $p=2$ без потери точности моделирования. В этом случае двухуровневый факторный эксперимент, где для каждого фактора x_i определены две граничные точки вариации:

- минимальный $x_{1\min} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $x_{2\min} = 0,5 \text{ м}$;
- максимальный $x_{2\max} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $x_{2\min} = 2,0 \text{ м}$.

Следовательно, проверка воспроизводимости представлена для количества теплоты транспортируемая с помощью ГТЕЦ с теплоизолированным разделителем сред восходящих и нисходящих потоков при минимальном и максимальном уровне исходных данных представленные в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Снятие показания эксперимента при минимальном и максимальном уровне исходных данных

Вид ГТЕЦ	X ₁ t _{земли} , °C	X ₂ H _{ГТЕЦ} , м	Результаты параллельных опыты		
			1 опыт	2 опыт	3 опыт
			Q _{ГТЕЦ} , Вт	Q _{ГТЕЦ} , Вт	Q _{ГТЕЦ} , Вт
Теплоизолированный разделитель сред	70	0,5	2,831	2,830	2,833
Теплоизолированный разделитель сред	70	2,0	1,167	1,166	1,168
Теплоизолированный разделитель сред	40	0,5	1,421	1,420	1,422
Теплоизолированный разделитель сред	40	2,0	0,608	0,610	0,607

Для каждой серии параллельных опытов вычисляем среднее арифметическое значение функции отклика (3.10):

$$y_1 = \frac{1}{3} \cdot (2,831 + 2,830 + 2,833) = 2,831$$

$$y_2 = \frac{1}{3} \cdot (1,167 + 1,166 + 1,168) = 1,167$$

$$y_3 = \frac{1}{3} \cdot (1,421 + 1,420 + 1,422) = 1,421$$

$$y_4 = \frac{1}{3} \cdot (0,608 + 0,610 + 0,607) = 0,608$$

где k – число параллельных опытов, y_{ji} – значения параметров оптимизации i -м параллельном эксперименте j -й строки матрицы, N – число экспериментов.

Далее для каждой серии параллельных опытов вычисляют оценку дисперсии (3.11):

$$S_1^2 = \frac{1}{3-1} \cdot (2,831 - 2,831)^2 + (2,830 - 2,831)^2 + (2,833 - 2,831)^2 \\ = 0,00000233$$

$$S_2^2 = \frac{1}{3-1} \cdot (1,167 - 1,167)^2 + (1,166 - 1,167)^2 + (1,168 - 1,167)^2 \\ = 0,00000100$$

$$S_3^2 = \frac{1}{3-1} \cdot (1,421 - 1,421)^2 + (1,420 - 1,421)^2 + (1,422 - 1,421)^2 \\ = 0,00000100$$

$$S_3^2 = \frac{1}{3-1} \cdot (0,608 - 0,608)^2 + (0,610 - 0,608)^2 + (0,607 - 0,608)^2 \\ = 0,00000233$$

Так как результаты опытов являются величинами случайными, то значения функции цели в параллельных опытах в общем случае будут различными.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. – Результаты оценки дисперсии:

№ опыта	Факторы		Среднее значение функции отклика	Оценка дисперсии
	x_1	x_2	y_i	S_j^2
1	70	0,5	2,831	0,00000233
2	70	2,0	1,167	0,00000100
3	40	0,5	1,421	0,00000100
4	40	2,0	0,608	0,00000233

Далее определяем расчетное значение числа Кохрана G_p – критерий проверки воспроизводимости эксперимента, для этого находят максимальную из оценок дисперсии $\max S_j^2$ и относится к сумме S_j^2 (3.12):

$$G_p = \frac{0,00000233}{(0,00000233+0,00000100+0,00000100+0,00000233)} = 0,350$$

Теоретические значения критерия Кохрана приведены в статистической таблице Приложение Д. Для нахождения G_T необходимо знать общее количество оценок дисперсий $N=4$ и число степеней свободы f , связанной с каждой из них, причем $f=3-1=2$, следовательно $G_T=0,768$. Проверяем условия воспроизводимости (3.13):

$$G_p \leq G_T$$

$$0,350 \leq 0,768$$

Опыты считаются воспроизводимыми, а ряд дисперсий – однородным.

Метод планирования эксперимента для двухфакторного эксперимента показал, что оптимальное количество экспериментов для выявления зависимости транспортируемой геотермальной энергии с помощью ГТЕЦ по (3.4) $N = 2^2 = 4$.

На следующим этапе планирования эксперимента необходимо выбрать область определения факторов x_i . Так как факторы независимы, пусть каждому фактору соответствует координатная ось. Нижний и верхний уровень соответствует минимальному и максимальному уровню области действия факторов.

Для построения аппроксимирующей функции достаточно выбрать основной (нулевой) уровень – середина диапазона и интервал варьирования управляющего параметра x_i .

Интервал варьирования факторов определяется по формуле (3.5):

$$\Delta x_1 = \frac{70 - 40}{2} = 15$$

$$\Delta x_2 = \frac{2,0 - 0,5}{2} = 0,75$$

Основной уровень определяется, как среднее значение (3.6):

$$x_{10} = \frac{70 + 40}{2} = 55$$

$$x_{20} = \frac{2,0 + 0,5}{2} = 1,25$$

Для нормализации факторов, т.е. для перевода факторов в стандартизованный масштаб или к безразмерной шкале необходимо применить формулу (3.7):

$$X_1 = \frac{70 - 55}{15} = 1$$

$$X_2 = \frac{40 - 55}{15} = -1$$

$$X_1 = \frac{2 - 0,75}{1,25} = 1$$

$$X_2 = \frac{0,5 - 0,75}{1,25} = -1$$

Таким образом, для переменной X_i в стандартизованном масштабе начало координат совмещено с центром эксперимента, а в качестве единицы измерения используется шаг варьирования фактора. В кодированном виде верхний уровень любого фактора имеет значение +1, нижний – –1, основной – 0.

Результаты конечных результатов должны представлены в таблице 3.6:

Таблица 3.6 – Результаты конечных результатов:

Уровни факторов	Наименование и обозначение факторов		Кодированные значения факторов	
	Фактор – X_1	Фактор – X_2	X_1	X_2
Интервал варьирования	15	0,75	1	1
Верхний уровень	70	2,0	+1	+1
Нижний уровень	40	0,5	-1	-1
Основной уровень	55	1,25	0	0

Для полного двухфакторного эксперимента уравнение линейной регрессии имеет вид (3.8):

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2$$

Коэффициенты регрессии определяются по уравнению (3.9) с использованием кодированных переменных из таблицы 3.2:

$$b_0 = \frac{(+1) \cdot 2,831 + (+1) \cdot 1,167 + (+1) \cdot 1,421 + (+1) \cdot 0,608}{4} = 1,507$$

$$b_1 = \frac{(+1) \cdot 2,831 + (+1) \cdot 1,167 + (-1) \cdot 1,421 + (-1) \cdot 0,608}{4} = 0,492$$

$$b_2 = \frac{(-1) \cdot 2,831 + (+1) \cdot 1,167 + (-1) \cdot 1,421 + (+1) \cdot 0,608}{4} = -0,619$$

$$b_{12}$$

$$= \frac{(+1) \cdot (-1) \cdot 2,831 + (+1) \cdot (+1) \cdot 1,167 + (-1) \cdot (-1) \cdot 1,421 + (-1) \cdot (+1) \cdot 0,608}{4}$$

$$= -0,213$$

Уравнение (3.8) представляет собой регрессионную модель процесса в кодированных переменных:

$$y_i = 1,507 + 0,492 \cdot X_1 - 0,619 \cdot X_2 - 0,213 \cdot X_1 \cdot X_2$$

Для перехода от кодированных факторов (X_i) к физическим переменным (x_i) необходимо выполнить обратное преобразование, в результате чего регрессионная модель в натуральных величинах принимает вид:

$$y_i = 1,507 + 0,492 \cdot x_1 - 0,619 \cdot x_2 - 0,213 \cdot x_1 \cdot x_2$$

где $x_i = x_{i0} + \Delta x_i \cdot X_i$ – физические факторы переменной температуры земли/длины экспериментальной модели.

Результат математического моделирования и полученной регрессионной модели процесса трансфера тепловой энергии с помощью ГТЕЦ отражен на рисунке 3.9.

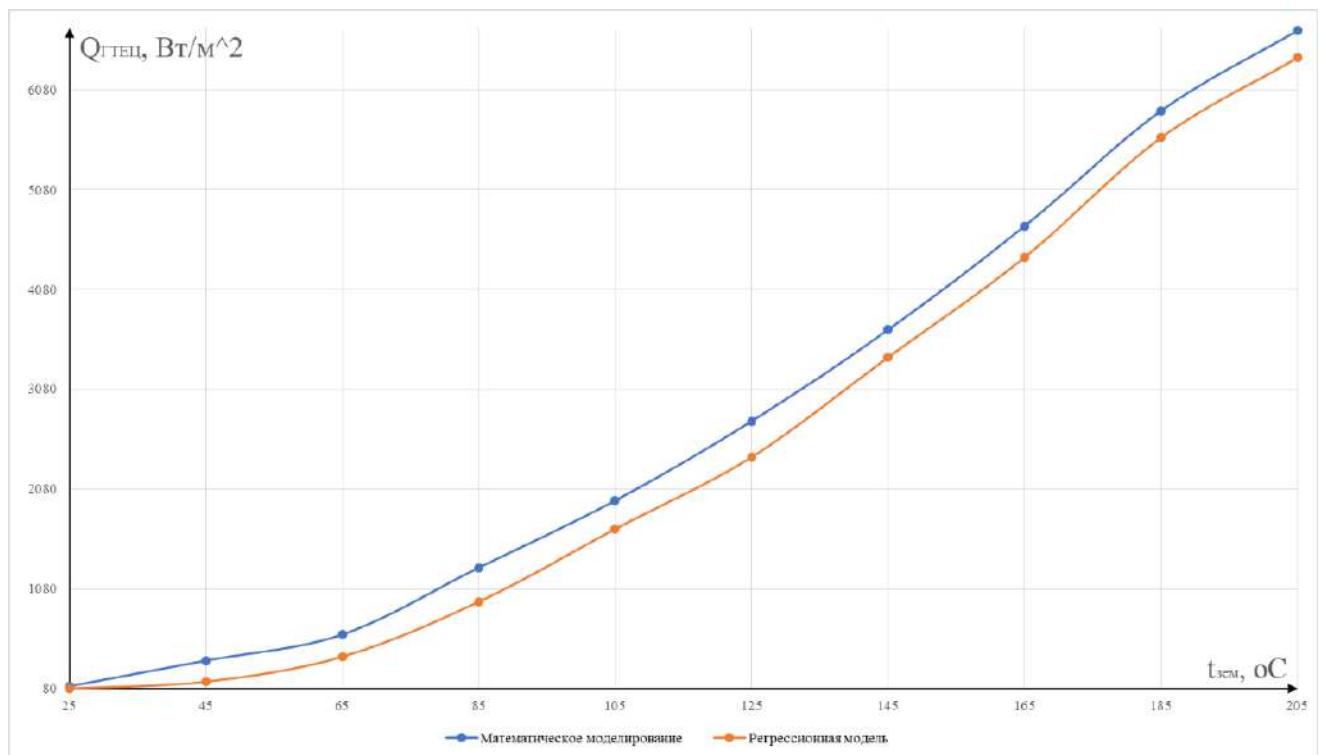


Рисунок 3.9 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры

Выявленные отклонения между расчётными и экспериментальными кривыми обусловлены неучтёнными факторами, включая градиент температуры грунта по длине модели. Тем не менее, полученные функциональные зависимости демонстрируют статистически значимую согласованность, что позволяет считать математическую модель адекватной, а результаты эксперимента – достоверными.

3.5 Выводы по третьей главе

По результату проведения экспериментального исследования эффективности геотермального термосифона с естественной циркуляцией были сделаны следующие выводы:

1. Разработанная методика экспериментальных исследований основана на принципах теории планирования эксперимента, рассматривающей систему как "черный ящик". Такой подход позволил установить статистические зависимости между управляющими параметрами (температура грунта и длина установки) и выходными характеристиками (изменение температуры теплоносителя) без детального анализа внутренних механизмов процесса;
2. Для построения регрессионной модели использован метод полного факторного эксперимента (ПФЭ) с линейной аппроксимацией, включающей парные взаимодействия факторов. Разработано уравнение регрессии (3.2) с коэффициентами, определяемыми экспериментальным путем (3.3), что обеспечило адекватное описание процесса теплопереноса;
3. Разработана оптимизированная структура эксперимента, состоящая из примененного двухуровневого факторного эксперимента с минимальным количеством опытов ($N=4$ для двух факторов), системы кодирования факторов с нормировкой к безразмерному виду, состоящая из граничных условий: температура грунта и длины установки ГТЕЦ;
4. Предложена методика проверки воспроизводимости эксперимента с использованием трехкратного повторения опытов, критерия Кохрана для оценки однородности дисперсий, статистической обработки результатов;
5. Регрессионная модель продемонстрировала высокую точность предсказания (погрешность $<0.35\%$), что подтверждено сопоставлением расчетных и экспериментальных данных;
6. Разработанная методика позволяет минимизировать количество необходимых экспериментов, обеспечить статистическую достоверность результатов, оптимизировать параметры геотермальных термосифонов, создать основу для дальнейших исследований более сложных моделей.

7. Использование внутреннего разделителя сред позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 20 %, а использование теплоизолированного слоя на внутреннем разделителе сред с низким коэффициентом теплопроводности позволяет увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией не менее чем на 10 %.

Полученные результаты создают теоретическую базу для экспериментального исследования эффективности различных конструктивных решений ГТЕЦ, представленных в последующих разделах работы.

ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

4.1 Технико-экономическое обоснование использования ГТЕЦ

Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией на основе погружной скважины использует разницу температур между глубинными слоями земли и поверхностью для передачи тепла без применения циркуляционных насосов. В данной системе теплоноситель (вода) циркулирует за счет естественной циркуляции, что минимизирует эксплуатационные затраты [75, 93].

