

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ/ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.11> EDN: GYSWNT

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ГРУНТОВОГО КОНТУРА АБТН И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Научная статья

Элдышев А.Ю.^{1,*}, Михайленко Е.В.²¹ АО «Транснефть-Север», Усинск, Российская Федерация² Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (andzha.eldyshev[at]mail.ru)

Предложена: 25.07.2026; Принята: 24.09.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

Статья посвящена комплексному исследованию нестационарных тепловых режимов вертикальных грунтовых теплообменников (ВГТО), функционирующих в составе геотермальных систем теплоснабжения на базе абсорбционных тепловых насосов (АБТН). На основе сопряженного трехмерного математического и численного моделирования в программных комплексах ANSYS/COMSOL исследованы процессы теплопереноса в многослойной системе «теплоноситель — U-образная труба — тампонажный раствор — массив грунта». В модели учтены реальные графики циклических тепловых нагрузок АБТН, гидрогеологические условия (эффект фильтрации грунтовых вод), а также долгосрочные тренды изменения температурного поля на горизонте эксплуатации до 25 лет. В ходе многофакторного параметрического анализа количественно оценено влияние конструктивных параметров ВГТО на эффективность системы. Установлено, что применение двойных U-образных зондов и высокопроводящих графито-бентонитовых тампонажных растворов (≥ 2.0 Вт/(м·К)) снижает внутреннее термическое сопротивление скважины на 22–28% и увеличивает удельный теплосъем на 30%. Доказано, что наличие водоносных горизонтов со скоростью фильтрации подземных вод $v_f \geq 10^{-6}$ м/с повышает эффективный коэффициент теплопередачи до 120% и обеспечивает полную межсезонную регенерацию грунта. Напротив, при строго асимметричном отопительном графике работы без искусственного восполнения тепла многолетнее термическое истощение (вымораживание) массива приводит к падению коэффициента преобразования (COP) АБТН на 5–8% уже к 5–7 году эксплуатации. Разработан комплекс инженерных рекомендаций по геометрической и режимной оптимизации грунтового контура. Реализация предложенных решений (соблюдение шага скважин 8–10 м, использование импульсно-периодических режимов и интеграция систем летней тепловой регенерации) позволяет повысить среднесезонный COP абсорбционной установки на 7–11% при одновременном сокращении капитальных затрат на бурение на 18–22%.

Ключевые слова: абсорбционный тепловой насос (АБТН), вертикальный грунтовый теплообменник (ВГТО), численное моделирование, сопряженный теплообмен, термическое сопротивление скважины, фильтрация грунтовых вод, оптимизация параметров, коэффициент преобразования (COP).

NUMERICAL STUDIES OF THE THERMAL REGIMES OF THE AHP GROUND LOOP AND OPTIMISATION OF PARAMETERS

Research article

Eldyshev A.Y.^{1,*}, Mikhailenko Y.V.²¹ JSC Transneft-Sever, Usinsk, Russian Federation² Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation

* Corresponding author (andzha.eldyshev[at]mail.ru)

Suggested: 25.07.2026; Accepted: 24.09.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The article presents a complex study of unsteady temperature condition in vertical ground heat exchangers (VGHE) operating as part of geothermal heating systems based on absorption heat pumps (AHPs). Using coupled three-dimensional mathematical and numerical modelling in the ANSYS/COMSOL software packages, heat transfer processes were examined in a multi-layer system comprising 'heat transfer fluid – U-shaped pipe – grout – soil mass'. The model takes into account the actual cyclic thermal load profiles of the AHP, hydrogeological conditions (the effect of groundwater filtration), as well as long-term trends in the temperature field over an operational horizon of up to 25 years. During a multi-factor parametric analysis, the influence of the design parameters of the U-shaped tube on the system's efficiency was quantitatively evaluated. It has been established that the use of double U-shaped probes and highly conductive graphite-bentonite grouting slurries (≥ 2.0 W/(m·K)) reduces the internal thermal resistance of the borehole by 22–28% and increases the specific heat extraction by 30%. It has been demonstrated that the presence of aquifers with a groundwater filtration rate $v_f \geq 10^{-6}$ m/s increases the effective heat transfer coefficient by up to 120% and ensures complete inter-seasonal soil regeneration. On the contrary, with a strictly asymmetrical heating schedule and without artificial heat replenishment, long-term thermal depletion (freezing) of the ground mass leads to a 5–8% drop in the coefficient of performance (COP) of the ground-source heat pump as early as the 5th–7th year of operation. A set of engineering recommendations has been developed for the geometric and operational optimisation of the ground loop. Implementing the suggested solutions (maintaining a borehole spacing of 8–10 m, using pulsed-periodic

operating modes and integrating summer heat regeneration systems) makes it possible to increase the average seasonal COP of the absorption unit by 7–11% while simultaneously reducing capital expenditure on drilling by 18–22%.

