

ФЕДОТКИНА АНАСТАСИЯ НИКОЛАЕВНА

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

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург
2026**

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Научный руководитель – **Лебедев Владимир Александрович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

Официальные оппоненты: **Митяков Владимир Юрьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы атомной и тепловой энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого»

Савченкова Наталья Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «ЦКТИ»)

Защита состоится «22» апреля 2026 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.11 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. СПб, ул. Ивана Черных, д. 4, <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095 Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении учёных степеней).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент
Соколова Виктория Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Вопросы 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 соответствия 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.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы; проведение численных и экспериментальных исследований; определении основных параметров рекомендуемой технологии по трансферу геотермальной энергии; подготовке публикаций.

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 118 страницах, содержит 21 рисунок и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и идея работы, поставлены основные задачи исследования, описана научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена классификация современных технологий, учитывающая их разнообразие. Методом анализа иерархии геотермальный термосифон определен как рациональный способ трансфера тепла в зависимости от условий внешней среды. Разработан модернизированный подход к интегральной оценке критериев, основанный на комбинации двух ключевых процедур: свертки множества исходных критериев до четырех ключевых показателей (стоимость, энергоэффективность, экологичность, срок службы) и последующего сравнения технологий через расчет расстояния их нормализованных параметров до "идеальной точки". Для этого разнородные критерии приводятся к безразмерному виду в диапазоне от 0 до 1 с использованием формул нормализации для максимизируемых и минимизируемых параметров. В результате проведения анализа выбора технологий оптимальной признается технология с минимальным расстоянием до "идеальной точки", что показывает лидерство термосифона с естественной циркуляцией (расстояние = 0,5). Определены цели и задачи исследования.

Во второй главе на основе выполненного анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме работы предложены технические и

технологические решения для увеличения энергетической эффективности ГТЕЦ.

Предложенная новая конструкция ГТЕЦ состоит из следующих конструктивных решений: разделитель сред восходящих и нисходящих потоков; направляющая воронка; концевые крышки, выполненные из материала с высоким коэффициентом теплопроводности (рис. 1).

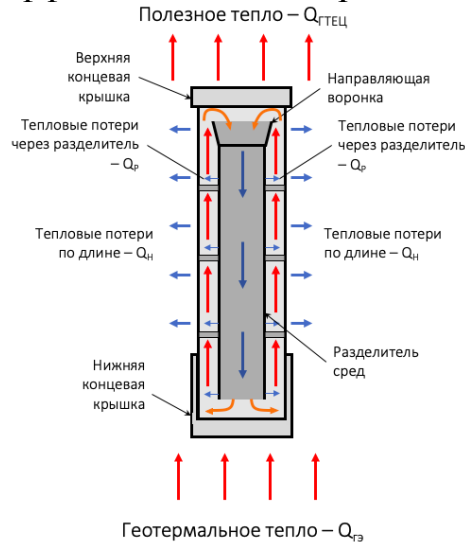


Рис. 1 – Устройство для транспортирования геотермальной энергии – геотермальный термосифон с естественной циркуляцией

Внедрение 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 эффективный теплообмен между термосифоном и окружающей средой. Высокая теплопроводность материала способствует равномерному распределению тепла по поверхности крышек, что снижает локальные перегревы и минимизирует тепловое сопротивление. В качестве рабочего тела в ГТЕЦ рассматривается вода. Эффективность применения ГТЕЦ зависит от геотермической ступени, так как она обусловлена повышением температуры горных пород на 1°C с увеличением глубины в земной коре. Геотермическая ступень по России определяется от 5 до $170 \text{ м}/^{\circ}\text{C}$ в зависимости от региона и глубины залегания.

Разработана математическая модель функционирования ГТЕЦ, основанная на передаче тепла от недр Земли и получении полезной теплоты с помощью естественной циркуляции внутри ГТЕЦ.

Математическая модель представляет систему дифференциальных 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.

Система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} + v \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \frac{\sigma}{\rho_1 c_1} \alpha_1 (t(x, \tau) - T(R, x, \tau)) \quad (1)$$

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

Начальные условия:

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

Граничные условия на границе раздела грунт-теплоноситель:

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

где v – скорость течения теплоносителя по трубе, м/с, $\sigma = 2/R$ отношение площади поверхности теплоносителя к его объему, 1/м, R – радиус ГТЕЦ, м, α_1 – коэффициент теплоотдачи границы раздела теплоносителя и грунта Земли, который определяется геометрическими характеристиками системы и тепловыми свойствами грунта, Вт/(м²·К), ρ_1, c_1 – плотность и теплоемкость теплоносителя, τ – время, сек, t – текущая температура теплоносителя, °С, T – температура грунта Земли, °С, x – координата вдоль ГТЕЦ, м, λ_2, ρ_2, c_2 – теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность грунта Земли.