Для реализации проекта необходимо сделать прогноз продаж производства тепловой энергии с помощью альтернативного источника геотермальной энергии – геотермального термосифона с принудительной циркуляцией. Прогноз продаж производства – это энергоресурс, который будет производиться альтернативным источником теплоты в течении 10-и лет по годам [102, 124].

Для более точного технико-экономического обоснования использования геотермального термосифона с естественной и принудительной циркуляцией необходимо исследовать тарифный план на покупку электрической тепловой энергии в планируемом регионе внедрения предложенных технологий.

Наиболееrationально-рассматриваемый регион для реализации – Дальний восток России. Дальний Восток обладает значительным потенциалом для развития геотермальной энергетики благодаря уникальным природным условиям, особенно в районах вулканической активности. Этот регион, включающий Камчатку, Курильские острова и Сахалин, уже демонстрирует успешные примеры использования геотермальных ресурсов, а дальнейшее их освоение может существенно улучшить энергоснабжение удаленных территорий. Наибольшие запасы геотермальной энергии сосредоточены на Камчатке, где уже действуют Мутновская и Паужетская геотермальные электростанции. Эти объекты обеспечивают значительную часть энергопотребления региона, снижая зависимость от дорогостоящего привозного топлива [101].

Курильские острова (особенно Итуруп и Кунашир) также обладают высокотемпературными источниками, пригодными для генерации электроэнергии. На

Сахалине и в Приморье преобладают низко- и среднетемпературные ресурсы, которые можно использовать для отопления и теплоснабжения населённых пунктов [1].

Геотермальная энергетика может стать одним из ключевых элементов энергосистемы Дальнего Востока, обеспечивая стабильное и экологически чистое энергоснабжение удалённых регионов. Однако для реализации этого потенциала необходимы государственная поддержка, привлечение частных инвестиций и развитие соответствующих технологий. При должном внимании геотермальные источники способны значительно снизить энергодефицит и повысить качество жизни в регионе.

На Дальнем Востоке действуют особые условия из-за изолированных энергосистем и высоких затрат на генерацию.

Тарифы на электроэнергию [67-68]:

- для населения средний тариф: ~3,00–5,50 руб./кВт·ч (может быть ниже в зонах децентрализованного снабжения);
- для предприятий и организаций: зависит от мощности и напряжения: 4,00–12,00 руб./кВт·ч.

Существуют льготные тарифы в некоторых районах в Якутии, на Камчатке, в Магаданской области представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Тариф на электроэнергию для населения и предприятий Дальнего Востока

Регион	Тариф для населения, руб./кВт·ч	Тариф для предприятий и организаций, руб./кВт·ч
Приморский край	3,50–4,80	5,00–9,00
Хабаровский край	3,80–5,20	5,50–10,00
Камчатский край	4,20–5,50	6,00–12,00
Сахалинская обл.	3,90–5,30	5,80–11,00
Республика Саха (Якутия)	3,20–5,00	4,50–10,00

Тариф на тепловую энергию зависит от способа генерации (ТЭЦ, котельные) и местных нормативов.

Тарифы на тепловую энергию [99-100]:

- для населения: средний тариф: 1 500–3 500 руб./Гкал (в северных районах Чукотка и Якутия может быть выше);

- для предприятий: 2 000–5 000 руб./Гкал (может доходить до 7 000 руб./Гкал в отдаленных районах).

Прогнозирование объемов продаж тепловой энергии выполнено для энергетической системы, включающей несколько газотурбинных энергоцентров (ГТЭЦ) суммарной мощностью 5 кВт, при средневзвешенном тарифе на теплоэнергию в целевом регионе, составляющем 3 500 руб./Гкал. Капитальные затраты на реализацию проекта оцениваются в 10 000 тыс. руб. (без НДС).

Для проведения сравнительного анализа экономической эффективности производства тепловой энергии с использованием альтернативного источника – геотермального термосифона с принудительной циркуляцией (далее – ГТПЦ) – и ГТЭЦ, необходимо выполнить аналогичный расчет прогноза продаж с учетом следующих факторов [44, 106]:

- затраты на электроэнергию для обеспечения работы вспомогательного оборудования;
- эксплуатационные расходы в течение первого и последующих лет.

Капитальные вложения при внедрении геотермальных термосифонов с принудительной циркуляцией составляют 15 000 тыс. руб.

Прогнозные значения объемов продаж тепловой энергии, генерируемой двумя методами, с учетом дисконтирования денежных потоков в период с 2026 по 2035 год представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Прогноз продаж тепловой энергии

Продукт (услуга)	Прогноз продаж, тыс. руб.									
	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Тепловая энергия ГТЭЦ	686,7	727,8	771,5	810,1	850,6	893,2	928,9	966,0	1004,7	1044,9
Тепловая энергия ГТПЦ	618,0	655,0	694,4	729,1	765,5	803,9	836,0	869,4	904,2	940,4

Экономическая эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией составляет 10 %.

Срок окупаемости внедрения ГТЭЦ определен на основе расчета чистого дисконтированного дохода (далее – ЧДД), динамика которого представлена на рисунке 4.1. Графическая интерпретация включает две кривые, отражающие изменение чистого и

дисконтированного дохода в течение жизненного цикла проекта. Согласно проведенным расчетам, срок окупаемости системы с учетом ЧДД составляет 4 года.

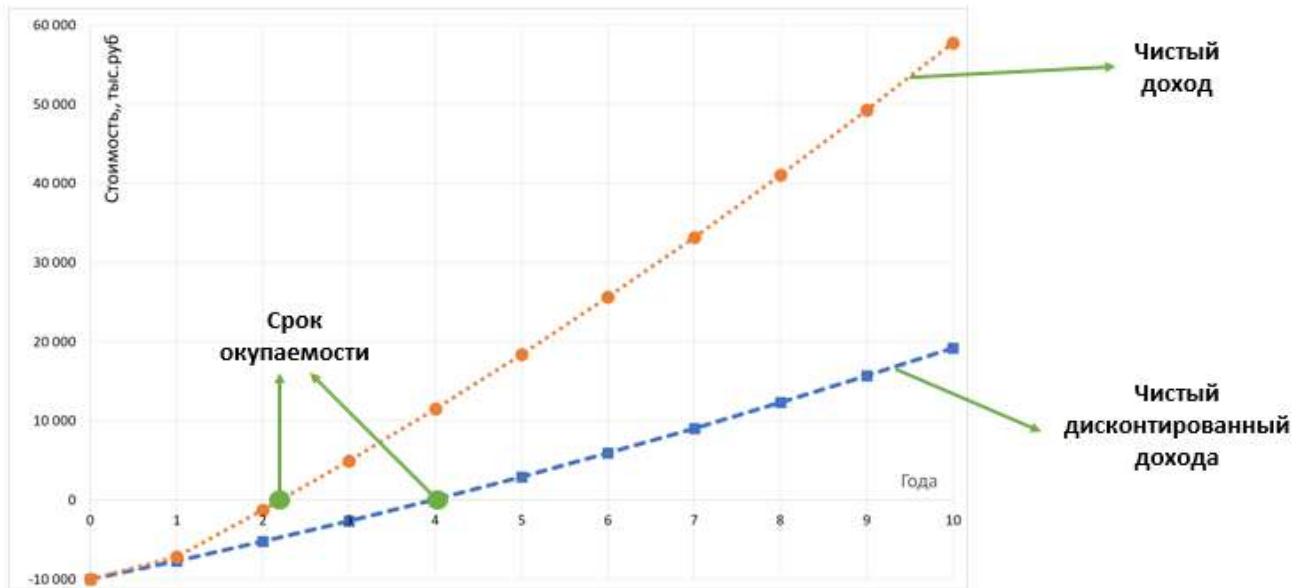


Рисунок 4.1 – График изменения чистого и дисконтированного дохода при внедрении ГТЕЦ

4.2 Применение ГТЕЦ в промышленности

В настоящее время существуют методы по снижению тепловых потерь нефтепровода с использованием геотермальной энергии с помощью трубопроводов-спутников [53, 69]. Данный метод направлен на обогрев участков, где снижается скорость перекачки нефти, а именно устье скважины, температурные компенсаторы, запорная арматура и повороты трубопровода, с использованием теплового насоса, что не позволяет обогревать нефть по всей длине прокладки магистрали [89, 109, 115].

Технология обогрева с помощью геотермальной энергии применяют для подогрева верхнего ствола скважины, в которой колонна полых насосных штанг используется как гравитационная тепловая труба, способная аккумулировать и передавать геотермальную энергию для обогрева верхней части ствола скважины [91, 116].

На основе данного анализа была предложена и разработана система, которая осуществляет забор тепла от грунта с помощью термосифона с естественной циркуляции (рисунок 4.2).

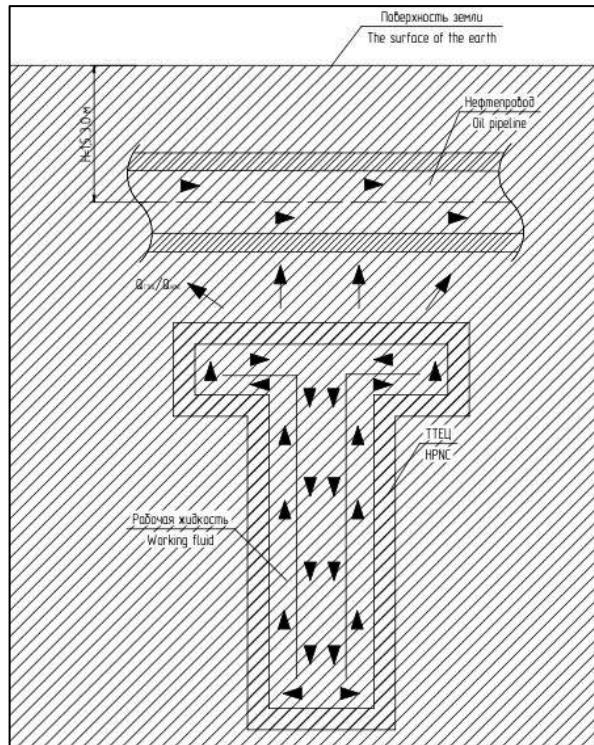


Рисунок 4.2 – Применение ГТЕЦ для поддержания температуры нефтепровода

Данный метод относится к активному методу воздействия на образование парафина в нефтепроводе. ГТЕЦ будет переносить теплоту из глубины земли к подземному нефтепроводу за счет естественной циркуляции рабочей жидкости – воды внутри конструкции [130]. Данная конструкция состоит из двух основных частей: вертикальной, где производится сбор теплоты и горизонтальной, где осуществляется теплоперенос. Данный метод позволит равномерно распределить теплоту по всей длине трубопровода и уменьшить тепловые потери магистрального нефтепровода до 30%.

Основной фактор, который будет влиять на температуры рабочего тела (вода), имеет прямую зависимость от геотермической ступени. Геотермическая ступень, в свою очередь – увеличение глубины в земной каре (в метрах), соответствует повышению температуры в горных породах на 1 °C. В основном геотермическая ступень по России определяется от 5 до 170 м/°C, что указывает на содержание тепловых ресурсов температурой от 35 до 350°C [131].

Таблица 4.2 – Изменение температуры с глубиной в разных регионах

Область	Геотермическая ступень, м/°С
Крым, Кавказ	20-50
Камчатка, Курильские острова	5-33
Урал, Алтай	30-70
Русская, Западно-Сибирская, Восточно-Сибирская платформа	30-100
Балтийский щит	100-170

Использование метода снижения вязкости нефти с помощью трубы с естественной циркуляцией теплого тела, которое повышает свою температуру с помощью геотермальной энергии, Земли имеют большой потенциал, в особенности на Камчатке и Курильских островах, а также в области Крыма и Кавказа [55, 112].

4.2 Выводы по четвертой главе

По результату проведенного технико-экономического обоснования геотермального термосифона с естественной циркуляцией были сделаны следующие выводы:

1. Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией демонстрирует значительные преимущества за счет минимизации эксплуатационных затрат благодаря отсутствию необходимости в циркуляционных насосах. Прогноз продаж тепловой энергии на 10 лет показывает устойчивый рост доходов, а экономическая эффективность проекта составляет 10%, что подтверждает его рентабельность.

2. Срок окупаемости внедрения ГТЕЦ с учетом чистого дисконтированного дохода составляет 4 года.

3. Дальний Восток, особенно Камчатка, Курильские острова и Сахалин, обладает высоким потенциалом для развития геотермальной энергетики. Уже действующие геотермальные станции (Мутновская, Паужетская) доказывают эффективность использования таких технологий. Регион особенно выигрывает от внедрения ГТЕЦ из-за высоких тарифов на электро- и тепловую энергию и зависимости от привозного топлива.

4. Использование геотермальных источников позволяет снизить энергodeficit в удаленных районах, обеспечивая стабильное и экологически чистое энергоснабжение. Это особенно важно для регионов с изолированными энергосистемами.

5. Технология ГТЕЦ может эффективно использоваться для поддержания температуры нефтепроводов, предотвращая парафинизацию и снижая теплопотери. Метод с ГТЕЦ позволяет равномерно распределять тепло вдоль магистрали, что особенно актуально для регионов с высокой геотермальной активностью (Камчатка, Курилы, Кавказ).

6. Для успешной реализации проектов на основе ГТЕЦ требуется государственная поддержка, привлечение частных инвестиций и дальнейшее развитие технологий. Это позволит масштабировать использование геотермальной энергии, снижая затраты на энергообеспечение и повышая качество жизни в отдаленных регионах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование было направлено на разработку технических и технологических решений, повышающих эффективность передачи тепловой энергии с использованием геотермальных термосифонов с естественной циркуляцией рабочего тела (ГТЕЦ). В ходе работы решены следующие задачи:

1. Разработаны конструктивные усовершенствования для повышения энергоэффективности ГТЕЦ, включая:
 - теплоизолированный разделитель потоков,
 - направляющую воронку,
 - высокопроводящие концевые крышки (медь, алюминий).
 Данные решения позволили снизить теплопотери и увеличить эффективность теплопереноса на 20–30%.
2. Создана математическая модель тепломассообмена в ГТЕЦ, учитывающая:
 - гидродинамические процессы,
 - геотермические особенности (ступень 5–170 м/°C).
 Установлено, что вода является оптимальным теплоносителем благодаря высокой теплоемкости, экологичности и экономичности.
3. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие высокую точность разработанной модели (погрешность <0,35%). Методика, основанная на полном факторном эксперименте, позволила минимизировать количество опытов при сохранении статистической достоверности. Выведена регрессионная модель трансфера тепловой энергии помощью ГТЕЦ.
4. Выполнено технико-экономическое обоснование, показавшее:
 - Экономическую эффективность (10% рентабельности) за счет снижения эксплуатационных затрат.
 - Перспективность внедрения на Дальнем Востоке (Камчатка, Курилы, Сахалин) благодаря высоким тарифам на энергию и наличию геотермальных ресурсов.