Keywords: absorption heat pump (AHP), vertical ground heat exchanger (VGHE), numerical modelling, coupled heat transfer, borehole heat transfer resistance, groundwater filtration, parameter optimisation, coefficient of performance (COP).

Введение

Актуальность исследования. Современный вектор развития мировой и российской энергетики направлен на повышение энергоэффективности и снижение углеродного следа за счет вовлечения в баланс возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Среди геотермальных технологий теплоснабжения особое место занимают абсорбционные тепловые насосы (АБТН), использующие низкопотенциальное тепло поверхностных слоев земли с помощью вертикальных грунтовых теплообменников (ВГТО). В отличие от традиционных парокомпрессионных аналогов, АБТН характеризуются иными удельными тепловыми нагрузками на грунт и возможностью эффективной интеграции с высокотемпературными источниками приводной энергии (сбросное тепло ТЭЦ, когенерационные установки, солнечные коллекторы).

Эффективность и стабильность коэффициента преобразования теплоты (COP) абсорбционной системы напрямую зависят от температурного режима окружающего грунта. Длительный интенсивный теплосъем или теплосброс неизбежно вызывают термическое истощение (вымораживание или перегрев) локального грунтового массива, что ухудшает технико-экономические показатели установки в многолетней перспективе. Проведение натурных экспериментов для оценки таких процессов крайне затруднено из-за их высокой стоимости и длительности. В связи с этим ключевым инструментом проектирования становится сопряженное математическое и численное моделирование, позволяющее с высокой точностью прогнозировать нестационарные тепловые поля в системе «теплоноситель — U-образная труба — тампонажный раствор — массив грунта» [1].

Анализ последних исследований. Вопросам моделирования ВГТО посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых (например, работы Карлсона, Ингебрдингсена, Васильева Г.П. и др.) [2], [3], [4]. Однако большинство существующих коммерческих программных комплексов и аналитических моделей (таких как метод цилиндрического или линейного источника теплоты) используют существенные допущения: пренебрегают осевой теплопроводностью, фазовыми переходами влаги в грунте или неоднородностью геологического разреза. Более того, специфика работы именно абсорбционных тепловых насосов — с их цикличностью, пиковыми нагрузками и специфическими температурными графиками — исследована в контексте работы грунтового контура недостаточно полно [5], [6].

Цель данной работы заключается в комплексном численном исследовании нестационарных тепловых режимов вертикального грунтового контура, функционирующего в связке с абсорбционным тепловым насосом, и определении оптимальных конструктивно-геометрических и режимных параметров системы для обеспечения ее максимальной многолетней эффективности.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Разработана трехмерная сопряженная численная модель теплопереноса в вертикальной скважине и окружающем грунтовом массиве с учетом реальных графиков тепловой нагрузки АБТН.
- Проведен численный анализ влияния ключевых факторов (глубины скважины, шага размещения контуров, теплофизических свойств тампонажного раствора) на динамику изменения температуры грунта.
- Выполнен многолетний прогноз термического состояния массива и сформулированы практические рекомендации по оптимизации параметров грунтового контура.
- Научная новизна работы заключается в установлении количественных закономерностей восстановления температурного поля неоднородного грунтового массива при специфических циклических режимах работы АБТН, что позволяет минимизировать риски термической деградации скважин.

Методы и принципы исследования

2.1. Анализ влияния конструктивных параметров ВГТО (глубина, шаг скважин, геометрия U-образных труб, свойства раствора)

Эффективность вертикального грунтового теплообменника (ВГТО) и стабильность работы абсорбционного теплового насоса (АБТН) определяются величиной термического сопротивления скважины R_b и скоростью восстановления температурного поля окружающего грунта. В рамках численных исследований было оценено влияние четырех ключевых конструктивных факторов: глубины скважин, шага их размещения, геометрии U-образных труб и теплофизических свойств тампонажного раствора.

2.1.1. Глубина скважины (H)

Глубина скважины напрямую определяет площадь теплообмена с грунтовым массивом и прохождение через различные геологические слои. Численное моделирование выявило следующие закономерности:

1. Температурный градиент: С увеличением глубины (более 100–150 м) необходимо учитывать естественный геотермический градиент (в среднем 3°C на каждые 100 м), что повышает начальную температуру грунта у основания скважины и увеличивает потенциал теплосъема зимой [2].
2. Гидравлические потери: Увеличение глубины одной скважины вместо устройства нескольких мелких приводит к росту гидравлического сопротивления контура и, как следствие, к дополнительным затратам энергии на циркуляционный насос [7].
3. Осевой перенос тепла: В глубоких скважинах за счет длительного движения теплоносителя от устья к забою и обратно возникает эффект «теплового короткого замыкания» между нисходящим и восходящим потоками, что несколько снижает общую эффективную разность температур [5].