При $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ и вводе массового расхода $G = \rho_1 \cdot v \cdot F$, уравнение (1) преобразуется к виду, описывающему изменение теплосодержания потока вдоль координаты x :

$$G \cdot c_p \cdot \frac{dt}{dx} = -q_L(x) \quad (3)$$

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):

$$q_L(x) = k \cdot \pi \cdot D \cdot (t(x) - T_{\text{гр}}(x)) \quad (4)$$

Окончательный вид дифференциального уравнения:

$$\frac{dt}{dx} = - \frac{k \cdot \pi \cdot D}{G \cdot c_p} \cdot (t(x) - T_{\text{гр}}(x)) \quad (5)$$

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

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):

$$\frac{dp}{dx} = -\rho \cdot g \cdot \cos\theta - \left(\frac{\lambda}{D_3} \right) \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (6)$$

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.

1. Тепловой баланс:

$$Q_{\text{ГЭ}} = Q_{\text{Н}} + Q_{\text{Р}} + Q_{\text{ГТЕЦ}} \quad (7)$$

при $Q_H = \frac{2\pi\lambda_{\text{ГТЕЦ}}H\Delta T}{\ln \frac{D_6}{D_M}}$ - 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 $Q_R = \frac{\Delta T_{\text{раздел}}}{R_{\text{раздел}}}$ - тепловые потери через разделитель, Вт, где $\Delta T_{\text{раздел}}$ - разность температур теплоносителя между горячей и холодной средой, °С, $R_{\text{раздел}}$ - тепловое сопротивление разделителя, (м²К) /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, °С, Δh - изменение глубины залегания ГТЕЦ, м.

2. Уравнение движения:

$$P_{\text{дв}} = \Delta P_{\text{под}} + \Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{цк}} \quad (8)$$

где $P_{\text{дв}}$ - движущий напор естественной циркуляции в контуре ГТЕЦ, Па, $\Delta P_{\text{цк}}$ - полезный напор циркуляции в контуре ГТЕЦ, Па, $\Delta P_{\text{под}}$ - напор, действующий в подъемной части контура, Па, $\Delta P_{\text{оп}}$ - напор, действующий в опускной части контура, Па.

3. Уравнения сплошности потока:

$$G = v \cdot \rho \cdot F \quad (9)$$

где F - площадь проходного сечения контура, м².

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 (рис. 2). Полученные результаты были использованы в расчетах для определения количества передаваемой по контуру ГТЕЦ теплоты.

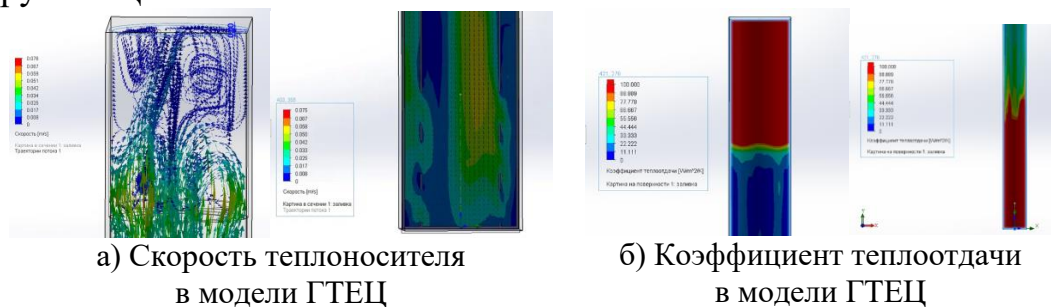


Рис. 2 – Компьютерное моделирование работы модели ГТЕЦ

На основании проведенных расчетов устанавливается количество теплоты, переносимой ГТЕЦ, с учетом тепловых потерь в случаях с разделителем и без разделителя сред восходящих и нисходящих потоков (рис. 3).

Количество транспортируемой тепловой энергии с помощью ГТЭС с внедренным разделителем сред восходящих и нисходящих потоков по результату математического моделирования увеличивается на 20% в сравнении с ГТЭС без разделителя сред.