- Потенциал применения в нефтяной промышленности для поддержания температуры нефтепроводов и предотвращения парафинизации.

Основные выводы:

- Внедрение предложенных конструктивных решений и математической модели позволяет существенно повысить энергетическую эффективность до 30% геотермальных термосифонов естественной циркуляцией.
- ГТЕЦ демонстрирует высокую экономическую и экологическую эффективность, особенно в энергодефицитных регионах.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило перспективность использования ГТЕЦ в энергетике и промышленности. Дальнейшие работы могут быть направлены на оптимизацию конструкции для различных климатических условий и интеграцию в существующие энергосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. А., Акатьев В. А., Тюрин М. П., Бородина Е. С., Седляров О. И. Аналитическое исследование теплообмена при нагреве или охлаждении лимитированного объема жидкости // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. №6 (99).
2. Алексеенко С.В. Перспективы развития геотермальной энергетики / IV Международный конгресс REENCON – XXI Возобновляемая энергетика — XXI век: энергетическая и экономическая эффективность г. Москва, 5–6 июня 2018 г.
3. Амер Ахмед Э. А. А. Повышение эффективности систем аккумулирования теплоты в солнечных системах теплоснабжения республики Египет [Электронный ресурс] / Э. А. А. Амер Ахмед; науч. рук. В.А. Лебедев; Горный университет. – М., 2021. – 183 с. URL: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/sciens/dissertacii/2021/amer_akhmed_elsayed_abdelkafi_abdelaal_disertaciya.pdf (дата обращения: 15.12.2024).
4. Анализ перспектив развития геотермальной энергетики / Б. А. Соловьев, А. С. Бодылев, А. Д. Павлов, И. Д. Каекбирдина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 117-124. – DOI 10.17122/1999-5458-2023-19-1-117-124. – EDN VREDLK.
5. Аналитическое исследование теплообмена при нагреве или охлаждении лимитированного объема жидкости / А. А. Александров, В. А. Акатьев, М. П. Тюрин [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. – 2021. – № 6(99). – С. 17-34. – DOI 10.18698/1812-3368-2021-6-17-34. – EDN AKMMZI.
6. Анчита Хорхе. Технология HYDRO-IMP для переработки тяжелой нефти // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 229-234.
7. Базыкин А.Н. Совершенствование методов расчета устойчивости откосов при строительстве магистральных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.23.02 "Основания и фундаменты, подземные сооружения" / А.Н.

- Базыкин; ФГБОУ ВО "Государственный строительный университет". — Москва, 2022. — 187 с. — URL: https://cchgeu.ru/science/dissertations/sovety/dissertations/sovet-24-2-286-07/Диссертация_Базыкин.pdf (дата обращения: 23.06.2025).
8. Баранова А. Ф., Дмитриев Ю. А., Ерлыгина Е. Г. и др. Эколого-экономические аспекты устойчивого развития региона. Нижневартовск: Наука и практика, 2021. 150 с. <https://doi.org/10.33619/pcps2021-06>.
 9. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В.С.Литвиненко, П.С.Цветков, М.В.Двойников, Г.В.Буслаев // Записки Горного института. 2020. Т.244. С.428-438. DOI:10.31897/ PMI.2020.4.5.
 - 10.Белан С.И., Бадавов Г.Б., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и потенциала использования возобновляемых источников энергии в россии // ГИАБ. 2021. №3-1.
 - 11.Белова Т.П. Исследование сорбции лития катионитом КУ-2-8 из модельных растворов, имитирующих геотермальные теплоносители в динамическом режиме / Т.П.Белова, Т.И.Ратчина // Записки Горного института. 2020. Т.242. С.197-201. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.197.
 - 12.Березюк, В. И. Экологическое аудирование как вид предпринимательской деятельности / В. И. Березюк, А. О. Бек, Н. Н. Пара-соцкая // Аудитор. – 2019. – № 6. – С. 22–30.
 - 13.Богоуславский Э.И. Тепломассообмен в приповерхностных геотермальных системах / Э. И. Богуславский, Н. Н. Смирнова, С.В. Егоров // Записки Горного института. 2010. Т.187. С. 24-28.
 - 14.Богуславский Э. И., Фицак В. В. Технология и экономика освоения приповерхностных геотермальных ресурсов // Записки Горного института. 2017. №..

- 15.Богуславский Э.И. Оценка количественных показателей ресурсов приповерхностной геотермальной энергии по регионам России и разработка карт перспективных ресурсов для различных глубин на примере одного из регионов / Э.И. Богуславский, А. А. Смыслов, А. Б. Вайнблат, Н. Н. Смирнова, С. В. Егоров // Отчет о научно-исследовательской работе. Фонды СПГГИ (ТУ), 2006.
- 16.Богуславский Э.И. Технология и экономика освоения приповерхностных геотермальных ресурсов / Э. И. Богуславский, В. В. Фицак // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 189-198. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.189.
- 17.Борзенко Е.И. Исследование течения вязкой жидкости в Т-образном канале с условиями прилипание – скольжение на твердой стенке / Е.И. Борзенко, А.О. Дьякова // Вестник томского государственного университета, 2016. №4. С. 44-56.
- 18.Борщев Н.О. Тепловая математическая модель двухфазного контура с механическим насосом и тепловым гидроаккумулятором // Известия вузов. Машиностроение. 2023. №2 (755).
- 19.Бояршинова, А.К. Теория инженерного эксперимента: текст лекций/А.К. Бояршинова, А.С. Фишер. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 85 с.
- 20.Бутузов В. А. Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // Окружающая среда и энерговедение. 2019. №3.
- 21.Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Шаповалов А.В., Родин А.В., Олехнович В.А., Драгун Л.А., Артиух А.А., Лапко В.С., Кидун Н.М. Термосифоны и тепловые трубы в системах для использования низкопотенциального тепла // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2019. №2 (77).
- 22.Васильева М.А. Исследование полимерного материала рабочей камеры-канала магнитного насоса для перекачивания тяжелых нефей / М.А.Васильева, С.Фёйт // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.651-654.

23. Войтович А.В. Истощение запасов. Перспектива битуминозной нефти / А.В. Войтович, Альмендингер Т.И. // Булатовские чтения. Том 1. 2017. С. 39-41.
24. Говорушко С. М. ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ // АЭЭ. 2011. №4.
25. Голдобина Л.А. Снижение последствий техногенных катастроф при эксплуатации подземных трубопроводов внедрением методики определения мест межкристаллитной коррозии / Л.А. Голдобина, П.С. Орлов // Научно-технический журнал НИИТТС «Технико-технологические проблемы сервиса». 2010. №. 4 (14). С.18-25.
26. Горина, О. Л. Моделирование тепловых процессов в паровых котлах при использовании водородного топлива / О. Л. Горина // Математическое моделирование в теплоэнергетике : Молодежная научная конференция. Сборник докладов, Москва, 12 апреля 2023 года. – Москва: Открытое акционерное общество "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт", 2023. – С. 32-37. – EDN ZTIWDW.
27. ГОСТ Р 55004-2012. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации [Текст]. — Введ. 2013-01-01. — М.: Стандартинформ, 2012. — IV, 12 с.
28. ГОСТ Р 58176-2018. Композитные полимерные материалы. Методы испытаний на стойкость к климатическим воздействиям [Текст]. — Введ. 2019-07-01. — М.: Стандартинформ, 2018. — 24 с.
29. Дамдинов Б. Б., Митыпов Ч. М. Исследования коэффициента трения. Вывод аналитического уравнения диаграммы Герси-Штрибека // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2022. №7. С. 835-849.
30. Дегтярев Алексей Евгеньевич, Дегтярева Кристина Юрьевна Технико-экономическое обоснование проекта: суть и структура // StudNet. 2020. №2.

31. Егоров А.С., Большая Н.В., Калинин Д.Ф., Агеев А.С. Глубинное строение, тектоника и геодинамика Охотоморского региона и структур его складчатого обрамления // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 703-719. DOI: 10.31897/PMI.2022.63.
32. Епифанов А.А., Дымо Б.В., Долганов Ю.А., Анастасенко С.Н. Экспериментальное исследование двухфазных закрытых термосифонов для экономайзеров котлов // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 2(46). – С. 65-78. – DOI 10.5281/zenodo.3898239. – EDN BMKDXS.
33. Ершов М.А., Муллакаев М.С., Баранов Д.А. Снижение вязкости нефти с применением ультразвуковой обработки и химических реагентов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 4. С. 2226.
34. Задорожная, Е. А. Теория планирования эксперимента : Учебное пособие / Е. А. Задорожная ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Политехнический институт, Кафедра «Автомобильный транспорт». – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 92 с. – EDN DMGOGO.
35. Зеньков С.А. Анализ возможного повышения производительности экскаваторов при устранении адгезии грунта к ковшу / С.А. Зеньков, Н.А. Балахонов, К.А. Игнатьев // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 98-104.
36. Зеньков С.А. Планирование эксперимента по исследованию влияния параметров теплового воздействия на сопротивление сдвигу грунта / С.А. Зеньков, Р.А. Диппель, К.В. Булаев, А.А. Батуро // Механики XXI веку. 2005. № 4. С. 52-56.
37. Зеньков С.А. Применение оборудования теплового воздействия для снижения адгезии грунтов / С.А. Зеньков, В.В. Жидовкин, А.Н. Ничаев, Е.В. Курмашев // Механики XXI веку. 2010. № 9. С. 129-132.

- 38.Зимин Р. Ю. Применение преобразователей на постоянном и переменном токе в автономных системах электроснабжения на основе ветрогенераторов в условиях арктического шельфа / Р. Ю. Зимин, С. Л. Сержан, Д. В. Малеванный // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 6. – С. 69-87. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_6_0_69. – EDN IPJXJB.
- 39.Карабарин Д. И. Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла ренкина / Д. И. Карабарин, С. А. Михайленко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 11, № 7. – С. 867-876. – DOI 10.17516/1999-494X-0101. – EDN YPMTCP.
- 40.Кванина, В. В. Экологический аудит: анализ, проблемы и перспективы / В. В. Кванина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Право». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 33–45. DOI: 10.14529/law200106.
- 41.Кирюхин А В., Бергаль-кувиас О В., Лемзиков М В., Журавлев Н Б. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации // Записки Горного института. 2023. №263;
- 42.Костенко С. А. Применение энергосберегающей геотермальной термостабилизации дорожного полотна на транспортных развязках, эстакадах и автостоянках аэропортов / С. А. Костенко // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 10. – С. 102-109. – EDN LJTXTS.
- 43.Кошелев С. В., Сластихин Ю. Н., Ейдеюс А. И. Сравнительные расчеты коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов в трубах // Вестник MAX. 2020. №2.
- 44.Крутеева О. В., Лепилина В. В. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ НОВОГО БИЗНЕСА // Интерэспо ГеоСибирь. 2022.

- 45.Куликова Е.Ю., Полянкин А.Г., Потокина А.М. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 895-905. EDN DGEAGK.
- 46.Лебедев В. А. Моделирование работы геотермальной установки с естественной циркуляцией различных теплоносителей / В. А. Лебедев, А. Н. **Федоткина**, И. В. Соловьев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 2. – С. 54-58. – EDN SYKTPW.
- 47.Лебедев В.А., Федоткина А.Н. Классификация технологий по извлечению геотермальной теплоты. Горная промышленность. 2025;(2):176–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-176-183>.
- 48.Лебедев, В. А. Анализ методов снижения вязкости нефти и их сравнение с методом использования тепловой трубы с естественной циркуляцией / В. А. Лебедев, А. Н. **Федоткина** // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 4. – С. 40-44. – EDN BSVVJK.
- 49.Максимов В. И., Нурпейис А. Е. Новый подход к моделированию процесса формирования теплового режима термосифонов больших размеров для использования геотермальной теплоты // Известия ТПУ. 2019. №8.
- 50.Максимов В. И., Салум А. Математическое моделирование процессов теплопереноса при работе теплонасосных систем использования геотермальной энергии // Известия ТПУ. 2019. №4.
- 51.Максимов Е.А. Использование геотермальных источников тепла земли для обогрева местных сопротивлений магистральных нефтепроводов в зимнее время / Е.А Максимов., В.И Васильев // «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья №2». - 2019. 8 (140): С. 30-38.
- 52.Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района

Якутии // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 217-233. DOI: 10.31897/PMI.2022.23.

- 53.Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Волкова Г.И., Прозорова И.В., Юдина Н.В. Исследование влияния ультразвукового воздействия и химических реагентов на реологические свойства вязких нефтей // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2010. № 5. С. 3134.
- 54.Муллакаев, М.С. Изучение воздействия кавитации на реологические свойства тяжёлой нефти / М.С. Муллакаев, В.О. Абрамов, В.М Баязитов, Д.А. Баранов, В.М., Новоторцев, И.Л. Еременко // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 5. С. 2427.
- 55.Наумов В. А. Инженерный метод расчета коэффициента гидравлических потерь при транспортировании водорыбной смеси по трубам // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2020. №1.
- 56.Непша Ф.С., Варнавский К.А., Воронин В.А., Заславский И.С., Ливен А.С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С.455-469.EDNLNSCEY.
- 57.Николаев А.К. Выбор рациональной температуры подогрева высоковязкой нефти и высокозастывающей нефти при перекачки по трубопроводу / А.К. Николаев, А.В. Климко // Записки Горного института. 2018.Т.220. С. 564-566.
- 58.Нурпейис А. Е. Анализ возможного метода использования геотермальной энергии // Известия ТПУ. 2019. №7.
- 59.Осипов А. Л. Применение геотермальной энергии для систем отопления и охлаждения зданий / А. Л. Осипов // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 3, № 8(147). – С. 148-154. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.08.03.017. – EDN QKJBRS.
- 60.Павлов А. А., Лавренов А. В. Перспективы внедрения инновационных технологий в получении геотермальной энергии // XXVII Международная

конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024) 22 – 24 мая, 2024, Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 515-518.