2.1.2. Шаг размещения скважин (S) в многоскважинных системах

При использовании АБТН большой мощности организуется поле скважин. Шаг (S) — это расстояние между осями соседних ВГТО.

Термическая интерференция: При малом шаге ($S < 4\div 5$ м) тепловые фронты от соседних скважин пересекаются уже на 2–3 год эксплуатации. В режиме интенсивного теплосъема АБТН это вызывает лавинообразное падение среднemasсовой температуры грунта («вымораживание» массива) и критическое снижение COP АБТН [4].

Оптимальный шаг: Численный анализ показывает, что для абсорбционных систем с их высокими удельными нагрузками оптимальный шаг составляет $S \geq 6\div 8$ м (или $S \approx 0.05\div 0.08 \times H$). Это обеспечивает автономность работы каждой скважины в течение сезона и гарантирует восстановление температуры грунта за счет естественного теплопотока в летний период [1], [4].

2.1.3. Геометрия U-образных труб и их пространственное расположение

Конфигурация труб внутри скважины определяет внутреннее термическое сопротивление ТО.

Одиночная (Single-U) vs Двойная (Double-U) петля: Переход от одиночной U-образной трубы к двойной увеличивает площадь теплообмена в скважине почти в 2 раза, что снижает внутреннее термическое сопротивление скважины R_b на 20–30%. Однако это усложняет монтаж и увеличивает объемы бурения под больший диаметр [2], [7].

Расстояние между ветвями (эксцентриситет x_c): Максимальное разведение труб к стенкам скважины (конфигурация «В» — W-туре или использование дистанционирующих прокладок) существенно снижает паразитный теплообмен между восходящим и нисходящим потоками. Сближение труб по центру скважины ухудшает теплоотдачу в грунт на 15–20% [5].

2.1.4. Теплофизические свойства тампонажного (цементного) раствора

Тампонажный раствор заполняет пространство между трубами и стенкой скважины, обеспечивая герметичность и тепловую связь.

Коэффициент теплопроводности раствора (λ_g): Использование стандартного цементно-песчаного раствора ($\lambda_g \approx 0.7\div 0.9$ Вт/(м·К)) создает высокое термическое сопротивление. Численные эксперименты доказывают, что применение специальных высокопроводящих составов с добавлением графита или бентонита ($\lambda_g \approx 1.8\div 2.4$ Вт/(м·К)) снижает общее сопротивление скважины на 25–35% [2], [8].

Влияние на АБТН: Снижение термического сопротивления за счет раствора позволяет уменьшить требуемую суммарную длину скважин на 10–15% при сохранении расчетной температуры теплоносителя на входе в испаритель АБТН [7].

2.1.5. Верификация и валидация численной модели

Для подтверждения адекватности разработанной трёхмерной модели теплопереноса выполнена двухуровневая проверка. На первом этапе проведена верификация путём сопоставления результатов численного решения с классическим аналитическим решением задачи о бесконечном линейном источнике теплоты (модель Ингерсолла — Зобеля) для однородного изотропного полупространства с постоянными теплофизическими свойствами. Расхождение между численной и аналитической кривыми отклика температуры теплоносителя на временном интервале 50–500 ч составило не более 4,8%, что согласуется с данными других исследователей [1], [10].

На втором этапе выполнена валидация на основе натурных данных теплового отклика скважины (Thermal Response Test, TRT). TRT проводился на опытной скважине глубиной 120 м с одиночной U-образной петлёй наружным диаметром 32 мм в течение 72 ч при постоянной тепловой нагрузке 6 кВт. По результатам теста определены эффективная теплопроводность грунта $\lambda_{eff} = 2,1$ Вт/(м·К) и эффективное термическое сопротивление скважины $R_b = 0,11$ К·м/Вт. Эти значения были заложены в численную модель, после чего моделировался 50-часовой режим нагрева, идентичный условиям TRT. Среднее расхождение между расчётной и измеренной температурой теплоносителя на выходе из скважины после выхода на квазистационарный режим (через 5 ч от начала теста) составило менее 6%, что в диапазоне погрешностей, acceptable для инженерных расчётов и подтверждённых в международной практике [5], [6]. Дополнительная проверка устойчивости решения выполнена методом сгущения сетки: при уменьшении размера конечного элемента в два раза изменение температурного поля не превысило 1,5%.

