

# 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 СО<sub>2</sub> 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 СОР 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 ПГП (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 ЗЕ (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 не обратимостей.
- Разработать и валидировать ЗЕ-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 не обратимость 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 не обратимости теплового насоса, позволяющее вывести оптимальные правила распределения распределения эффективности теплообменников и теплоёмкостных расходов.
4. Комплексный, валидированный ЗЕ (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 ЗЕ, 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 СОР, 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 ЗЕ для тепловой эффективности и экологических характеристик, подкрепленная 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 ЗЕ, включая жизненно-циклические 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, СОР, 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*, Volumne 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 FTT. Реализовал методологию ЗЕ, 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 аprobация 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 (FTT) для оптимизации систем грунтовых тепловых насосов (ГТН). Представлены обзор ГТН и методов FTT, 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 ЗЕ (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.