- 61.Палиивец М.С. Экспериментальная оценка потерь напора по длине в гидравлически короткой трубе системы водоснабжения // Инновации и инвестиции. 2020. №9.
- 62.Патент на полезную модель № 222634 У1 Российская Федерация, МПК F24T 10/40, F28D 15/02. Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела : № 2023130837 : заявл. 27.11.2023 : опубл. 16.01.2024 / В. А. Лебедев, Е. А. Зайцева, **А. Н. Федоткина** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II". – EDN CLLCWF.
- 63.Пашкевич М.А., Данилов А.С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 153-154.
- 64.Пегин П. А. Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами / П. А. Пегин, Д. С. Филимонов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 878-890. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-4-878-890. – EDN QVPWLC.
- 65.Петров И. В., Меркулина И. А., Харитонова Т. В. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ АРКТИКИ // Уголь. 2023. №5 (1167).
66. Пирназарова Г., Темирханова М. Ж. Организация службы внутреннего аудита в хозяйствующих субъектах и его анализ // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. №9. С. 467- 471. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/82/52>.

67. Постановление агентство по тарифам приморского края от 19 декабря 2024 №59/2 // Официальный сайт Дальневосточно энергетической компании. URL: https://www.dvec.ru/private_clients/tariffs/2025/prim_teplo_20241219_59_2.pdf (дата обращение 15.03.2025).
68. Постановление агентство по тарифам приморского края от 27 февраля 2025 №8/1 // Официальный сайт Дальневосточно энергетической компании. URL: https://www.dvec.ru/private_clients/tariffs/2025/prim_electro_20250227_8_1.pdf (дата обращение 15.03.2025).
69. Проскуряков Р.М. Неразрушающие методы контроля качества и количества нефтяных потоков / Р.М.Проскуряков, А.В.Коптева // Записки Горного института. 2016. Т.220. С.564-567.
70. Проскуряков Р.М. Построение системы диагностики технического состояния нефтепровода на основе постоянного пульсирующего магнитного поля / Р.М. Проскуряков, А.С. Дементьев // Записки Горного института. 2016. Т.218. С.59-63.
71. Проскуряков, Р. М. Неразрушающие методы контроля качества и количества нефтяных потоков / Р. М. Проскуряков, А. В. Коптева // Записки Горного института. – 2016. – Т. 220. – С. 564-567. – DOI 10.18454/PMI.2016.4.564. – EDN WXQUXF.
72. Псаров С.А., Шумилин Е.В. Моделирование работы геотермального теплового насоса с восстановлением теплоты грунта в теплый период // МНИЖ. 2021. №1-1 (103).
73. Рогачев М.К. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей / М.К. Рогачев, А.Н. Александров // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 596-605.

74. Романенко Александр Васильевич, Жинов Андрей Александрович
Определение оптимальных параметров геотермальной паротурбинной
установки // Известия вузов. Машиностроение. 2024. №5 (770)
75. Рыженков А.Я. Развитие возобновляемых источников энергии и их значение
для перехода России на стандарты «зеленой» экономики / А.Я. Рыженков,
Л.Д. Буринова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия:
Экономика. Управление. Право. 2022. Т. 22, № 4. С. 432-439. DOI
10.18500/1994-2540-2022-22-4-432-439. EDN KRLDTY.
76. Сапрыкина Н. Ю., Яковлев П. В. Моделирование температурного поля
эксплуатируемого грунтового массива в условиях длительной эксплуатации
геотермального теплонасосного оборудования // Инженерно-строительный
вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский инженерно-
строительный институт. Астрахань: ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. № 4
(14). С. 60–66.
77. Сафонова Алёна Юрьевна Использование геотермальной энергии // Вестник
науки и образования. 2020. №11-3 (89).
78. Сергеева А.В., Кириухина А.В., Усачева О.О., Рычкова Т.В., Карташева Е.В.,
Назарова М.А., Кузьмина А.А. Влияние вторичного минералообразования на
показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы
Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Записки Горного
института. 2023. Т. 262. С. 526-540. EDNBMBZHP.
79. Серегина А. А., 2023. Перспективы зеленой энергетики для России. –
Геоэкономика энергетики. № 1 (21). С. 108-122.
DOI:10.48137/26870703_2023_21_1_108.
80. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических
данных : Учебное пособие для магистров / Н. И. Сидняев. – 2-е издание,
переработанное и дополненное. – Москва : Общество с ограниченной
ответственностью "Издательство ЮРАЙТ", 2015. – 495 с. – (Бакалавр и
магистр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-3253-9. – EDN TYOXVX.

81. Соловьев Богдан Алексеевич, Бодылев Андрей Сергеевич, Павлов Александр Дмитриевич, Каекбирдина Ильгиза Далховна АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. №1.
82. Соловьев И. В., Михайлов А. В. Анализ грейферной выемки волокнистого торфяного сырья // Устойчивое развитие горных территорий. 2023 Т. 15, № 4 С. 1098–1107. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-1098-1107.
83. Соловьев И. Г. Линеаризованный алгебраический анализ предельных температурных состояний мерзлых оснований, обустроенных термосифонами / И. Г. Соловьев, А. Е. Паньшин // Вестник кибернетики. – 2007. – № 6. – С. 25-32. – EDN JWOCBL.
84. СП 48.13330.2019 СНиП 12-01-2004. Организация строительства. Актуализированная редакция [Текст]. — Введ. 2020-06-25. — М.: Минстрой России, 2019. — 56 с.
85. Суксова Софья Алексеевна, Долкан Александр Алексеевич, Тимофеева Юлия Владимировна, Усольцева Людмила Александровна СПОСОБЫ РАЗРАБОТКИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ // Вестник евразийской науки. 2020. №3.
86. Тимашев Э.О. Методика расчета пневмокомпенсаторов для плунжерных насосов с погружным приводом // Записки Горного института. 2020. Т.245. С.582-590. DOI:10.31897/ PMI.2020.5.10.
87. Тимофеев В.А. Исследование противоизносных свойств биоразлагаемых гидравлических масел [Электронный ресурс] / В.А. Тимофеев; науч. рук. Е.А. Задорожная; ЮУрГУ. - М., 2019. – 59 с. URL: <http://dspace.susu.ru/xmlui/handle/0001.74/31912> (дата обращения: 15.12.2024).
88. Тихонов С. И., Ильин А.В., Лукьянов Ю. Н., Перминов А. Л., Хитров А.И. Автономные энергетические установки малой мощности с использованием

- низкопотенциального тепла // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономика. Право. Управление. 2013. №2.
89. Транспортировка высоковязкой нефти [Электронный ресурс] // Нефтегазовое обозрение. — URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/transportirovka/651983-transportirovka-vysokovyazkoy-nefti/> (дата обращения: 15.07.2024).
90. Турсунов Ойбек Абдухалим Угли, Холиков Насобидин, Вохобов Рустам Применение солнечной энергии для холодильных грузовиков // Вестник науки и образования. 2020. №11-3 (89).
91. Усовершенствованные геотермальные технологии. Электронный ресурс: [сайт]. URL: <https://www.energy.gov/eere/geothermal/enhanced-geothermal-systems>. (дата обращения 03.11.2024).
92. Федосов С. В., Федосеев В. Н., Зайцева И. А. Эффективность компрессора в теплохолодильном компрессионном цикле воздушного теплового насоса // Современные научноемкие технологии. Региональное приложение . 2020. №4 (64).
93. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А. Анализ и выбор экологически безопасных хладагентов для систем теплоснабжения зданий воздушными тепловыми насосами // Современные научноемкие технологии. Региональное приложение. 2020. №1 (61).
94. **Федоткина, А. Н.** Геотермальные технологии: систематизация методов теплодобычи / А. Н. Федоткина, В. А. Лебедев // Синтез науки и образования как инструмент решения глобальных проблем современности : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Челябинск, 07 апреля 2025 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2025. – С. 49-51. – EDN LTBGLR.
95. **Федоткина, А. Н.** Исследование системы транспортирования тепловой энергии с применением естественной циркуляции в геотермальных термосифонах / А. Н. Федоткина // Системная трансформация - основа

устойчивого инновационного развития : сборник статей Международной научно-практической конференции, Магнитогорск, 02 апреля 2025 года. – Уфа: ООО "ОМЕГА САЙНС", 2025. – С. 39-41. – EDN YOSBAK.

96. **Федоткина, А. Н.** Моделирование работы геотермальной установки с использованием тепловых труб с естественной циркуляцией / А. Н. Федоткина, В. А. Лебедев // Математическое моделирование в теплоэнергетике : Молодежная научная конференция. Сборник докладов, Москва, 12 апреля 2023 года. – Москва: Открытое акционерное общество "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт", 2023. – С. 162-172. – EDN WCGOVI.
97. **Федоткина, А. Н.** Уменьшение тепловых потерь нефтяного трубопровода с помощью тепловых труб с естественной циркуляции / А. Н. Федоткина, В. А. Лебедев // Транспорт и хранение углеводородов - 2023 : Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 05–06 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 10-11. – EDN KKMDVJ.
98. Фоминых А.В., Тельминов А.В., Ковшова Н.А. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2018. №3 (27).
99. Хабаров А.П. Исследование параметров транспортирования высоковязких нефтей в виде эмульсий с целью их оптимизации // Записки Горного института. 2011. Т.194. С. 175-178.
100. Чучалов А. А. Проектирование системы автоматического управления вентиляцией зданий с помощью геотермальной энергии / А. А. Чучалов, М. А. Сафин // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 12. – С. 52-55. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-12-52-55. – EDN DQSJBN.

101. Шахназаров Б. А. ESG-принципы и устойчивое развитие. Правовые аспекты // Мониторинг правоприменения. 2022. №1 (42). С. 2-10. DOI: 10.21681/2226-0692-2022-1-2-11.
102. Шевчук Андрей Михайлович, Карасёв Сергей Юрьевич, Лебедь Богдан Петрович, Сивохина Наталья Викторовна ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ УЧАСТКОВ МЕСТНОСТИ В ЭКОСТРОИТЕЛЬСТВЕ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. №8.
103. Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 479-492. EDN SNUKNA.
104. Штанов, А. Е. Визуализация этапов анализа и обработки экспериментальных данных / А. Е. Штанов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–30 мая 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 3086-3090. – EDN USSLWF.
105. Штебнер С. В. Взаимосвязь экологии и экономики // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. №8. С. 424-429. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/81/43>.
106. Экономика строительства №6 2022 : Периодическое издание / под. ред. Е.А. Сулимова — Москва : Русайнс, 2022. — 118 с. — ISSN 0131-7768. — URL: <https://book.ru/book/946825> (дата обращения: 25.06.2025).
107. Яковлев П. В., Яковлева Е. П., Яковлева А. П. Экспериментальное и теоретическое исследование аэродинамики и ветровой защиты жилых и

производственных комплексов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский инженерно-строительный институт. Астрахань : ГАОУ АО ВПО «АИСИ», 2015. № 4 (14). С. 66–71.

108. Ajwalia K. A systematic review of enhanced geothermal system, Proc. Of the 48th Work-shop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, USA. February 6-8, 2023.
109. Anufriev R.V., Volkova G.I. Structural and mechanical properties of highly paraffinic crude oil processed in high-frequency acoustic field // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 670. P. 55–61.
110. Bist N. Hybrid solar geothermal setup by optimal retrofitting / N. Bist, A. Sircar // Case Studies in Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 28. – P. 101529. – DOI 10.1016/j.csite.2021.101529. – EDN BHDXQS.
111. Cao W J, Huang W B and Jiang F M. 2016 Numerical study on variable thermophysical properties of heat transfer fluid affecting EGS heat extraction[J] International journal of heat and mass transfer 92 1205-1217.
112. Cherepovitsyn A. Strategic Planning of Oil and Gas Companies: The Decarbonization Transition / A. Cherepovitsyn, E. Rutenko // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 17. – P. 6163. – DOI 10.3390/en15176163. – EDN EQJIV.
113. Eidan A.A., Najim S.E., Jalil J.M. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for sub-tropical climates // Applied Thermal En-gineering. - 2017. - V. 114.
114. Gandler S.G., Kryukova M.S., Alferova E.L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia). 2024;9(3):250-262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>.

115. Ground-source heat pump project analysis / Clean Energy Decision Support Centre// Clean energy project analysis: ret- screen engineering and cases textbook/Minister of Natural Resources Canada, 2001–2005.
116. Guan B., Liu X., Zhang T. Analytical solutions for the optimal cooling and heating source temperatures in liquid desiccant air-conditioning system based on exergy analysis. Energy, 2020, vol. 203, art. 117860. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117860.
117. Hartmann F., Behrendb R., Hantschc A. et al. Numerical investigation of the performance of a partially wetted geothermal thermosyphon at various power demand schemes // Geothermics. – 2015. – P. 99–107.
118. Hongwu Lei, Jiaqi Li and Tianfu Xu 2014 Influence analysis and scope determination of the boundary in the numerical simulation of carbon dioxide geological storage Journal of Chongqing University[J] ed Wang Fugang and Shi Yan 37 77-86.
119. Khrabrov A.P. Calculation of hydraulic transport of high viscosity oil / A.P.Khrabrov V.I., Alexandrov // Problems of gathering, preparation and transport of oil and oil products. 2010. № 2 (80). pp. 245-249.
120. Koichiro T, Yuichi F, Shunta U. Fundamental Investigation of Roll Bond Heat Pipeas Heat Spreader Plate for Notebook Computers[J]. IEEE Transactions on components and technologies, 23(1): 80~85.
121. Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of vol- canoes inferred from time- dependent seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 263. P. 75-91. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014.
122. Mahmoodpour, S., Singh, M., Turan, A., Bär, K., Sass, I. Hydro-Thermal Modeling for Geothermal Energy Extraction // Geosciences. 2021. Vol. 11.
123. Mammadov P. Y. Investigating the geothermal energy potential of Absheron region for electricity generation using binary cycle technology / P. Y. Mammadov

// Geology and Geophysics of the South of Russia. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 162-171. – DOI 10.46698/VNC.2024.56.13.012. – EDN QAZOER.