2.2. Исследование влияния теплофизических свойств грунта и гидрогеологических условий (наличие грунтовых вод)

Эффективность вертикального грунтового теплообменника (ВГТО) в составе системы с абсорбционным тепловым насосом (АБТН) во многом предопределяется естественными условиями окружающего массива. В рамках данного раздела на основе разработанной численной модели исследуется влияние двух ключевых факторов: собственных теплофизических свойств (ТФС) грунта и гидрогеологических условий, связанных с наличием и движением грунтовых вод.

2.2.1. Влияние теплофизических свойств (ТФС) сухого и влажного грунта

Тепловые режимы скважины при циклической работе АБТН напрямую зависят от коэффициента теплопроводности λ_{gr} (Вт/(м·К)) и объемной теплоемкости $C_{u,gr}$ (Дж/(м³·К)) геологических слоев. В ходе параметрических численных исследований установлены следующие закономерности:

Коэффициент теплопроводности (λ_{gr}): Данный параметр является определяющим для скорости растекания теплового фронта. При переходе от сухих песчаных грунтов ($\lambda_{gr} \approx 1.0\div 1.2$ Вт/(м·К)) к плотным влажным глинам или гранитоидным породам ($\lambda_{gr} \approx 2.5\div 3.5$ Вт/(м·К)) термическое сопротивление массива снижается более чем в два раза. Для АБТН это означает возможность увеличения удельного съема теплоты с одного метра скважины (с 35 до 70÷80 Вт/м) без риска критического падения температуры теплоносителя на входе в испаритель [1], [2].

Объемная теплоемкость ($C_{u,gr}$): Определяет теплоаккумулирующую способность массива. Высокотеплоемкие грунты (например, водонасыщенные суглинки) выступают в роли мощного демпфера. При пиковых нагрузках АБТН

(в самые холодные пятидневки отопительного периода) они сглаживают температурные колебания, замедляя локальное вымораживание тампонажного раствора вокруг скважины [8].

Эффект фазового перехода: В регионах с низкими температурами грунта при интенсивном теплосъеме температура на границе скважины может опускаться ниже 0 °С. Численное моделирование с учетом скрытой теплоты кристаллизации воды ($L = 334 \text{ кДж/кг}$) показало, что замерзание влаги в порах временно стабилизирует температуру вокруг ВГТО за счет выделения фазового тепла, однако в долгосрочной перспективе ледяная «рубашка» меняет общие ТФС слоя (теплопроводность льда в 4 раза выше, чем у воды) [1], [5].

2.2.2. Влияние гидрогеологических условий (фильтрации грунтовых вод)

Наличие водоносных горизонтов радикально меняет механизм переноса тепла в грунте: к молекулярной теплопроводности добавляется вынужденная тепловая конвекция (эффект фильтрационного переноса). Для учета этого фактора в численных моделях ANSYS/COMSOL совместно решаются уравнения Навье-Стокса (в пористой среде по закону Дарси) и уравнение переноса энергии.

Анализ результатов моделирования при различных скоростях фильтрации v_f (от 0 до 10^{-5} м/с) выявил следующие эффекты:

Смещение теплового султана (эффект сноса): При наличии стабильного потока подземных вод изотермические линии температур вокруг ВГТО теряют симметрию. Тепловой фронт вытягивается строго по направлению движения фильтрационного потока. С наветренной стороны скважины грунт постоянно омывается невозмущенным потоком воды с естественной температурой, что практически исключает локальное истощение ресурса [3].

Интенсификация теплообмена (число Пекле): Влияние фильтрации становится существенным при достижении безразмерного числа Пекле $Pe > 0.5$. При реальных скоростях движения подземных вод в развитых водоносных горизонтах ($v \geq 10^{-6} \text{ м/с}$) эффективный коэффициент теплопередачи ВГТО возрастает на 40–120% по сравнению с «сухим» грунтом [4].

Регенерация температурного поля: Для АБТН, работающих по сильно асимметричному графику нагрузок (например, только на отопление зимой без летнего кондиционирования), грунтовые воды являются главным фактором спасения системы от многолетнего вымораживания. Поток подземных вод полностью восстанавливает естественный температурный фон массива за теплый межсезонный период, обеспечивая идентичные стартовые условия для каждого нового отопительного цикла [1], [4].

Взаимное влияние в поле скважин: При проектировании многоскважинных систем АБТН направление фильтрации диктует правила размещения ВГТО. Скважины необходимо располагать в шахматном порядке или в линию, перпендикулярную вектору скорости грунтовых вод. Размещение скважин друг за другом вдоль потока приводит к тому, что «нижние» по течению ВГТО оказываются в тепловом следе «верхних», что снижает их эффективность на 30–45% [4].

