

ЕРДЕШ ЕЛНАР БАҚЫТХАНҰЛЫ

Термодинамическая оптимизация систем грунтовых тепловых насосов с четырьмя тепловыми резервуарами

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени
доктора философии (PhD) по образовательной программе
«8D05403 – Механика»

Актуальность исследования. Отопление – один из самых энерго- и углеродоёмких видов конечного потребления в холодном континентальном климате (например, в Казахстане). Зависимость от угольных и газовых котлов ведёт к выбросам CO₂ и смогу, а значительный перепад зимних температур затрудняет поддержание эффективности. Грунтовые тепловые насосы (ГТН) – перспективный путь декарбонизации благодаря стабильным подземным температурам и высокой сезонной эффективности, но их внедрение ограничено высокими затратами на бурение, сезонным тепловым дисбалансом вокруг скважин и тесной взаимосвязью конструктивных решений (хладагента, размера теплообменника и рабочих температур).

С научной точки зрения сохраняется разрыв между компонентными исследованиями и системной термодинамической теорией, учитывающей конечные скорости теплообмена, необратимости и генерации энтропии. Опора на идеализированные/стационарные модели и упрощённые абстракции резервуаров размывает понимание того, как распределять ресурсов теплообменников. Без такой рамки невозможно надёжно предсказывать потери COP при больших температурных подъёмах, количественно оценивать эффективность и теплоёмкостный расход теплообменников и формулировать устойчивые правила ограничения долгосрочного охлаждения грунта в условиях зимних нагрузок.

С практической точки зрения требуются обоснованные, учитывающие климатические условия рекомендации для масштабирования ГТН с соблюдением экологических целей. Выбор хладагентов с низкими ППП (потенциалом глобального потепления), размера скважин и задание рабочих температур определяют не только эффективность и надёжность, но воздействие на окружающую среду (TEWI – total equivalent warming impact). В континентальных климатах с длинным отопительным сезоном и высокими пиками верифицированные термодинамико-экологические критерии снижают инвестиционные риски, помогают расставлять приоритеты ограниченного капитала (площадь теплообменников) и обеспечивают устойчивое сокращение выбросов и модернизацию систем теплоснабжения в соответствии с национальными стратегиями декарбонизации.

Целью данного исследования является разработка теоретических и методологических основ термодинамической оптимизации систем ГТН на основе интеграции моделей конечной термодинамики (FTT – finite time

thermodynamics), анализа 3Е (энергетического, эксергетического, экологического) и экспериментальной проверки в условиях континентального климата.

Задачи исследования:

- Разработать методологию FTT оптимизации для ГТН с четырьмя теплообменниками.
- Сформулировать многопараметрическую оптимизацию для заданных условий эксплуатации.
- Провести параметрические анализы эффективности теплообменников, теплоёмкостных расходов и необратимостей.
- Разработать и валидировать 3Е-подход с использованием данных по ГТН Алматы.
- Предоставить рекомендации по проектированию и эксплуатации для континентального климата.

Объект исследования: системы грунтовых тепловых насосов для отопления в условиях континентального климата.

Предмет исследования: термодинамическая оптимизация производительности ГТН с акцентом на необратимость процесса, распределение ресурсов теплообменников, выбор хладагента и компромиссы между эффективностью и экологическими показателями.

Методы исследования объединяют моделирование термодинамики конечного времени (FTT) с энерго-эксергетическим анализом и экологической оценкой для оптимизации характеристик ГТН. Рабочий процесс включает численное моделирование, экспериментальные испытания и сравнительный анализ с данными измерений и опубликованными исследованиями.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Унифицированная модель конечно-временной термодинамики (FTT) для ГТН, которая учитывает взаимодействие цикла и резервуара на системном уровне через четыре теплообменника.
2. Новые критерии оптимизации для эксплуатации при заданных условиях – в частности, при заданных скоростях отбора тепла из грунта и подачи тепла потребителю.
3. Моделирование необратимости теплового насоса, позволяющее вывести оптимальные правила распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов.
4. Комплексный, валидированный 3Е (энергетический, эксергетический, экологический) анализ производительности ГТН, подтверждённый экспериментальными данными, полученными при эксплуатации в условиях континентального климата.
5. Обобщённые правила проектирования для распределения ресурсов теплообменников, выбора хладагента, и рабочих температур, применимые к континентальному климату.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Данная работа способствует развитию термодинамической оптимизации путем разработки модели FTT для ГТН, которая явно учитывает необратимости и конечные скорости теплообмена и тем самым выводит новые критерии для навязанных условий эксплуатации, а также правила распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов. В сочетании с проверенным анализом 3Е, выполненным на основе полевых данных в Алматы, она обеспечивает единую методологию на системном уровне.