124. Marinyuk, B. Calculations of heat exchange in apparatuses and systems of low-temperature equipment / B. Marinyuk. – Moscow: Mashinostroenie, 2015. – 272 p.
125. Martinez J. A. and Mahseredjian J., "Load flow calculations in distribution systems with distributed resources. A review," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-8, doi: 10.1109/PES.2011.6039172.
126. Martynova T.A., Gilenko E.V., Kitaeva E.M., Bondar V.A., Orlova E.V., Drozdova N.P., Cherenkov V.I. Interdisciplinary communicative competence: From conceptualising to operationalising // Education and Science Journal. – 2023. – Vol. 25, No. 4. – P. 12-36. – DOI 10.17853/1994-5639-2023-4-12-36. – EDN ZKVVXNJ.
127. Miram, A.O. Technical thermodynamics. Heat and mass transfer: Educational edition / A.O. Miram, V.A. Pavlenko. – Moscow: DIA, 2016. – 352 p.
128. Mullakaev M.S., Volkova G.I., Gradov O.M. Effect of ultrasound on the viscosity-temperature properties of crude oils of various compositions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. - 2015. Vol. 49. No. 3. P. 287 – 296.
129. Mullakaev, M.S., Asylbaev D.F., Prachkin V.G. Volkova G.I. Influence of Ultrasound and Heat Treatment on the Rheological Properties of Ust-Tegusskoe Oil // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 49. Issue 910. P. 584587.
130. Namrata B., Anirbid S. Hybrid solar geothermal setup by optimal retrofitting // ase Studies in Thermal Engineering. Vol. 28. 2021;
131. Oskooi B and Manzella A. 2011 2D inversion of the magnetotelluric data from travale geothermal field in Italy [J] Journal of the Earth & SpacePhysics[J] 36 1-18.

132. Pushkaryov S., Blumberga D., Gluchshenko T., Koshkin I. Theoretical Studies of Determining the Efficiency Indicators of Heat Pump Installations Under Climatic Conditions of the Northern Region of Kazakhstan Knstanay Region / S. Pushkaryov, D. Blumberga, T. Gluchshenko, I. Koshkin // Труды университета. – 2022. – No. 2(87). – P. 272-277. – DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_272. – EDN RRTFSC.
133. Shaobin H., Lingling G., Yongjian L. Геотермальный обогрев скважин [Электронный ресурс]. Код доступа: <https://vodapol.ru/articles/a160/>.
134. Stroykov G. Powering multiple gas condensate wells in Russia's arctic: Power supply systems based on renewable energy sources / G. Stroykov, A. Y. Cherepovitsyn, E. A. Iamshchikova // Resources. – 2020. – Vol. 9, No. 11. – P. 1-15. – DOI 10.3390/resources9110130. – EDN BFCTZG.
135. Volkova G.I., Anufriev R.V., Yudina N.V. Effect of ultrasonic treatment on the composition and properties of waxy high-resin oil. Petroleum Chemistry. 2016. T. 56. № 8. C. 683-689.
136. Yapin Z., Zhiyin H., Fangfang Q., Dejia H., Haohao H., Haochen J. Numerical simulation of geothermal energy from dry hot rocks with gravity heat pipe // Earth and Environmental Science. 2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационного исследования

Утверждаю



Дата «13» марта 2025 г.

АКТ о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации
Федоткиной Анастасии Николаевны
по научной специальности 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель Д.В. Громак – технический директор Проектного центра «Невский» ПАО «ТГК-1»;

Члены комиссии: Владимир Николаевич Осипов – главный инженер проекта Проектного центра «Невский» ПАО «ТГК-1», Дмитрий Анатольевич Жеравов – главный инженер проекта Проектного центра «Невский» ПАО «ТГК-1»

подтверждает целесообразность применения и внедрения результатов диссертации Федоткиной Анастасии Николаевны на тему «Повышение эффективности технологии трансфера теплоты с использованием геотермальных термосифонов с естественной циркуляцией», представленной на соискание ученой степени кандидата наук при разработке проектной документации по проектам технического перевооружения, реконструкции энергетических объектов:

- методики расчета, описывающей термодинамический процесс функционирования геотермального термосифона с естественной циркуляцией с учетом внутренних и внешних тепловых потерь;
- экспериментальных данных по исследованию зависимостей наличия внутреннего разделителя сред, теплоизолированного слоя на разделителе и наличия концевых крышек, выполненных из материала с высоким коэффициентом теплопроводности.

Использование указанных результатов позволяет:

- увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией на 20 % при внедрении внутреннего разделителя сред и концевых крышек, выполненных из материала с высоким коэффициентом теплопроводности;

Продолжение приложения А

- увеличить энергетическую эффективность геотермального термосифона с естественной циркуляцией на 10 % при внедрении теплоизолированного слоя на разделителе сред;
- увеличить экономическую эффективность при трансфере геотермальной энергии с помощью геотермального термосифона с естественной циркуляцией на 10 %.

Председатель комиссии

Технический директор



Д.В. Громак

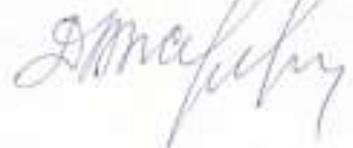
Члены комиссии:

Главный инженер проекта



В.Н. Осипов

Главный инженер проекта



Д.А. Журавов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



• ПАТЕНТ •

на полезную модель

№ 222634

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ ТЕРМОСИФОН С
ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Лебедев Владимир Александрович (RU), Зайцева Екатерина Александровна (RU), Федоткина Анастасия Николаевна (RU)*

Заявка № 2023130837

Приоритет полезной модели 27 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 16 января 2024 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 27 ноября 2033 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Продолжение приложения Б



(19) RU (11) 222 634 (13) U1

(51) МПК
F24T 10/40 (2018.01)
F28D 15/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
F24T 10/40 (2023.08); F28D 15/02 (2023.08)

(21)(22) Заявка: 2023130837, 27.11.2023	(72) Автор(ы): Лебедев Владимир Александрович (RU), Зайцева Екатерина Александровна (RU), Федоткина Анастасия Николаевна (RU)
(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 27.11.2023	(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)
Дата регистрации: 16.01.2024	(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: UA 83650 C2, 11.08.2008. SU 382910 A1, 23.05.1973. RU 2563328 C1, 20.09.2015. CN 214581879 U, 02.11.2021. WO 2018176685 A1, 04.10.2018.
Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 27.11.2023	
(45) Опубликовано: 16.01.2024 Бюл. № 2	
Адрес для переписки: 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2, СПбГУ, Патентно-лицензионный отдел	

(54) ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ ТЕРМОСИФОН С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области тепловой энергетики, в частности транспортирования глубинного тепла Земли и использования транспортированной тепловой энергии в целях народного хозяйства с возможностью автономной работы и экономии электрической энергии в условиях долгосрочных проектов. Устройство предназначено для использования в зонах с пониженной геотермальной ступенью, в которых массив горных пород имеет температуру значительно выше относительной температуры окружающей среды над поверхностью на глубине от 10 до 20 метров. Примером таких зон на территории

Российской Федерации служит полуостров Камчатка, территория северного Кавказа и др. Техническим результатом является транспортирование геотермальной энергии с минимизацией тепловых потерь. Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела за счет введения термоизолатора на внешней поверхности внутренней трубы позволяет уменьшить тепловые потери при транспортировании глубинного тепла Земли. Транспортирование геотермальной энергии с различной глубины происходит благодаря конструкции внешних и внутренних трубок и установки их в необходимом количестве.

R U 2 2 2 6 3 4 U 1

R U 2 2 2 6 3 4 U 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Критическое значение критерия Пирсона
(χ^2 – критерий)

Число степеней свободы, v	Уровень значимости, q, %							
	20	10	5	2	1	0,5	0,2	0,1
1	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635	7,879	9,550	10,83
2	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210	10,60	12,43	13,82
3	4,642	6,251	7,815	9,837	11,34	12,84	14,80	16,27
4	5,989	7,779	9,488	11,67	13,28	14,86	16,92	18,47
5	7,289	9,236	11,07	13,39	15,09	16,75	18,91	20,52
6	8,558	10,64	12,59	15,03	16,81	18,55	20,79	22,46
7	9,803	12,02	14,07	16,62	18,48	20,28	22,60	24,32
8	11,03	13,36	15,51	18,17	20,09	21,95	24,35	26,12
9	12,24	14,68	16,92	19,68	21,67	23,59	26,06	27,88
10	13,44	15,99	18,31	21,16	23,21	25,19	27,72	29,59
11	14,63	17,28	19,68	22,62	24,72	26,76	29,35	31,26
12	15,81	18,55	21,03	24,05	26,22	28,30	30,96	32,91
13	16,98	19,81	22,36	25,47	27,69	29,82	32,54	34,53
14	18,15	21,06	23,68	26,87	29,14	31,32	34,09	36,12
15	19,31	22,31	25,00	28,26	30,58	32,80	35,63	37,70

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Протокол эксперимента

ПРОТОКОЛ №1 от 25.06.2024

Используемый образец: геотермальный термосифон Двн=50 мм, Двнеш=75 мм, Н=0,5-2,0 м

Исходные данные: температура земли 40°C

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Температура земли 40°C									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40	39,8	0,2	40,9	40,7	0,2	40,8	40,6	0,2
10	39,9	39,4	0,5	40,3	39,8	0,5	40,1	39,6	0,5
20	40,1	39,3	0,8	40	39,2	0,8	40,7	39,9	0,8
30	40	39,1	0,9	40,3	39,4	0,9	40,2	39,3	0,9
40	39,9	38,8	1,1	40,5	39,4	1,1	40,2	39,1	1,1
50	40,1	39	1,1	40	38,9	1,1	40,5	39,4	1,1
60	40	38,9	1,1	40,8	39,7	1,1	40,1	39	1,1
70	40,4	39,3	1,1	40	38,9	1,1	40,2	39,1	1,1
80	40,3	39,2	1,1	40,9	39,8	1,1	40,7	39,6	1,1
90	40,1	39	1,1	40,7	39,6	1,1	40,2	39,1	1,1
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	38,9	38,7	0,2	40,9	40,7	0,2	40,6	40,4	0,2
10	40	39,2	0,8	40,3	39,5	0,8	40,6	39,8	0,8
20	40,5	39,4	1,1	40,3	39,2	1,1	40,6	39,5	1,1
30	40,2	38,9	1,3	40,5	39,2	1,3	40,9	39,6	1,3
40	39,9	38,1	1,8	40	38,2	1,8	40,4	38,6	1,8
50	40,1	38,3	1,8	40,4	38,6	1,8	40,6	38,8	1,8

Температура земли 40°C									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40	39,8	0,2	40,3	40,1	0,2	40,2	40	0,2
10	39,9	36,7	3,2	40,9	37,7	3,2	40,3	37,1	3,2
20	40,1	35,7	4,4	40,4	36	4,4	40,1	35,7	4,4
30	40	34,2	5,8	40,7	34,9	5,8	40,6	34,8	5,8
40	39,9	33	6,9	40,7	33,8	6,9	40,3	33,4	6,9
50	40,1	33,2	6,9	40,3	33,4	6,9	40,5	33,6	6,9
60	40	33,1	6,9	40,1	33,2	6,9	40,9	34	6,9
70	40,4	33,5	6,9	40,2	33,3	6,9	40,4	33,5	6,9
80	40,3	33,4	6,9	40,5	33,6	6,9	40,8	33,9	6,9
90	40,1	33,2	6,9	40,5	33,6	6,9	40,8	33,9	6,9
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	38,9	38,4	0,5	40,4	39,9	0,5	40,8	40,3	0,5
10	40	35,7	4,3	40,2	35,9	4,3	40,2	35,9	4,3
20	40,5	32,9	7,6	40,8	33,2	7,6	40,1	32,5	7,6
30	40,2	30,7	9,5	40,7	31,2	9,5	40,6	31,1	9,5
40	39,9	28,7	11,2	40,6	29,4	11,2	40,1	28,9	11,2
50	40,1	28,9	11,2	40,4	29,2	11,2	40	28,8	11,2

Температура земли 40°C									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40	39,8	0,2	40,9	40,7	0,2	40	39,8	0,2
10	39,9	36,7	3,2	40,6	37,4	3,2	40,4	37,2	3,2
20	40,1	35,7	4,4	40,7	36,3	4,4	40,6	36,2	4,4
30	40	34,2	5,8	40,5	34,7	5,8	40,5	34,7	5,8
40	39,9	30,7	9,2	40,4	31,2	9,2	40,5	31,3	9,2
50	40,1	30,9	9,2	40,4	31,2	9,2	40,5	31,3	9,2
60	40	30,8	9,2	40,7	31,5	9,2	40,4	31,2	9,2
70	40,4	31,2	9,2	40,5	31,3	9,2	40,3	31,1	9,2
80	40,3	31,1	9,2	40,7	31,5	9,2	40,4	31,2	9,2
90	40,1	30,9	9,2	40,1	30,9	9,2	40,5	31,3	9,2
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	38,9	38,4	0,5	40,9	40,4	0,5	40,6	40,1	0,5
10	40	35,7	4,3	40,5	36,2	4,3	40,2	35,9	4,3
20	40,5	32,9	7,6	40,8	33,2	7,6	40,6	33	7,6
30	40,2	30,7	9,5	40,7	31,4	9,5	40,9	30,7	9,5
40	39,9	25	14,9	40,1	25,2	14,9	40,8	25,9	14,9
50	40,1	25,2	14,9	40,3	25,4	14,9	40	25,1	14,9