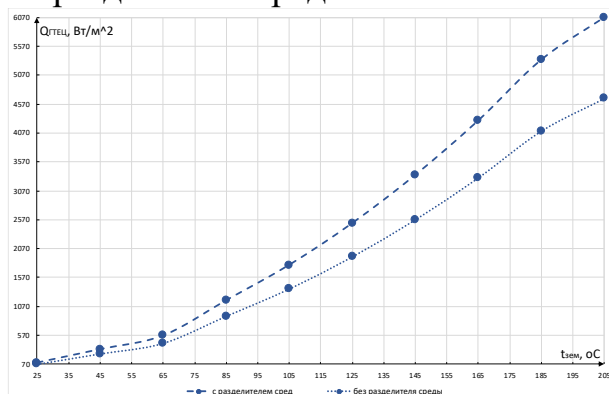


Рис. 3 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры залегания грунта при наличии и отсутствии разделителя сред

В геотермальный термосифон с естественной циркуляцией для увеличения энергетической эффективности предложено внедрить теплоизолированный слой на разделитель сред восходящих и нисходящих потоков, выполненный из материала с низким коэффициентом теплопроводности. Теплоизоляционный материал с низким коэффициентом теплопроводности (например, пенополиуретан) снижает утечки тепла через стенки разделителя между восходящими и нисходящими потоками. Для исследования зависимостей работы ГТЭС предложено усовершенствовать математическую модель. Тепловые потери на границе разделения горячей и холодной среды необходимо оценить с учетом теплового сопротивления разделителя при наличии теплоизолированного материала на внешней стороне разделителя сред.

Результаты математического моделирования при внедрении теплоизолированного слоя на разделителе сред представлены на рис.4.

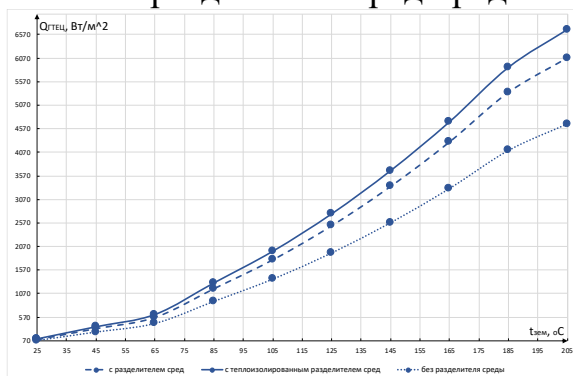


Рис. 4 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры залегания грунта при наличии и отсутствии теплоизолированного разделителя сред

Результаты расчета показали, что внедрение теплоизолированного слоя на внутреннем разделителе сред восходящих и нисходящих потоков позволяет увеличить энергетическую эффективность на 10 %.

В третьей главе описана программа и методика проведения двухфакторного эксперимента. Проведены исследования транспортируемого

количества теплоты в зависимости от наличия теплоизолированного разделителя сред.

Для исследования зависимости транспортируемой тепловой энергии от высоты ГТЕЦ и введения конструктивного разделителя сред рабочего тела внутри системы была изготовлена экспериментальная модель (рис. 5). Модель состоит из стальных трубных секций диаметром 75 мм, которые соединяются переходниками. Высота каждой секции составляет 500 мм.

В нижней и верхней части установки герметично закреплена верхняя и нижняя концевая крышка. В полости внешней секции коаксиально установлен внутренний разделитель сред, состоящий из стальных трубных секций диаметром 50 мм, которые соединяются переходниками. 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 (рис.6).



Рис. 5 – Внешний вид экспериментальной установки при $H=2,0$ м

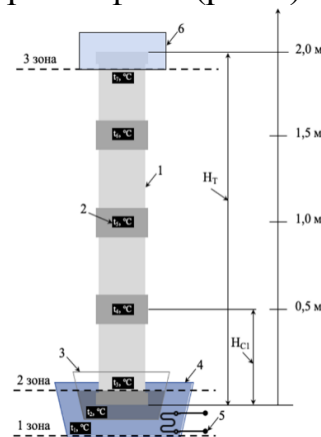


Рис. 6 – Схема экспериментальной модели:
1 – термосифон с естественной; 2 – цифровые термометры; 3 – емкость с речным песком; 4 – емкость с подогреваемой водой; 5 – погружной спиральный кипятильник; 6 – емкость со льдом

В экспериментальной установке выделены 3 тепловые зоны (рис.6).