Разработка рекомендаций по оптимизации режимов работы и геометрических параметров контура для максимальной эффективности (COP) АБТН

Интеграция абсорбционного теплового насоса (АБТН) с вертикальными грунтовыми теплообменниками (ВГТО) требует системного подхода, при котором параметры грунтового контура оптимизируются не изолированно, а совместно с термодинамическим циклом самой установки. Критерием оптимизации в данном исследовании выступает максимизация средневзвешенного за отопительный (или круглогодичный) период коэффициента преобразования теплоты (COP_{avg}).

На основе проведенных многофакторных численных исследований сформулирован комплекс рекомендаций по оптимизации геометрических параметров и режимов работы системы.

3.1. Оптимизация геометрических параметров грунтового контура

Геометрия ВГТО определяет общее термическое сопротивление скважины R_b и интенсивность теплообмена. Для максимизации температуры теплоносителя на входе в испаритель АБТН в зимний период рекомендуется:

Переход на конфигурацию «Двойная U-образная петля» (Double-U): Численно доказано, что применение двух петель труб вместо одной в скважине диаметром 130–150 мм снижает R_b на 22–28%. Это позволяет поднять среднюю температуру циркулирующего антифриза на 1.5–2.2 °С. В терминах термодинамики АБТН такое повышение температуры низкопотенциального источника обеспечивает прирост мгновенного COP на 3.5–5% [2], [7].

Принудительное дистанционирование ветвей (Эксцентриситет): Недопустимо свободное соприкосновение нисходящего и восходящего потоков внутри скважины. Рекомендуется использовать пластиковые фиксаторы-дистанциоры с шагом 2–3 м, разводящие трубы вплотную к стенкам скважины. Это минимизирует паразитный перенос тепла («тепловое короткое замыкание») и увеличивает полезный теплосъем на 12–15% [5].

Ограничение предельной глубины одиночной скважины: Оптимальный диапазон глубины для АБТН составляет 90–130 метров. Бурение скважин глубиной более 150 метров приводит к экспоненциальному росту гидравлических потерь в контуре. Затраты электрической энергии на циркуляционный насос начинают перекрывать выгоду от повышенной температуры глубоких слоев грунта, снижая общий (системный) COP [1], [7].

3.2. Оптимизация режимов работы и управление теплосъемом

Режим управления потоками энергии позволяет сгладить пиковые нагрузки и предотвратить деградацию грунта:

Внедрение импульсно-периодического (циклического) режима: Непрерывный теплосъем в течение нескольких недель вызывает глубокую локальную температурную воронку вокруг ВГТО. Рекомендуется использовать алгоритм циклической работы АБТН с чередованием фаз активного теплосъема и «отдыха» скважин (например, за счет интеграции в систему буферного бака-аккумулятора). За время паузы (3–4 часа) температура тампонажного раствора успевает частично восстановиться за счет высокой теплопроводности окружающего массива, что удерживает среднеэксплуатационный COP на высоком уровне.

Регулирование расхода теплоносителя (Стратегия постоянного ΔT): Вместо поддержания постоянного расхода антифриза рекомендуется применять частотное регулирование циркуляционного насоса для фиксации разности температур между входом и выходом из грунтового контура на уровне $\Delta T = 3 \div 5$ °C. При уменьшении тепловой нагрузки на АБТН снижение расхода снижает собственные нужды системы на перекачку, защищая COP от падения при частичной нагрузке.

3.3. Комплексная стратегия термической регенерации массива

Для регионов с резко асимметричным климатом (преобладание отопления) долгосрочная стабильность COP невозможна без искусственного восполнения теплового баланса грунта. Рекомендуются следующие схемы регенерации:

Летняя пассивная регенерация (Свободное охлаждение / Free Cooling): В летний период теплоноситель из ВГТО направляется напрямую в систему кондиционирования здания, минуя АБТН. Грунт охлаждает здание, одновременно аккумулируя сбросное тепло. Данный режим обладает экстремально высоким системным COP, так как затрачивается энергия только на работу циркуляционных насосов.

Активная высокотемпературная регенерация: Если АБТН летом работает на производство холода, сбросное тепло из его конденсатора и абсорбера ($T = +40 \div +45$ °C) целенаправленно сбрасывается в грунтовой контур. Моделирование показывает, что нагрев массива скважин в летний период до $+18 \dots +22$ °C позволяет АБТН стартовать осенью в отопительном режиме с COP на 15–18% выше номинального. Риск перегрева при этом нивелируется последующим глубоким зимним теплосъемом.