Продолжение приложения Г

Температура земли 40оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	40,4	38,6	1,8	40,9	39,1	1,8	40,1	38,3	1,8
70	40,3	38,5	1,8	40,9	39,1	1,8	40,6	38,8	1,8
80	40,1	38,3	1,8	40,6	38,8	1,8	40,1	38,3	1,8
90	40,4	38,6	1,8	40,9	39,1	1,8	40,7	38,9	1,8
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40,1	39,6	0,5	40,8	40,3	0,5	40,1	39,6	0,5
10	39,9	38,8	1,1	40,1	39	1,1	40,1	39	1,1
20	40,5	38,9	1,6	40,7	39,1	1,6	40,3	38,7	1,6
30	40,3	37,9	2,4	40,2	37,8	2,4	40,7	38,3	2,4
40	40,4	37,4	3	40,1	37,1	3	40,9	37,9	3
50	40	37	3	40,3	37,3	3	40,9	37,9	3
60	40,1	37,1	3	40,2	37,2	3	40,6	37,6	3
70	40,2	37,2	3	40,9	37,9	3	40,9	37,9	3
80	40,6	37,6	3	40	37	3	40,3	37,3	3
90	40,5	37,5	3	40,6	37,6	3	40,9	37,9	3
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	39,9	39,3	0,6	40	39,4	0,6	40,3	39,7	0,6
10	39,8	38,4	1,4	40	38,6	1,4	40	38,6	1,4
20	39,9	37,9	2	40,5	38,5	2	40,3	38,3	2
30	40	37,4	2,6	40,3	37,7	2,6	40,4	37,8	2,6
40	40,1	36,7	3,4	40,6	37,2	3,4	40,4	37	3,4
50	40,3	36,9	3,4	40,3	36,9	3,4	40,6	37,2	3,4
60	40,3	36,9	3,4	40,4	37	3,4	40,2	36,8	3,4

Температура земли 40оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	40,4	29,2	11,2	40,7	29,5	11,2	40,5	29,3	11,2
70	40,3	29,1	11,2	40	28,8	11,2	40,7	29,5	11,2
80	40,1	28,9	11,2	40,8	29,6	11,2	40	28,8	11,2
90	40,4	29,2	11,2	40,7	29,5	11,2	40,9	29,7	11,2
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40,1	39,5	0,6	40,6	40	0,6	40,1	39,5	0,6
10	39,9	34,7	5,2	40,5	35,3	5,2	40,6	35,4	5,2
20	40,5	31,7	8,8	40,3	31,5	8,8	40,6	31,8	8,8
30	40,3	28,5	11,8	40,4	28,6	11,8	40,3	28,5	11,8
40	40,4	20,9	19,5	40,7	21,2	19,5	40,3	20,8	19,5
50	40	20,5	19,5	40	20,5	19,5	40,4	20,9	19,5
60	40,1	20,6	19,5	40	20,5	19,5	40,4	20,9	19,5
70	40,2	20,7	19,5	40,1	20,6	19,5	40,3	20,8	19,5
80	40,6	21,1	19,5	40,5	21	19,5	40,3	20,8	19,5
90	40,5	21	19,5	40,6	21,1	19,5	40,3	20,8	19,5
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	39,9	39,1	0,8	40,3	39,5	0,8	40,9	40,1	0,8
10	39,8	34,3	5,5	40,8	35,3	5,5	40,3	34,8	5,5
20	39,9	28,6	11,3	40,4	29,1	11,3	40,6	29,3	11,3
30	40	21,8	18,2	40,2	22	18,2	40,6	22,4	18,2
40	40,1	16,7	23,4	40,2	16,8	23,4	40,8	17,4	23,4
50	40,3	16,9	23,4	40	16,6	23,4	40,3	16,9	23,4
60	40,3	16,9	23,4	40,4	17	23,4	40,8	17,4	23,4

Температура земли 40оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	40,4	25,5	14,9	40,7	25,8	14,9	40	25,1	14,9
70	40,3	25,4	14,9	40,3	25,4	14,9	40,8	25,9	14,9
80	40,1	25,2	14,9	40,3	25,4	14,9	40,1	25,2	14,9
90	40,4	25,5	14,9	40,3	25,4	14,9	40,4	25,5	14,9
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	40,1	39,5	0,6	40,6	40	0,6	40,2	39,6	0,6
10	39,9	34,7	5,2	40,1	34,9	5,2	40,9	35,7	5,2
20	40,5	31,7	8,8	40,6	31,8	8,8	40	31,2	8,8
30	40,3	24,5	15,8	40,7	24,9	15,8	40,3	24,5	15,8
40	40,4	14,7	25,7	40,9	15,2	25,7	40	14,3	25,7
50	40	14,3	25,7	40,7	15	25,7	40	14,3	25,7
60	40,1	14,4	25,7	40,3	14,6	25,7	40,9	15,2	25,7
70	40,2	14,5	25,7	40,2	14,5	25,7	40,6	14,9	25,7
80	40,6	14,9	25,7	40,8	15,1	25,7	40,6	14,9	25,7
90	40,5	14,8	25,7	40,6	14,9	25,7	40,5	14,8	25,7
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	39,9	38,8	1,1	40,6	39,5	1,1	40,5	39,4	1,1
10	39,8	31,1	8,7	40,7	32	8,7	40,3	31,6	8,7
20	39,9	25,6	14,3	40,7	26,4	14,3	40	25,7	14,3
30	40	16,6	23,4	40,3	16,9	23,4	40,3	16,9	23,4
40	40,1	9	31,1	40,8	9,7	31,1	40	8,9	31,1
50	40,3	9,2	31,1	40,6	9,5	31,1	40	8,9	31,1
60	40,3	9,2	31,1	40	8,9	31,1	40,4	9,3	31,1

Продолжение приложения Г

Температура земли 40оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	40,7	37,3	3,4	40,9	37,5	3,4	40	36,6	3,4
80	40,4	37	3,4	40,5	37,1	3,4	40,6	37,2	3,4
90	40,2	36,8	3,4	40,3	36,9	3,4	40,3	36,9	3,4

Температура земли 40оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	40,7	17,3	23,4	40	16,6	23,4	40,9	17,5	23,4
80	40,4	17	23,4	40,7	17,3	23,4	40,8	17,4	23,4
90	40,2	16,8	23,4	40,4	17	23,4	40,1	16,7	23,4

Температура земли 40оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	40,7	9,6	31,1	40,5	9,4	31,1	40,7	9,6	31,1
80	40,4	9,3	31,1	40,9	9,8	31,1	40,3	9,2	31,1
90	40,2	9,1	31,1	40,9	9,8	31,1	40,5	9,4	31,1

Заведующий лаборатории
кафедры теплотехники и теплоэнергетики



Широкий Алексей Юрьевич

Продолжение приложения Г

ПРОТОКОЛ №2 от 05.07.2024

Используемый образец: геотермальный термосифон Двн=50 мм, Двнеш=75 мм, Н=0,5-2,0 м
Исходные данные: температура земли 50°C

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Температура земли 50°C									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,6	50,3	0,3	50,2	49,9	0,3	50,6	50,3	0,3
10	50,9	50,1	0,8	50,2	49,4	0,8	50,1	49,3	0,8
20	50,4	49,2	1,2	50,5	49,3	1,2	50,5	49,3	1,2
30	50,6	49,1	1,5	50,2	48,7	1,5	50,2	48,7	1,5
40	50,7	49	1,7	50,5	48,8	1,7	50,9	49,2	1,7
50	50,1	48,4	1,7	50,5	48,8	1,7	50,8	49,1	1,7
60	50,4	48,7	1,7	50	48,3	1,7	50,2	48,5	1,7
70	50,8	49,1	1,7	50,4	48,7	1,7	50,1	48,4	1,7
80	50,4	48,7	1,7	50,1	48,4	1,7	50,9	49,2	1,7
90	50,5	48,8	1,7	50,1	48,4	1,7	50,1	48,4	1,7
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,6	50,3	0,3	50,9	50,6	0,3	50,2	49,9	0,3
10	50,9	49,7	1,2	50,2	49	1,2	50,2	49	1,2
20	50,7	49,2	1,5	50,5	49	1,5	50,4	48,9	1,5
30	50,9	49,1	1,8	50,8	49	1,8	50,3	48,5	1,8
40	50,4	48	2,4	50,2	47,8	2,4	50,7	48,3	2,4
50	50,3	47,9	2,4	50,7	48,3	2,4	50,5	48,1	2,4

Температура земли 50°C									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,7	50,2	0,5	50,5	50	0,5	50,7	50,2	0,5
10	50,2	49,2	1	50,2	49,2	1	50,2	49,2	1
20	50,2	46,8	3,4	50,6	47,2	3,4	50,6	47,2	3,4
30	50,2	43,8	6,4	50,6	44,2	6,4	50,9	44,5	6,4
40	50,2	39	11,2	50,4	39,2	11,2	50,8	39,6	11,2
50	50,6	39,4	11,2	50,2	39	11,2	50,4	39,2	11,2
60	50,5	39,3	11,2	50,4	39,2	11,2	50,9	39,7	11,2
70	50,2	39	11,2	50	38,8	11,2	50,3	39,1	11,2
80	50,7	39,5	11,2	50,3	39,1	11,2	50,3	39,1	11,2
90	50,4	39,2	11,2	50,7	39,5	11,2	50,2	39	11,2
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,5	49,8	0,7	50,5	49,8	0,7	50,5	49,8	0,7
10	50,5	49	1,5	50,6	49,1	1,5	50,7	49,2	1,5
20	50	45,2	4,8	50,2	45,4	4,8	50,5	45,7	4,8
30	50,9	41,6	9,3	50,5	41,2	9,3	50,7	41,4	9,3
40	50,6	35,8	14,8	50,8	36	14,8	50,3	35,5	14,8
50	50,6	35,8	14,8	50,6	35,8	14,8	50,6	35,8	14,8

Температура земли 50°C									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,3	49,8	0,5	50,3	49,8	0,5	50,6	50,1	0,5
10	50,5	47,3	3,2	50,9	47,7	3,2	50,9	47,7	3,2
20	50,8	44	6,8	50,8	44	6,8	50,9	44,1	6,8
30	50,5	37,3	13,2	50,8	37,6	13,2	50,8	37,6	13,2
40	50,7	35,8	14,9	50,4	35,5	14,9	50,9	36	14,9
50	50,6	35,7	14,9	50	35,1	14,9	50,2	35,3	14,9
60	50,6	35,7	14,9	50,3	35,4	14,9	50,2	35,3	14,9
70	50,5	35,6	14,9	50,8	35,9	14,9	50,5	35,6	14,9
80	50,9	36	14,9	50	35,1	14,9	50,5	35,6	14,9
90	50,8	35,9	14,9	50,1	35,2	14,9	50,2	35,3	14,9
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,2	49,4	0,8	50	49,2	0,8	50,7	49,9	0,8
10	50,6	45,1	5,5	50	44,5	5,5	50,8	45,3	5,5
20	50,5	39,9	10,6	50,7	40,1	10,6	50,8	40,2	10,6
30	50,3	32,5	17,8	50,8	33	17,8	50,2	32,4	17,8
40	50,5	30,8	19,7	50,8	31,1	19,7	50,7	31	19,7
50	50,2	30,5	19,7	50,4	30,7	19,7	50,6	30,9	19,7

Продолжение приложения Г

Температура земли 50оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	50,5	48,1	2,4	50,2	47,8	2,4	50,3	47,9	2,4
70	50,3	47,9	2,4	50,5	48,1	2,4	50,3	47,9	2,4
80	50,5	48,1	2,4	50,3	47,9	2,4	50	47,6	2,4
90	50,7	48,3	2,4	50,2	47,8	2,4	50,8	48,4	2,4
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50	49,5	0,5	50,8	50,3	0,5	50,8	50,3	0,5
10	50,6	49,1	1,5	50,8	49,3	1,5	50,4	48,9	1,5
20	50,2	48,4	1,8	50,9	49,1	1,8	50	48,2	1,8
30	50,3	47,8	2,5	50,3	47,8	2,5	50,6	48,1	2,5
40	50,2	46,6	3,6	50,9	47,3	3,6	50,2	46,6	3,6
50	50,7	47,1	3,6	50,4	46,8	3,6	50	46,4	3,6
60	50,9	47,3	3,6	50,4	46,8	3,6	50	46,4	3,6
70	50,9	47,3	3,6	50,7	47,1	3,6	50,2	46,6	3,6
80	50,5	46,9	3,6	50,4	46,8	3,6	50,8	47,2	3,6
90	50	46,4	3,6	50,5	46,9	3,6	50,7	47,1	3,6
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,3	49,6	0,7	50,3	49,6	0,7	50,2	49,5	0,7
10	50,4	48,7	1,7	50,5	48,8	1,7	50,4	48,7	1,7
20	50,2	48,2	2	50,1	48,1	2	50,2	48,2	2
30	50,1	47,2	2,9	50,2	47,3	2,9	50,9	48	2,9
40	50,2	46,3	3,9	50,9	47	3,9	50,5	46,6	3,9
50	50,8	46,9	3,9	50,6	46,7	3,9	50,2	46,3	3,9
60	50,6	46,7	3,9	50,7	46,8	3,9	50,7	46,8	3,9

Температура земли 50оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	50,9	36,1	14,8	50,6	35,8	14,8	50,8	36	14,8
70	50,1	35,3	14,8	50,3	35,5	14,8	50,5	35,7	14,8
80	50,5	35,7	14,8	50,9	36,1	14,8	50,8	36	14,8
90	50,9	36,1	14,8	50,1	35,3	14,8	50,8	36	14,8
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,5	49,6	0,9	50	49,1	0,9	50,7	49,8	0,9
10	50,7	46,4	4,3	50,3	46	4,3	50	45,7	4,3
20	50,5	40,7	9,8	50,4	40,6	9,8	50,2	40,4	9,8
30	50,8	35,1	15,7	50,9	35,2	15,7	50,5	34,8	15,7
40	50,5	27,4	23,1	50,8	27,7	23,1	50,8	27,7	23,1
50	50,4	27,3	23,1	50,1	27	23,1	50,5	27,4	23,1
60	50,8	27,7	23,1	50,7	27,6	23,1	50	26,9	23,1
70	50,9	27,8	23,1	50,2	27,1	23,1	50,4	27,3	23,1
80	50	26,9	23,1	50,3	27,2	23,1	50,3	27,2	23,1
90	50,8	27,7	23,1	50,5	27,4	23,1	50,1	27	23,1
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,8	49,7	1,1	50,8	49,7	1,1	50,6	49,5	1,1
10	50,7	44,5	6,2	50,3	44,1	6,2	50,7	44,5	6,2
20	50,4	38,9	11,5	50,4	38,9	11,5	50,6	39,1	11,5
30	50,1	31,8	18,3	50,3	32	18,3	50,4	32,1	18,3
40	50,5	24,7	25,8	50,6	24,8	25,8	50,7	24,9	25,8
50	50,9	25,1	25,8	50,7	24,9	25,8	50,1	24,3	25,8
60	50,1	24,3	25,8	50,1	24,3	25,8	50,8	25	25,8