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. Эксперимент проводился при поддержании температуры в предполагаемых горных породах для четырех температурных режимов: 40°C , 50°C , 60°C и 70°C и для четырех конфигураций высоты установки: 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, 2,0 м.

Зона 2 – зона активного теплопереноса внутри экспериментальной модели.

Зона 3 – зона пониженного температурного потенциала, в которой искусственно происходит теплоотбор с помощью льда.

В обозначенных зонах установлены цифровые термометры с выносным датчиком диапазоном измерения от -50°C до 100°C .

Разность значений температур в зоне 2 и 3 определяет интенсивность процесса транспортирования тепла с помощью термосифона, и, как следствие, определяет эффективность функционирования экспериментальной модели. Поэтому в установившемся режиме в начале и в конце зоны 2 температура теплоносителя должна оставаться постоянной.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе исследование проводилось без разделителя сред восходящих и нисходящих потоков внутри установки. На втором этапе в модель был введён конструктивный разделитель сред для разделения восходящих и нисходящих потоков.

При проведении эксперимента температура грунта поддерживалась на заданных значениях для каждого режима и каждой из четырёх конфигураций модели. Показания с цифровых термометров регистрировались с интервалом в 5 минут. Абсолютная погрешность цифрового термометра от 0,5 до 2 °С.

Результаты первого этапа эксперимента показали, что через 40 минут работы системы температура теплоносителя во 2 зоне стабилизируется, что свидетельствует о переходе геотермального термосифона с естественной циркуляцией в стационарный тепловой режим (рис. 7).

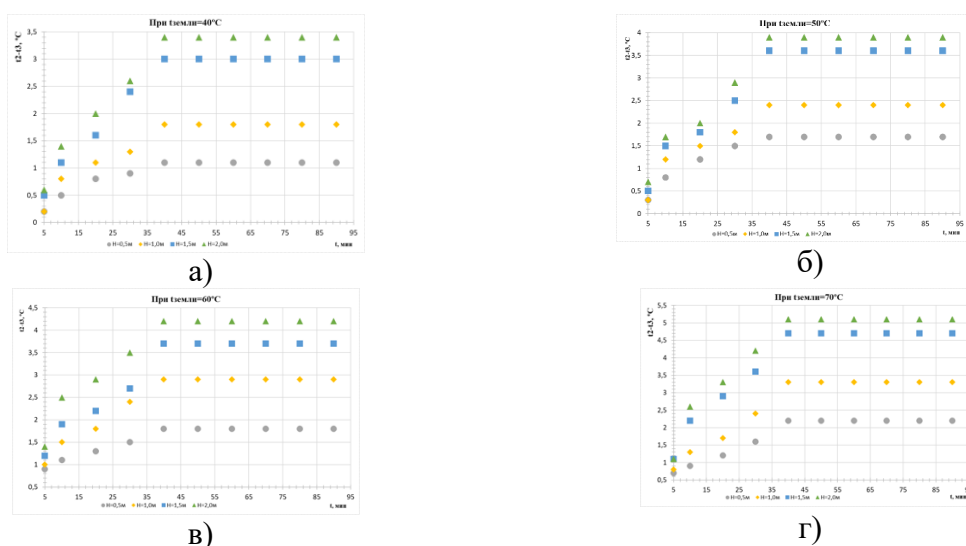
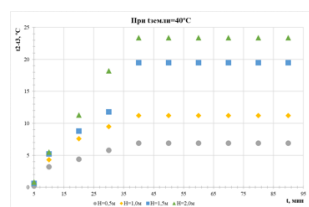


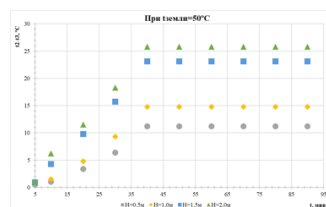
Рис. 7 – Эксперимент с вариацией температур модели грунтового массива и высоты экспериментальной установки без разделителя: а) при температуре грунтового массива 40°C; б) при температуре грунтового массива 50°C; в) при температуре грунтового массива 60°C; г) при температуре грунтового массива 70°C

Разность температур в начале и в конце 2 зоны ($\Delta t = t_1 - t_2$) сохраняет постоянное значение, что подтверждает необходимость проведения расчетов интенсивности теплового потока именно в этот период стабильной работы системы. Экспериментальное исследование демонстрируют, что модель ГТЕЦ длиной 2,0 м при температуре грунта 70°C обеспечивает теплопередачу мощностью 384 Вт/м².