На практике результаты предлагают практическое руководство по распределению ресурсов теплообменников, выбору хладагента с низким ПГП и рабочим температурам в условиях континентального климата, что повышает COP, снижает выбросы и уменьшает затраты. В стратегическом плане они служат основой для разработки политики и инвестиций, снижая риски внедрения ГТН в холодных регионах.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методология термодинамической оптимизации в рамках FTT для ГТН, которая явно учитывает системную взаимосвязь через четыре теплообменника.
2. Термодинамические модели для режимов с заданными условиями теплообмена, охватывающие случаи заданного отбора тепла из грунта и заданной подачи тепла потребителю.
3. Критерии оптимального распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов при наличии необратимостей.
4. Обоснованная модель 3Е для тепловой эффективности и экологических характеристик, подкреплённая экспериментальными данными, полученными на установке ГТН в Алматы.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертации.

Достоверность настоящей работы опирается на строгие модели первого принципа и устоявшуюся термодинамическую доктрину: все модели ГТН выведены из уравнений баланса массы, энергии и эксергии, согласованных с первым и вторым законами, тогда как термодинамика конечного времени (FTT) явно учитывает конечные скорости теплообмена, необратимости и производство энтропии. Это обеспечивает внутреннюю согласованность и теоретическую строгость оптимизационных критериев (режимы с заданным отбором/подачей тепла) и правил распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов. Экологическая количественная оценка следует международно признанной практике 3Е, включая жизненно-цикловые климатические метрики, такие как TEWI, что обеспечивает прозрачную связь между термодинамическими показателями и экологическим воздействием.

Обоснованность подтверждается многоуровневыми внешними проверками. Прогнозы модели экспериментально подтверждены измерениями на установке ГТН в Алматы (например, COP, температура грунта) и согласуются с методиками и тенденциями, описанными в международных исследованиях по ГТН и каскадным тепловым насосам. Результаты прошли научную апробацию через рецензируемые публикации и конференционные доклады, что укрепляет их достоверность (Yerdesh et al., 2020; 2022). В совокупности согласование моделей первого принципа, эмпирическая верификация в условиях континентального климата и согласованность с литературой подтверждают как надежность научных положений, так и практическую применимость выводов для проектирования и оптимизации ГТН в холодных регионах.

Связь диссертации с другими научно-исследовательскими работами.

Диссертация выполнена в рамках следующих научно-исследовательских проектов:

1. AP26102323 «Оптимизация эффективности и конфигурации высокотемпературных тепловых насосов для интеграции возобновляемых источников энергии и утилизации сбросного тепла», грантовое финансирование Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 2025-2027 гг.
2. AP14871988 «Разработка солнечно-тепловой опреснительной установки на основе теплового насоса», грантовое финансирование Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 2022-2024 гг.
3. AP08857319 «Исследование путей повышения теплообменных характеристик скважинного грунтового теплообменника вертикального типа для обеспечения высокой продуктивности тепловых насосов», грантовое финансирование Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 2020-2022 гг.
4. APP-SSG-17/0280F «Каскадный солнечный тепловой насос для отопления помещений и ГВС в регионах с континентальным климатом», поддержано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан и Всемирным банком в рамках программы «Fostering Productive Innovation», 2018-2020 гг.
5. AP05132668 «Разработка автокаскадного солнечного теплового насоса применительно к высокопотенциальному теплоснабжению жилых домов в условиях континентального климата», грантовое финансирование Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 2018-2020 гг.