Температура земли 50оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	50,5	30,8	19,7	50,7	31	19,7	50,6	30,9	19,7
70	50,6	30,9	19,7	50,5	30,8	19,7	50,4	30,7	19,7
80	50,7	31	19,7	50,2	30,5	19,7	50,3	30,6	19,7
90	50,6	30,9	19,7	50,8	31,1	19,7	50,7	31	19,7
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,5	49,6	0,9	50,5	49,6	0,9	50,2	49,3	0,9
10	50,3	41,6	8,7	50,6	41,9	8,7	50,3	41,6	8,7
20	50	35,8	14,2	50,2	36	14,2	50,4	36,2	14,2
30	50,6	30,2	20,4	50,1	29,7	20,4	50,8	30,4	20,4
40	50,8	20,3	30,5	50,4	19,9	30,5	50,1	19,6	30,5
50	50,8	20,3	30,5	50,2	19,7	30,5	50,3	19,8	30,5
60	50	19,5	30,5	50	19,5	30,5	50	19,5	30,5
70	50,3	19,8	30,5	50,6	20,1	30,5	50,5	20	30,5
80	50,2	19,7	30,5	50	19,5	30,5	50,1	19,6	30,5
90	50,9	20,4	30,5	50,3	19,8	30,5	50	19,5	30,5
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	50,2	49,1	1,1	50,7	49,6	1,1	50,8	49,7	1,1
10	50,9	40,6	10,3	50,2	39,9	10,3	50,3	40	10,3
20	50,5	31,8	18,7	50,4	31,7	18,7	50,2	31,5	18,7
30	50,3	24,7	25,6	50,3	24,7	25,6	50,1	24,5	25,6
40	50,4	16,1	34,3	50,4	16,1	34,3	50,1	15,8	34,3
50	50,5	16,2	34,3	50,7	16,4	34,3	50,3	16	34,3
60	50,2	15,9	34,3	50,7	16,4	34,3	50,6	16,3	34,3

Продолжение приложения Г

Температура земли 50оС										
Без разделителя										
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3				
70	50,1	46,2	3,9	50,3	46,4	3,9	50,4	46,5	3,9	
80	50,4	46,5	3,9	50	46,1	3,9	50,3	46,4	3,9	
90	50,4	46,5	3,9	50,4	46,5	3,9	50,2	46,3	3,9	

Температура земли 50оС										
С разделителем										
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3				
70	50,6	24,8	25,8	50	24,2	25,8	50,3	24,5	25,8	
80	50,6	24,8	25,8	50,2	24,4	25,8	50,6	24,8	25,8	
90	50,9	25,1	25,8	50,6	24,8	25,8	50,4	24,6	25,8	

Температура земли 50оС										
С теплоизолированным разделителем										
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3				
70	50	15,7	34,3	50,3	16	34,3	50,8	16,5	34,3	
80	50,5	16,2	34,3	50,1	15,8	34,3	50,8	16,5	34,3	
90	50,7	16,4	34,3	50,4	16,1	34,3	50,2	15,9	34,3	

Заведующий лаборатории
кафедры теплотехники и теплоэнергетики

Широкий Алексей Юрьевич

Продолжение приложения Г

ПРОТОКОЛ №3 от 12.07.2024

Используемый образец: геотермальный термосифон Двн=50 мм, Двнеш=75 мм, Н=0,5-2,0 м
Исходные данные: температура земли 60°C

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Температура земли 60°C											
Без разделителя											
Опыт 1				Опыт 2				Опыт 3			
0,5 м				0,5 м				0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	60,0	59,1	0,9	60,5	59,6	0,9	60,0	59,1	0,9		
10	60,7	59,6	1,1	60,5	59,4	1,1	60,3	59,2	1,1		
20	60,8	59,5	1,3	60,8	59,5	1,3	60,6	59,3	1,3		
30	60,0	58,5	1,5	60,8	59,3	1,5	60,8	59,3	1,5		
40	60,0	58,2	1,8	60,3	58,5	1,8	60,1	58,3	1,8		
50	60,3	58,5	1,8	60,4	58,6	1,8	60,5	58,7	1,8		
60	60,1	58,3	1,8	60,4	58,6	1,8	60,3	58,5	1,8		
70	60,6	58,8	1,8	60,8	59	1,8	60,3	58,5	1,8		
80	60,6	58,8	1,8	60,4	58,6	1,8	60,5	58,7	1,8		
90	60,5	58,7	1,8	60,7	58,9	1,8	60,7	58,9	1,8		
1,0 м				1,0 м				1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	60,7	59,7	1	60,0	59	1	60,7	59,7	1		
10	60,7	59,2	1,5	60,4	58,9	1,5	60,1	58,6	1,5		
20	60,0	58,2	1,8	60,3	58,5	1,8	60,3	58,5	1,8		
30	60,0	57,6	2,4	60,1	57,7	2,4	60,0	57,6	2,4		
40	60,4	57,5	2,9	60,4	57,5	2,9	60,4	57,5	2,9		
50	60,3	57,4	2,9	60,3	57,4	2,9	60,8	57,9	2,9		

Температура земли 60°C											
С разделителем											
Опыт 1				Опыт 2				Опыт 3			
0,5 м				0,5 м				0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	60,4	59,5	0,9	60,8	59,9	0,9	60,1	59,2	0,9		
10	60,7	56,9	3,8	60,7	56,9	3,8	60,5	56,7	3,8		
20	60,1	54,8	5,3	60,7	55,4	5,3	60,8	55,5	5,3		
30	60,2	52,9	7,3	60,1	52,8	7,3	60,4	53,1	7,3		
40	60,1	48,5	11,6	60,8	49,2	11,6	60,4	48,8	11,6		
50	60,0	48,4	11,6	60,0	48,4	11,6	60,4	48,8	11,6		
60	60,4	48,8	11,6	60,2	48,6	11,6	60,6	49	11,6		
70	60,6	49	11,6	60,5	48,9	11,6	60,1	48,5	11,6		
80	60,6	49	11,6	60,2	48,6	11,6	60,6	49	11,6		
90	60,0	48,4	11,6	60,7	49,1	11,6	60,6	49	11,6		
1,0 м				1,0 м				1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	60,1	59,1	1	60,7	59,7	1	60,5	59,5	1		
10	60,4	56,1	4,3	60,8	56,5	4,3	60,8	56,5	4,3		
20	60,2	53,4	6,8	60,4	53,6	6,8	60,8	54	6,8		
30	59,9	50,3	9,6	60,0	50,4	9,6	60,8	51,2	9,6		
40	59,9	41,2	18,7	60,4	41,7	18,7	60,4	41,7	18,7		
50	60,4	41,7	18,7	60,2	41,5	18,7	60,3	41,6	18,7		

Температура земли 60°C											
С теплоизолированным разделителем											
Опыт 1				Опыт 2				Опыт 3			
0,5 м				0,5 м				0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	60,1	59,2	0,9	60,5	59,6	0,9	60,6	59,7	0,9		
10	60,7	59,5	1,2	60,6	59,4	1,2	60,3	59,1	1,2		
20	60,8	57,4	3,4	60,7	57,3	3,4	60,5	57,1	3,4		
30	60,0	51,1	8,9	60,0	51,1	8,9	60,2	51,3	8,9		
40	60,2	44,8	15,4	60,3	44,9	15,4	60,0	44,6	15,4		
50	60,6	45,2	15,4	60,8	45,4	15,4	60,2	44,8	15,4		
60	60,8	45,4	15,4	60,8	45,4	15,4	60,4	45	15,4		
70	60,6	45,2	15,4	60,8	45,4	15,4	60,0	44,6	15,4		
80	60,1	44,7	15,4	60,1	44,7	15,4	60,2	44,8	15,4		
90	60,7	45,3	15,4	60,5	45,1	15,4	60,3	44,9	15,4		
1,0 м				1,0 м				1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	Δt
5	59,9	58,8	1,1	60,4	59,3	1,1	60,6	59,5	1,1		
10	60,6	56,3	4,3	60,8	56,5	4,3	60,2	55,9	4,3		
20	60,3	51,0	9,3	60,8	51,5	9,3	60,3	51	9,3		
30	60,9	42,6	18,3	60,5	42,2	18,3	60,8	42,5	18,3		
40	60,6	35,7	24,9	60,6	35,7	24,9	60,7	35,8	24,9		
50	60,8	35,9	24,9	60,4	35,5	24,9	60,2	35,3	24,9		

Продолжение приложения Г

Температура земли 60оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	60,4	57,5	2,9	60,0	57,1	2,9	60,2	57,3	2,9
70	60,0	57,1	2,9	60,7	57,8	2,9	60,7	57,8	2,9
80	60,9	58	2,9	60,3	57,4	2,9	60,6	57,7	2,9
90	60,7	57,8	2,9	60,5	57,6	2,9	60,5	57,6	2,9
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,5	59,3	1,2	60,3	59,1	1,2	60,4	59,2	1,2
10	59,9	58	1,9	60,4	58,5	1,9	60,2	58,3	1,9
20	59,9	57,7	2,2	60,6	58,4	2,2	60,4	58,2	2,2
30	60,5	57,8	2,7	60,1	57,4	2,7	60,5	57,8	2,7
40	60,7	57	3,7	60,3	56,6	3,7	60,0	56,3	3,7
50	60,4	56,7	3,7	60,8	57,1	3,7	60,7	57	3,7
60	59,9	56,2	3,7	60,6	56,9	3,7	60,8	57,1	3,7
70	60,2	56,5	3,7	60,2	56,5	3,7	60,0	56,3	3,7
80	60,0	56,3	3,7	60,6	56,9	3,7	60,3	56,6	3,7
90	59,9	56,2	3,7	60,6	56,9	3,7	60,3	56,6	3,7
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,0	58,6	1,4	60,8	59,4	1,4	60,4	59	1,4
10	60,1	57,6	2,5	60,4	57,9	2,5	60,6	58,1	2,5
20	60,1	57,2	2,9	60,2	57,3	2,9	60,1	57,2	2,9
30	60,1	56,6	3,5	60,2	56,7	3,5	60,3	56,8	3,5
40	60,4	56,2	4,2	60,0	55,8	4,2	60,7	56,5	4,2
50	60,3	56,1	4,2	60,4	56,2	4,2	60,3	56,1	4,2
60	60,6	56,4	4,2	60,7	56,5	4,2	60,6	56,4	4,2

Температура земли 60оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	59,9	41,2	18,7	60,5	41,8	18,7	60,7	42	18,7
70	60,4	41,7	18,7	60,7	42	18,7	60,0	41,3	18,7
80	60,6	41,9	18,7	60,7	42	18,7	60,4	41,7	18,7
90	60,2	41,5	18,7	60,6	41,9	18,7	60,6	41,9	18,7
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,2	59,2	1	60,2	59,2	1	60,6	59,6	1
10	60,7	55,4	5,3	60,0	54,7	5,3	60,8	55,5	5,3
20	60,0	48,8	11,2	60,5	49,3	11,2	60,2	49	11,2
30	60,6	44,8	15,8	60,4	44,6	15,8	60,2	44,4	15,8
40	60,2	36,4	23,8	60,7	36,9	23,8	60,2	36,4	23,8
50	60,6	36,8	23,8	60,0	36,2	23,8	60,3	36,5	23,8
60	60,8	37	23,8	60,3	36,5	23,8	60,5	36,7	23,8
70	60,3	36,5	23,8	60,3	36,5	23,8	60,1	36,3	23,8
80	60,4	36,6	23,8	60,3	36,5	23,8	60,6	36,8	23,8
90	60,7	36,9	23,8	60,1	36,3	23,8	60,1	36,3	23,8
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,7	59,6	1,1	60,0	58,9	1,1	60,5	59,4	1,1
10	60,1	51,8	8,3	60,7	52,4	8,3	60,8	52,5	8,3
20	60,1	45,5	14,6	60,7	46,1	14,6	60,2	45,6	14,6
30	60,1	41,5	18,6	60,6	42	18,6	60,8	42,2	18,6
40	60,7	33,9	26,8	60,0	33,2	26,8	60,6	33,8	26,8
50	60,7	33,9	26,8	60,3	33,5	26,8	60,4	33,6	26,8
60	59,9	33,1	26,8	60,3	33,5	26,8	60,4	33,6	26,8

Температура земли 60оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
60	60,4	35,5	24,9	60,4	35,5	24,9	60,6	35,7	24,9
70	60,9	36	24,9	60,2	35,3	24,9	60,8	35,9	24,9
80	60,2	35,3	24,9	60,1	35,2	24,9	60,4	35,5	24,9
90	60,8	35,9	24,9	60,1	35,2	24,9	60,8	35,9	24,9
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,1	58,8	1,3	60,6	59,3	1,3	60,3	59	1,3
10	60,5	50,9	9,6	60,6	51	9,6	60,1	50,5	9,6
20	60,8	45,1	15,7	60,2	44,5	15,7	60,4	44,7	15,7
30	60,6	38	22,6	60,7	38,1	22,6	60,5	37,9	22,6
40	60,4	28,7	31,7	60,4	28,7	31,7	60,5	28,8	31,7
50	60,0	28,3	31,7	60,0	28,3	31,7	60,0	28,3	31,7
60	60,6	28,9	31,7	60,8	29,1	31,7	60,2	28,5	31,7
70	60,6	28,9	31,7	60,1	28,4	31,7	60,3	28,6	31,7
80	60,3	28,6	31,7	60,4	28,7	31,7	60,2	28,5	31,7
90	60,2	28,5	31,7	60,1	28,4	31,7	60,6	28,9	31,7
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	60,2	58,6	1,6	60,2	58,6	1,6	60,8	59,2	1,6
10	60,4	48,9	11,5	60,6	49,1	11,5	60,5	49	11,5
20	60,4	36,7	23,7	60,1	36,4	23,7	60,3	36,6	23,7
30	60,7	29,9	30,8	60,0	29,2	30,8	60,4	29,6	30,8
40	60,7	25,1	35,6	60,8	25,2	35,6	60,7	25,1	35,6
50	60,4	24,8	35,6	60,0	24,4	35,6	60,7	25,1	35,6
60	60,2	24,6	35,6	60,3	24,7	35,6	60,4	24,8	35,6