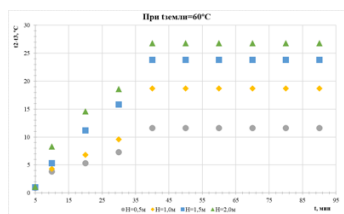
На втором этапе исследований серия параллельных опытов проводилась с использованием модифицированной модели ГТЕЦ, оснащенной конструктивным разделителем сред для сепарации восходящих и нисходящих потоков. Результаты показали, что температурный перепад в начале и в конце 2 зоны стабилизируется через 40 минут работы модели (рис. 8).



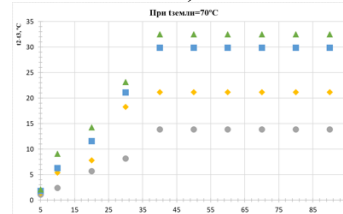
а)



б)



в)



г)

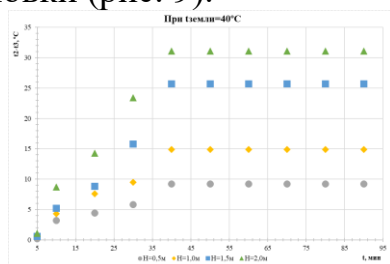
Рис.8 – Эксперимент с вариацией температур модели грунтового массива и высоты экспериментальной установки с разделителем: а) при температуре грунтового массива 40°C; б) при температуре грунтового массива 50°C; в) при температуре грунтового массива 60°C; г) при температуре грунтового массива 70°C

При температуре грунта 70°C и длине установки 2,0 м зафиксирована тепловая мощность 462 Вт/м², что демонстрирует 20% увеличение эффективности относительно ГТЕЦ без разделителя сред.

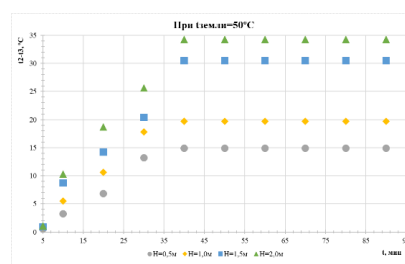
Для практического исследования зависимости внедренного теплоизолированного слоя на разделителе сред восходящих и нисходящих потоков был проведен третий этап эксперимента при нанесении жидкого теплоизолированного слоя на внешнюю часть разделителя сред.

Серия параллельных опытов третьего этапа проходила при одинаковых условиях с опытами первого и второго этапа.

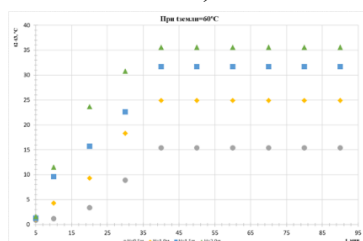
Результаты опытов на третьем этапе показали, что температурный перепад в верхней и в нижней 2 зоне стабилизируется через 40 минут работы установки (рис. 9).



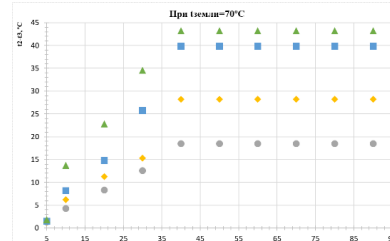
а)



б)



в)



г)

Рис. 9 – Эксперимент с вариацией температур модели грунтового массива и высоты экспериментальной установки с теплоизолированным разделителем: 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

При температуре грунта 70°C и длине установки 2,0 м зафиксирована тепловая мощность 476 Вт/м², что демонстрирует увеличение эффективности относительно модели ГТЕЦ с разделителем сред без теплоизолированного слоя на 10 %.

По результатам проведения трех экспериментальных исследований производилась проверка воспроизводимости опытов и однородность ряда дисперсии. Вычислена оценка дисперсии для каждого эксперимента с учетом проведенных трех параллельных опытов и произведён расчет практического и теоретического значения числа Кохрана, соответственно $G_p=0,350$ и $G_T=0,768$.

Так как выполняется условие $G_p \leq G_T$, следовательно опыты считаются воспроизводимыми, а ряд дисперсий – однородным.

Выведена регрессионная модель определения количества теплоты, зависящая от длины установки и температуры грунта.