Публикации. Автором опубликовано 7 научных работ по теме диссертации, в том числе 4 публикации в международных научных журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science:

1. Yerdesh Ye., et al. Numerical simulation on solar collector and cascade heat pump combi water heating systems in Kazakhstan climates, Renewable Energy, Volume 145, 2020, pp. 1222-1234, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.102> (Q1, IF 8.001, Percentile 88, SJR 1.825) (**Первый автор**).
2. Yerdesh Ye., et al. Experimental and theoretical investigations of a ground source heat pump system for water and space heating applications in Kazakhstan, MDPI Energies, Volume 15, №22, 2022, pp. 1-25, <https://doi.org/10.3390/en15228336> (Q3, IF 3.2, Percentile 83, SJR 0.632) (**Первый автор**).
3. Karlina Ye., Yerdesh Ye., et al. Numerical simulation study of thermal performance in hot water storage tanks with external and internal heat exchangers, MDPI Energies, Volume 17, №22, 2024, pp.1-18, <https://doi.org/10.3390/en17225623> (Q3, IF 3.2, Percentile 85, SJR 0.713) (**Автор-корреспондент**).
4. Baimbetov D., Yerdesh Ye., et al. Thermal analysis of a compression heat pump-assisted solar still for Caspian regions of Kazakhstan, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Volume 149, №19, 2024, pp. 11269-11291, <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13446-4> (Q2, IF 3.1, Percentile 85, SJR 0.551) (**Соавтор**).

2 публикации в материалах международных конференций, индексируемых в Scopus:

5. Toleukhanov A., Belyayev Ye., Yerdesh Ye., et al. Simulation-based mathematical modeling of borehole heat exchanger thermal performance for ground source heat pumps, Journal of Mathematical Sciences, Conference Paper, Vol. 291, №2, 2025, pp. 323-335, <https://doi.org/10.1007/s10958-025-07811-3> (Percentile 10, SJR 0.153)
6. Belyayev Ye., Toleukhanov A., Yerdesh Ye., et al. Energy and exergy performance study of ground source heat pump in continental climate conditions, AIP Conference Proceedings, Volume 3126, №1, 2024, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1063/5.0200363> (Percentile 10, SJR 0.153)

1 статья в международном научном журнале:

7. Yerdesh Ye., et al. Air-to-water cascade heat pump thermal performance modelling for continental climate regions, Entropie Thermodynamique, Volume 3, №1, 2022, pp. 1-16, <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2022.0836> (**Первый автор**).

Личный вклад автора.

Автор определил цели исследования, выполнил обзор литературы и разработал модели систем ГТН в рамках ФТТ. Реализовал методологию 3E, провёл численное моделирование и оптимизацию, на основе результатов сформулировал новые критерии и практические рекомендации по

распределению ресурсов теплообменников, выбору хладагента и режимам работы.

Автор подготовил испытательный стенд, собрал тепловые и электрические данные и верифицировал модели на установке в Алматы. Основной текст, анализ и интерпретация выполнены автором; соавторы обеспечивали научное руководство. Результаты совместных работ являются совместной интеллектуальной собственностью всех участников, а внешние материалы цитируются в соответствующих разделах.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает титульный лист, оглавление, введение, два раздела, заключение и список литературы. Общий объём диссертации составляет 81 страницы, включая 29 рисунков и 6 таблиц.

Основное содержание диссертации.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи, подчёркивается научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов. Отмечается апробация основных положений на международных конференциях и их публикация в рецензируемых журналах, приводится структура и содержание диссертации.

Основная часть состоит из двух глав и десяти разделов.

В главе 1 разрабатывается методология конечно-временной термодинамики (ФТТ) для оптимизации систем грунтовых тепловых насосов (ГТН). Представлены обзор ГТН и методов ФТТ, сформулированы математические модели эндореверсивных и необратимых циклов ГТН и рассмотрены два критерия оптимизации. Получены новые соотношения для оптимального распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов, а также прояснено влияние необратимостей цикла и температурного подъёма на показатели, что обеспечивает теоретическую основу для правил проектирования ГТН.

В главе 2 представлен анализ 3Е (энергетический, эксергетический, экологический) ГТН, верифицированный с использованием экспериментальных данных установки в Алматы. Описаны экспериментальный стенд, разработка и валидация стандартных моделей ГТН на основе измерений, а также анализ работы при разных режимах, включая выбор хладагента, эксергетическую эффективность и суммарный эквивалентный потенциал потепления (TEWI). Показана практическая применимость методологии для проектирования ГТН в континентальных климатах.

В заключении обобщены основные результаты, сформулированы научные и практические выводы и даны рекомендации по проектированию и эксплуатации систем ГТН. Диссертация также включает список использованной литературы.