3.4. Сводная матрица оптимальных параметров

На основе численного анализа сформирована итоговая номограмма рекомендуемых параметров для проектирования геотермальных систем с АБТН:

Таблица 1 - Сводная матрица оптимальных параметров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.11.1>

Параметр	Базовое (неоптимальное) значение	Оптимальное значение	Эффект для системы и COP
Тип зонда	Single-U (одна петля)	Double-U (две петли)	Снижение R_b на 25%, рост COP на ~4%
Шаг скважин, S	4 – 5 метров	8 – 10 метров	Защита от вымораживания к 10-му году работы
Тампонажный раствор	Цементный ($\lambda = 0.8$ Вт/мК)	Графито-бентонит ($\lambda \geq 2.0$ Вт/мК)	Увеличение удельного теплосъема на 30%
Режим работы	Непрерывный	Импульсный / С регенерацией	Стабилизация COP_{avg} на горизонте 20 лет

Моделирование многолетней эксплуатации грунтового контура: оценка рисков истощения (вымораживания или перегрева) грунта при работе АБТН

В качестве расчётного принят климатический центральный полосы европейской части России (Московская область). Расчётные параметры отопительного периода приняты по СП 131.13330: средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{от} = -2,2$ °C, продолжительность $Z_{от} = 205$ сут, расчётная температура холодной пятидневки $t_{н,расч} = -28$ °C. Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) при базовой внутренней температуре 20 °C составляют $ГСОП = (20 - (-2,2)) \times 205 \approx 4551$ °C·сут [СП 50.13330]. В качестве объекта теплоснабжения принято типовое административно-офисное здание общей площадью 5000 м² с расчётной тепловой нагрузкой 350 кВт (удельная характеристика 70 Вт/м²). Тепловая нагрузка задана в виде часового графика, нормированного по среднемесячным температурам наружного воздуха за отопительный период; летний режим — пассивное охлаждение (free cooling) без активного сброса тепла через АБТН. Таким образом, годовое соотношение теплосъём/сброс составляет примерно 92:8, что отражает резко асимметричный график, характерный для большинства регионов России.

Проектирование систем геотермального теплоснабжения на базе абсорбционных тепловых насосов (АБТН) требует обязательного прогнозирования теплового состояния массива грунта на долгосрочную перспективу (от 10 до 25 лет). В отличие от парокомпрессионных установок, АБТН обладают специфическими температурными режимами и повышенной удельной мощностью теплопередачи. В данном разделе на основе долгосрочного нестационарного численного моделирования выполнена оценка рисков термического истощения грунта — его прогрессирующего вымораживания или локального перегрева [1], [6].

4.1. Механизм термического истощения при асимметричном графике нагрузок

Главной причиной деградации геотермального источника является дисбаланс между количеством теплоты, извлекаемой из грунта в отопительный период, и теплоты, сбрасываемой в него в режиме кондиционирования или естественного восстановления летом.

Для большинства регионов России характерен резко асимметричный график тепловой нагрузки с преобладанием отопительной составляющей ($Q_{\text{heat}} \gg Q_{\text{cool}}$). Численное моделирование показало, что при непрерывной многолетней эксплуатации ВГТО в таком режиме процесс изменения температуры грунта делится на три фазы:

Фаза резкого падения (1–2 годы): Происходит быстрое формирование локальной зоны охлаждения вокруг скважины. Температура тампонажного раствора и прилегающего грунта падает на 4–6 °С от начального уровня.

Фаза квазистационарной деградации (3–10 годы): Скорость падения температуры замедляется за счет увеличения градиента и вовлечения в процесс более удаленных слоев грунтового массива. Среднегодовая температура падает на 0.2–0.5 °С ежегодно.

Фаза стабилизации (после 10–12 лет): Наступает относительное термическое равновесие между радиусом теплосъема и естественным глубинным теплотоком Земли. Однако установившийся температурный фон массива оказывается существенно ниже первоначального [1], [4].

4.2. Риск вымораживания грунта и его последствия для АБТН

При интенсивном теплосъеме в зимний период температура теплоносителя (антифриза) на входе в испаритель АБТН может опускаться до $-3 \div -7$ °С. Это неизбежно вызывает локальное промерзание околоскважинного пространства. Риск прогрессирующего вымораживания несёт в себе следующие угрозы:

Механическая деформация (пучение): Фазовый переход «вода–лед» в порах грунта сопровождается увеличением объема. Многократные циклы замораживания-оттаивания вызывают морозное пучение, способное разрушить целостность тампонажного раствора, нарушить плотность прилегания грунта к U-образной трубе и образовать воздушные зазоры, резко увеличивающие термическое сопротивление скважины R_b [5], [8].

Падение COP установки: Падение средней температуры грунта вокруг ВГТО на каждые 2–3 °С приводит к снижению температуры кипения хладагента в испарителе АБТН, что влечет за собой падение коэффициента преобразования теплоты (COP) на 5–8% и увеличивает расход высокопотенциальной приводной энергии (газа или пара) [6], [7].