Регрессионная модель процесса трансфера тепловой энергии с помощью ГТЕЦ имеет вид:

$$y = 1,507 + 0,492 \cdot X_1 - 0,619 \cdot X_2 - 0,213 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (4)$$

где X_1 – входной фактор, описывающий изменение температура земли, °C; X_2 – входной фактор, описывающий изменение длины экспериментальной модели, м.

Для перехода к модели с физическими переменными (x_i) необходимо воспользоваться регрессионной моделью вида:

$$y_1 = 1,507 + 0,492 \cdot x_1 - 0,619 \cdot x_2 - 0,213 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (5)$$

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

Результат математического моделирования и полученной регрессионной модели процесса трансфера тепловой энергии с помощью ГТЕЦ отражен на графике (рис. 10).

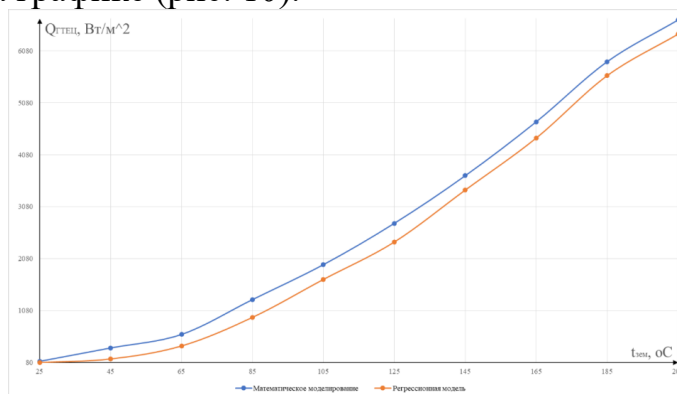


Рис. 10 – График зависимости вырабатываемой тепловой мощности от температуры залегания грунта при математическом моделировании и регрессионной модели

Представленные зависимости изменения тепловой энергии от температуры грунта земли подтверждают адекватность математической модели и результаты эксперимента.

В четвертой главе произведено технико-экономическое обоснование применения ГТЕЦ в сравнении с геотермальным термосифоном с принудительной циркуляцией, экономическая эффективность составляет 10%. Рассчитанный срок окупаемости применения ГТЕЦ составляет 4 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе предложенной классификации существующих технологий определен рациональный метод трансфера геотермальной энергии – геотермальный термосифон. С помощью усовершенствованного метода интегральной оценки произведен анализ основных типов транспортирования геотермальной энергии, выбрана наиболее эффективная технология трансфера тепла – геотермальный термосифон с естественной циркуляцией.

2. Предложено внедрение в ГТЕЦ внутреннего разделителя сред восходящих и нисходящих потоков, направляющей воронки для предотвращения смешения потоков теплоносителя, при которых минимизируются потери тепла за счет тепломассообмена между средами, а также концевых крышек на ГТЕЦ, выполненных из материала с высоким коэффициентом теплопроводности.

3. 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%.

4. Экспериментальным путем доказано, что внедрение разделителя сред восходящих и нисходящих потоков позволяет увеличить энергетическую эффективность работы ГТЕЦ на 20% и внедрение теплоизолированного слоя на разделителе сред увеличивает энергетическую эффективность работы ГТЕЦ на 10%.

5. Техничко-экономическое обоснование применения ГТЕЦ показал, что в сравнении с альтернативной технологией по транспортированию тепловой энергии (геотермальный термосифон с принудительной циркуляцией) экономичнее на 10 %. Срок окупаемости ГТЕЦ составляет 4 года.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в проектной и конструкторской документации при разработке систем транспортирования геотермальной энергии, при выполнении научно-исследовательских работ в области повышения эффективности теплоэнергетических систем, а также в учебном процессе для направления подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. 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.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

3. 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>.

4. Лебедев В.А., Зайцева Е.А., Горина О.Л., Федоткина А.Н. Исследование процесса переноса геотермального тепла с помощью геотермального термосифона с естественной циркуляцией. Горная промышленность. 2025;(2):114–122. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-114-122>.

Объекты интеллектуальной собственности

5. Патент на полезную модель № 222634 U1 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.

Тезисы докладов

6. Федоткина, А. Н. Уменьшение потерь теплоты нефтепровода с использованием низкопотенциального геотермального тепла / А. Н. Федоткина // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. Том 5. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 225-226. – EDN DTCAVD.

7. 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.

8. Федоткина, А. Н. Уменьшение тепловых потерь нефтяного трубопровода с помощью тепловых труб с естественной циркуляцией / 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.

9. 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.

10. 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.