Продолжение приложения Г

Температура земли 60оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	59,9	55,7	4,2	60,2	56	4,2	60,2	56	4,2
80	60,3	56,1	4,2	60,3	56,1	4,2	60,4	56,2	4,2
90	60,7	56,5	4,2	60,0	55,8	4,2	60,0	55,8	4,2

Температура земли 60оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	60,6	33,8	26,8	60,8	34	26,8	60,1	33,3	26,8
80	59,9	33,1	26,8	60,7	33,9	26,8	60,2	33,4	26,8
90	60,5	33,7	26,8	60,1	33,3	26,8	60,8	34	26,8

Температура земли 60оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	60,0	24,4	35,6	60,1	24,5	35,6	60,5	24,9	35,6
80	60,6	25	35,6	60,7	25,1	35,6	60,0	24,4	35,6
90	60,3	24,7	35,6	60,7	25,1	35,6	60,6	25	35,6

Заведующий лаборатории
кафедры теплотехники и теплоэнергетики

А. Широкий

Широкий Алексей Юрьевич

Продолжение приложения Г

ПРОТОКОЛ №4 от 18.07.2024

Используемый образец: геотермальный термосифон Двн=50 мм, Двнеш=75 мм, Н=0,5-2,0 м
Исходные данные: температура земли 70°C

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Температура земли 70°C									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,7	70	0,7	70,0	69,3	0,7	70,6	69,9	0,7
10	70,9	70	0,9	70,0	69,1	0,9	70,3	69,4	0,9
20	70,7	69,5	1,2	70,1	68,9	1,2	70,6	69,4	1,2
30	70,5	68,9	1,6	70,3	68,7	1,6	70,6	69	1,6
40	70,1	67,9	2,2	70,8	68,6	2,2	70,7	68,5	2,2
50	69,9	67,7	2,2	69,9	67,7	2,2	70,8	68,6	2,2
60	70,2	68	2,2	69,9	67,7	2,2	70,6	68,4	2,2
70	70,5	68,3	2,2	70,5	68,3	2,2	70,8	68,6	2,2
80	70,4	68,2	2,2	70,1	67,9	2,2	70,3	68,1	2,2
90	70,9	68,7	2,2	70,2	68	2,2	70,6	68,4	2,2
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	69,9	69,1	0,8	70,1	69,3	0,8	70,6	69,8	0,8
10	70,4	69,1	1,3	70,1	68,8	1,3	70,1	68,8	1,3
20	70,7	69,0	1,7	69,9	68,2	1,7	70,7	69	1,7
30	70,0	67,6	2,4	70,4	68	2,4	70,3	67,9	2,4
40	70,2	66,9	3,3	70,1	66,8	3,3	70,8	67,5	3,3
50	70,4	67,1	3,3	70,8	67,5	3,3	70,5	67,2	3,3
60	70,6	67,3	3,3	69,9	66,6	3,3	70,2	66,9	3,3

Температура земли 70°C									
С разделятелем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,6	69,5	1,1	70,4	69,3	1,1	70,7	69,6	1,1
10	70,5	68,1	2,4	70,3	67,9	2,4	70,1	67,7	2,4
20	70,2	64,5	5,7	70,2	64,5	5,7	70,7	65	5,7
30	70,0	61,8	8,2	70,3	62,1	8,2	70,2	62	8,2
40	70,2	56,3	13,9	70,5	56,6	13,9	69,9	56	13,9
50	70,0	56,1	13,9	69,9	56	13,9	70,8	56,9	13,9
60	70,3	56,4	13,9	70,0	56,1	13,9	70,1	56,2	13,9
70	70,6	56,7	13,9	70,5	56,6	13,9	70,2	56,3	13,9
80	70,0	56,1	13,9	70,3	56,4	13,9	70,8	56,9	13,9
90	70,7	56,8	13,9	70,4	56,5	13,9	69,9	56	13,9
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,8	69,4	1,4	70,0	68,6	1,4	70,0	68,6	1,4
10	70,2	64,8	5,4	69,9	64,5	5,4	70,2	64,8	5,4
20	70,5	62,7	7,8	70,0	62,2	7,8	70,5	62,7	7,8
30	70,0	51,7	18,3	70,1	51,8	18,3	70,1	51,8	18,3
40	70,7	49,5	21,2	70,7	49,5	21,2	70,2	49	21,2
50	70,1	48,9	21,2	70,5	49,3	21,2	70,1	48,9	21,2
60	69,9	48,7	21,2	70,3	49,1	21,2	70,5	49,3	21,2

Температура земли 70°C									
С теплоизолированным разделятелем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
0,5 м			0,5 м			0,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,9	69,6	1,3	70,8	69,5	1,3	70,2	68,9	1,3
10	70,2	65,9	4,3	70,7	66,4	4,3	70,3	66	4,3
20	70,8	62,5	8,3	70,6	62,3	8,3	70,5	62,2	8,3
30	70,5	57,9	12,6	70,5	57,9	12,6	70,0	57,4	12,6
40	69,9	51,4	18,5	70,5	52	18,5	70,4	51,9	18,5
50	70,6	52,1	18,5	70,2	51,7	18,5	69,9	51,4	18,5
60	70,7	52,2	18,5	70,8	52,3	18,5	70,2	51,7	18,5
70	70,2	51,7	18,5	70,1	51,6	18,5	70,7	52,2	18,5
80	70,2	51,7	18,5	70,4	51,9	18,5	70,5	52	18,5
90	70,9	52,4	18,5	70,5	52	18,5	70,2	51,7	18,5
1,0 м			1,0 м			1,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,2	68,9	1,3	70,0	68,7	1,3	70,1	68,8	1,3
10	70,2	64,0	6,2	70,8	64,6	6,2	70,7	64,5	6,2
20	70,7	59,4	11,3	70,5	59,2	11,3	70,5	59,2	11,3
30	70,2	54,9	15,3	70,3	55	15,3	70,4	55,1	15,3
40	70,6	42,4	28,2	70,7	42,5	28,2	70,5	42,3	28,2
50	70,7	42,5	28,2	70,1	41,9	28,2	70,4	42,2	28,2
60	70,8	42,6	28,2	70,2	42	28,2	70,7	42,5	28,2

Продолжение приложения Г

Температура земли 70оС									
Без разделителя									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	70,6	67,3	3,3	70,6	67,3	3,3	70,0	66,7	3,3
80	70,1	66,8	3,3	70,2	66,9	3,3	70,5	67,2	3,3
90	69,9	66,6	3,3	70,8	67,5	3,3	69,9	66,6	3,3
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,8	69,7	1,1	70,1	69	1,1	70,7	69,6	1,1
10	70,4	68,2	2,2	70,3	68,1	2,2	70,4	68,2	2,2
20	70,7	67,8	2,9	70,2	67,3	2,9	70,5	67,6	2,9
30	70,4	66,8	3,6	70,8	67,2	3,6	70,6	67	3,6
40	70,0	65,3	4,7	70,2	65,5	4,7	70,5	65,8	4,7
50	70,4	65,7	4,7	70,4	65,7	4,7	70,0	65,3	4,7
60	70,5	65,8	4,7	70,6	65,9	4,7	70,8	66,1	4,7
70	70,1	65,4	4,7	70,8	66,1	4,7	70,5	65,8	4,7
80	70,2	65,5	4,7	70,4	65,7	4,7	70,4	65,7	4,7
90	70,6	65,9	4,7	70,5	65,8	4,7	70,4	65,7	4,7
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,0	68,9	1,1	70,3	69,2	1,1	69,9	68,8	1,1
10	70,1	67,5	2,6	70,1	67,5	2,6	70,3	67,7	2,6
20	70,0	66,7	3,3	70,3	67	3,3	70,0	66,7	3,3
30	69,9	65,7	4,2	70,2	66	4,2	70,0	65,8	4,2
40	70,6	65,5	5,1	69,9	64,8	5,1	69,9	64,8	5,1
50	70,0	64,9	5,1	70,3	65,2	5,1	69,9	64,8	5,1
60	70,3	65,2	5,1	70,7	65,6	5,1	69,9	64,8	5,1
70	70,0	64,9	5,1	70,7	65,6	5,1	69,9	64,8	5,1

Температура земли 70оС									
С разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	69,9	48,7	21,2	70,3	49,1	21,2	70,1	48,9	21,2
80	70,4	49,2	21,2	70,5	49,3	21,2	70,6	49,4	21,2
90	70,0	48,8	21,2	70,0	48,8	21,2	70,3	49,1	21,2
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,2	68,4	1,8	70,8	69	1,8	70,4	68,6	1,8
10	70,5	64,2	6,3	70,7	64,4	6,3	70,1	63,8	6,3
20	70,7	59,1	11,6	70,3	58,7	11,6	70,1	58,5	11,6
30	70,1	49	21,1	70,0	48,9	21,1	70,2	49,1	21,1
40	70,4	40,5	29,9	69,9	40	29,9	70,4	40,5	29,9
50	70,0	40,1	29,9	70,0	40,1	29,9	70,5	40,6	29,9
60	70,3	40,4	29,9	70,3	40,4	29,9	70,4	40,5	29,9
70	70,1	40,2	29,9	70,6	40,7	29,9	70,3	40,4	29,9
80	70,7	40,8	29,9	70,0	40,1	29,9	70,5	40,6	29,9
90	70,6	40,7	29,9	70,7	40,8	29,9	70,3	40,4	29,9
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	69,9	67,8	2,1	70,1	68	2,1	70,4	68,3	2,1
10	70,3	61,2	9,1	70,8	61,7	9,1	69,9	60,8	9,1
20	70,0	55,7	14,3	69,9	55,6	14,3	70,1	55,8	14,3
30	70,4	47,2	23,2	70,0	46,8	23,2	70,6	47,4	23,2
40	70,5	38	32,5	70,2	37,7	32,5	70,0	37,5	32,5
50	70,4	37,9	32,5	70,4	37,9	32,5	70,7	38,2	32,5
60	70,0	37,5	32,5	70,2	37,7	32,5	70,3	37,8	32,5
70	70,1	37,6	32,5	69,9	37,4	32,5	70,1	37,6	32,5

Температура земли 70оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1			Опыт 2			Опыт 3			
70	70,3	42,1	28,2	69,9	41,7	28,2	70,4	42,2	28,2
80	70,2	42	28,2	70,2	42	28,2	70,8	42,6	28,2
90	70,0	41,8	28,2	70,7	42,5	28,2	70,6	42,4	28,2
1,5 м			1,5 м			1,5 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	69,9	68,4	1,5	70,3	68,8	1,5	70,0	68,5	1,5
10	70,1	61,9	8,2	70,8	62,6	8,2	70,0	61,8	8,2
20	70,6	55,8	14,8	70,3	55,5	14,8	70,7	55,9	14,8
30	70,2	44,4	25,8	70,8	45	25,8	70,0	44,2	25,8
40	70,1	30,3	39,8	70,5	30,7	39,8	70,0	30,2	39,8
50	69,9	30,1	39,8	70,3	30,5	39,8	70,4	30,6	39,8
60	70,7	30,9	39,8	70,5	30,7	39,8	70,7	30,9	39,8
70	70,6	30,8	39,8	70,1	30,3	39,8	70,0	30,2	39,8
80	70,4	30,6	39,8	70,1	30,3	39,8	70,3	30,5	39,8
90	70,1	30,3	39,8	70,5	30,7	39,8	70,8	31	39,8
2,0 м			2,0 м			2,0 м			
мин	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt	t1	t2	Δt
5	70,5	68,7	1,8	70,5	68,7	1,8	70,3	68,5	1,8
10	70,5	56,8	13,7	70,1	56,4	13,7	70,0	56,3	13,7
20	70,7	47,9	22,8	70,5	47,7	22,8	70,5	47,7	22,8
30	70,0	35,4	34,6	70,0	35,4	34,6	70,1	35,5	34,6
40	70,5	27,3	43,2	70,6	27,4	43,2	70,5	27,3	43,2
50	70,8	27,6	43,2	70,1	26,9	43,2	70,4	27,2	43,2
60	70,0	26,8	43,2	70,5	27,3	43,2	70,8	27,6	43,2
70	70,6	27,4	43,2	70,4	27,2	43,2	70,3	27,1	43,2

Продолжение приложения Г

Температура земли 70оС									
Без разделителя									
Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3					
80	70,3	65,2	5,1	70,3	65,2	5,1	70,1	65	5,1
90	70,3	65,2	5,1	70,3	65,2	5,1	70,1	65	5,1

Температура земли 70оС									
С разделителем									
Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3					
80	70,2	37,7	32,5	70,2	37,7	32,5	69,9	37,4	32,5
90	70,2	37,7	32,5	70,8	38,3	32,5	70,5	38	32,5

Температура земли 70оС									
С теплоизолированным разделителем									
Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3					
80	70,2	27	43,2	69,9	26,7	43,2	70,1	26,9	43,2
90	70,1	26,9	43,2	70,2	27	43,2	70,4	27,2	43,2

Заведующий лаборатории
кафедры теплотехники и теплоэнергетики

Широкий Алексей Юрьевич

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Значение критерия Кохрана (Р=0,95)

N	$f = k-1$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	0,999	0,975	0,939	0,906	0,877	0,853	0,833	0,816
3	0,967	0,871	0,798	0,746	0,707	0,677	0,653	0,633
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,637	0,518
5	0,841	0,684	0,598	0,544	0,507	0,478	0,456	0,439
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418	0,398	0,382
7	0,727	0,561	0,480	0,431	0,397	0,373	0,354	0,338
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,336	0,319	0,304
9	0,609	0,478	0,403	0,358	0,329	0,307	0,290	0,277
10	0,602	0,445	0,373	0,331	0,303	0,282	0,267	0,254
12	0,541	0,392	0,326	0,288	0,262	0,244	0,230	0,219
15	0,471	0,335	0,276	0,242	0,220	0,203	0,191	0,192
20	0,389	0,271	0,221	0,192	0,174	0,160	0,150	0,142

Примечания. P – доверительная вероятность; N – число экспериментов; k – число параллельных опытов.