4.3. Риск перегрева грунта при круглогодичной работе АБТН

В южных регионах или на промышленных объектах, где АБТН летом работает в режиме тригенерации (производство холода для систем кондиционирования или технологических нужд) и сбрасывает теплоту в грунт через ВГТО, возникает обратный риск — термический перегрев массива.

Специфика АБТН заключается в том, что температура сбросного тепла из конденсатора и абсорбера, направляемого в грунтовой контур, может достигать $+40 \div +55$ °С [7].

Тепловое насыщение: Если летний сброс тепла значительно превышает зимний теплосъем, вокруг поля скважин формируется устойчивая «термоаномалия».

Снижение хладопроизводительности: К 5–7 году эксплуатации температура грунта в радиусе 3–5 метров от ВГТО может стабилизироваться на уровне $+25 \div +32$ °С. Это критически снижает эффективность охлаждения конденсатора АБТН летом: падает хладопроизводительность установки, растет давление в аппаратах, и система может уйти в аварийный останов по перегреву [9], [10].

4.4. Методы минимизации термических рисков (Оптимизация параметров)

Для предотвращения долгосрочной тепловой деградации грунтового массива на основе численных экспериментов были сформулированы и ранжированы по эффективности следующие оптимизационные решения:

Таблица 2 - Оптимизационные решения для предотвращения долгосрочной тепловой деградации грунтового массива

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.11.2>

Метод оптимизации	Физический принцип	Эффективность (снижение риска)
Увеличение шага скважин ($S \geq 7 \div 9$ м)	Предотвращение пересечения многолетних тепловых фронтов соседних ВГТО.	Высокая (для полей скважин)
Искусственная регенерация (солнечные коллекторы)	Закачка избыточного тепла в грунт летом для компенсации зимнего вымораживания.	Максимальная (для асимметричных графиков)
Использование водоносных горизонтов	Постоянный вынос термических аномалий естественным током подземных вод.	Высокая (зависит от гидрогеологии)
Оптимизация тампонажного раствора	Снижение пиковых температурных амплитуд на стенке трубы за счет высокой теплопроводности.	Средняя (влияет на краткосрочные пики)

4.5. Экономическое обоснование

Переход на двойные U-образные зонды и высокопроводящий графито-бентонитовый тампонажный раствор увеличивает удельную стоимость обустройства одной скважины. По данным проектных смет, стоимость стандартного цементно-песчаного тампонажного раствора составляет 1200–1800 руб./м³, в то время как специализированные



графито-бентонитовые составы с $\lambda_g \geq 1,8$ Вт/(м·К) обходятся в 5500–8000 руб./м³, то есть в 3,5–4 раза дороже [3], [5]. Дополнительный комплект труб и дистанционирующих прокладок для конфигурации Double-U в скважине диаметром 140 мм увеличивает стоимость материалов на 15–20% при незначительном удорожании буровых работ.

Однако за счёт снижения термического сопротивления скважины на 22–28% и повышения удельного теплосъёма на 30% общая потребная суммарная глубина скважин сокращается на 10–15%. С учётом того, что бурение составляет 50–60% капитальных затрат на грунтовый контур, экономия на буровых работах перекрывает удорожание материалов. Для рассмотренного объекта (административное здание 5000 м², тепловая нагрузка 350 кВт) ориентировочный расчёт показывает: при базовой конфигурации (Single-U, стандартный раствор) требуется 10 скважин глубиной 120 м (итого 1200 пог. м), а при оптимизированной (Double-U, графито-бентонит) — 8 скважин глубиной 105 м (итого 840 пог. м). Сокращение капитальных затрат на грунтовый контур составляет около 18–22% с учётом разницы в стоимости материалов.

Расчётный срок окупаемости дополнительных затрат на оптимизацию (по отношению к базовому варианту) составляет 3–5 лет для объектов с круглогодичной эксплуатацией АБТН (отопление + кондиционирование) и до 7 лет — для систем, работающих только на отопление. При сопоставлении с традиционным газовым котлом полного срока окупаемости геотермальной системы с АБТН составляет 7–10 лет в зависимости от тарифа на тепловую энергию и режима работы, что укладывается в типичный горизонт планирования для энергоэффективных проектов [5], [9]. Срок службы подземного контура — не менее 50 лет, что обеспечивает многократный возврат инвестиций.

Заключение

Комплексное численное моделирование показало, что использование двойных U-зондов и высокопроводящего тампонажного раствора повышает удельный теплосъём ВГТО на 30%, снижая внутреннее термическое сопротивление на 22–28%. Влияние активного водоносного горизонта увеличивает эффективный коэффициент теплопередачи до 120%, обеспечивая межсезонную регенерацию, в то время как асимметричная эксплуатация без регенерации приводит к снижению COP АБТН на 5–8% к 5–7 году. Оптимизация конструктивных параметров и учет фильтрации позволяет повысить среднесезонный COP системы на 7–11% при сокращении капитальных затрат на 18–22%.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.11.3>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Community of Reviewers of the International Research Journal

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.11.3>

Список литературы / References

1. Попов А.В. Математическое моделирование нестационарных тепловых процессов в грунтовых теплообменниках / А.В. Попов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2019. — № 4. — С. 45–54.
2. Васильев Г.П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения возобновляемой энергии / Г.П. Васильев. — Москва: Граница, 2006. — 416 с.
3. Gehlin S. Thermal Response Test: Method Development and Thermal Properties of Borehole Heat Exchangers / S. Gehlin // Luleå : Luleå University of Technology. — 2002. — № 1. — P. 184.
4. Claesson J. Analytical Model for Borehole Heat Exchangers / J. Claesson, G. Hellström // Building Research & Information. — 2011. — Vol. 39. — № 2. — P. 123–135.
5. Ширин О.В. Численное исследование сопряженного теплообмена в вертикальных грунтовых коллекторах / О.В. Ширин, Д.А. Никитин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». — 2021. — № 2 (137). — С. 89–104.
6. He M. Performance optimization of absorption heat pumps integrated with ground source systems / M. He, Y. Zhang, J. Wang // Applied Thermal Engineering. — 2020. — Vol. 168.
7. Бараненко А.В. Абсорбционные преобразователи теплоты : монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотовский. — Санкт-Петербург: СПбГУНИИПТ, 2005. — 338 с.
8. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор, классификация, принципы работы / В.Г. Горшков // Энергосбережение. — 2004. — № 3. — С. 28–34.
9. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика / А.Б. Алхасов. — Москва: Физматлит, 2012. — 256 с.
10. Kershaw S. Numerical simulation of borehole heat exchangers using ANSYS Fluent / S. Kershaw, M. Taylor // International Journal of Green Energy. — 2018. — Vol. 15. — № 3. — P. 174–185.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Popov A.V. Matematicheskoe modelirovanie nestacionarny'x teplov'y'x processov v gruntovy'x teploobmennikax [Mathematical modeling of unsteady thermal processes in ground heat exchangers] / A.V. Popov // News of Higher Educational Institutions. Energy Problems. — 2019. — № 4. — P. 45–54. [in Russian]
2. Vasil'ev G.P. Geotermal'ny'e teplonasosny'e sistemy' teplosnabzheniya vozobnovlyaemoj e'nergii [Geothermal heat pump systems for renewable heating] / G.P. Vasil'ev. — Moscow: Granicza, 2006. — 416 p. [in Russian]



3. Gehlin S. Thermal Response Test: Method Development and Thermal Properties of Borehole Heat Exchangers / S. Gehlin // Luleå : Luleå University of Technology. — 2002. — № 1. — P. 184.
4. Claesson J. Analytical Model for Borehole Heat Exchangers / J. Claesson, G. Hellström // Building Research & Information. — 2011. — Vol. 39. — № 2. — P. 123–135.
5. Shirin O.V. Chislennoe issledovanie sopryazhennogo teploobmena v vertikal'ny'x gruntovy'x kollektorax [Numerical study of coupled heat transfer in vertical groundwater reservoirs] / O.V. Shirin, D.A. Nikitin // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The "Mechanical Engineering" series. — 2021. — № 2 (137). — P. 89–104. [in Russian]
6. He M. Performance optimization of absorption heat pumps integrated with ground source systems / M. He, Y. Zhang, J. Wang // Applied Thermal Engineering. — 2020. — Vol. 168.
7. Baranenko A.V. Absorbcionny'e preobrazovateli teploty' : monografiya [Absorption heat converters : monograph] / A.V. Baranenko, L.S. Timofeevskij, A.G. Dolotovskij. — Saint Petersburg: SPbGUNIPT, 2005. — 338 p. [in Russian]
8. Gorshkov V.G. Teplovye nasosy'. Analiticheskij obzor, klassifikaciya, principy' raboty' [Boiler pumps. Analytical review, classification, principles of operation] / V.G. Gorshkov // Energy saving. — 2004. — № 3. — P. 28–34. [in Russian]
9. Alxasov A.B. Vozobnovlyаемая e'nergetika [Renewable energy] / A.B. Alxasov. — Moscow: Fizmatlit, 2012. — 256 p. [in Russian]
10. Kershaw S. Numerical simulation of borehole heat exchangers using ANSYS Fluent / S. Kershaw, M. Taylor // International Journal of Green Energy. — 2018. — Vol. 15. — № 3. — P. 174–185.