

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ЗДАНИЯХ

Дееб Али, А. Н. Дорошин, Диб Мухаммад

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Геотермальные тепловые насосы представляют собой энергоэффективную и экологически безопасную технологию, применимую как при строительстве новых объектов, так и при модернизации существующих зданий. Их работа основана на использовании возобновляемой тепловой энергии Земли, что снижает воздействие на окружающую среду. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты применения геотермальных тепловых насосов в системах отопления зданий различного назначения. Основное внимание уделено анализу конструктивных решений, принципов функционирования, а также факторов, влияющих на эффективность систем, таких как теплопроводность грунта и климатические особенности региона. Рассмотрены различные типы геотермальных систем: горизонтальные, вертикальные и открытые контуры. Также приведены примеры реализованных проектов в климатически различных регионах России (Москва, Мурманская область, Камчатка, Сочи). В статье подчеркивается необходимость комплексной оценки экономической целесообразности внедрения систем с учетом долгосрочных показателей эффективности и региональных условий (климатические условия — геологические и гидрологические характеристики; экономические факторы — стоимость электроэнергии или топлива, стоимость рабочей силы и строительных материалов, а также государственная финансовая поддержка).

Ключевые слова: геотермальный тепловой насос, грунтовый контур, коэффициент теплопроводности грунта, открытый контур, горизонтальное бурение, вертикальное бурение, коэффициент эффективности теплового насоса, требуемая тепловая нагрузка.

Для цитирования: Дееб Али, Дорошин А. Н., Диб Мухаммад. Обзор применения систем геотермальных тепловых насосов в зданиях // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 2. С. 48–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-48-60. EDN: QQDPGQ.



© Дееб Али, Дорошин А. Н., Диб Мухаммад, 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

REVIEW OF THE APPLICATION OF GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS IN BUILDINGS

Deeb Ali, A. N. Doroshin, Deeb Muhammad

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14, bld. 1, 111250

Geothermal heat pumps are an energy-efficient and environmentally friendly technology applicable both in the construction of new facilities and in the modernization of existing buildings. They operate using renewable thermal energy from the Earth, which reduces the impact on the environment. The article considers theoretical and practical aspects of using geothermal heat pumps in heating systems of buildings for various purposes. The main attention is paid to the analysis of design solutions, operating principles, as well as factors affecting the efficiency of the systems, such as thermal conductivity of the soil and climatic features of the region. Various types of geothermal systems are considered: horizontal, vertical and open loops. Also provided are examples of implemented projects in climatically diverse regions of Russia (Moscow, Murmansk region, Kamchatka, Sochi). The article emphasizes the need for a comprehensive assessment of the economic feasibility of implementing systems, taking into account long-term performance indicators and regional conditions (Climatic conditions — geological and hydrological characteristics —

economic factors such as the cost of electricity or fuel, the cost of labor and building materials, as well as government financial support).

Keywords: geothermal heat pump, ground loop, ground heat transfer coefficient, open loop, horizontal drilling, vertical drilling, heat pump efficiency coefficient, required heat load.

For citation: Deeb Ali, Doroshin A. N., Deeb Muhammad. Review of the application of geothermal heat pump systems in buildings. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 2. P. 48–60. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-2-48-60. EDN: QQDPGQ.



© Deeb Ali, Doroshin A. N., Deeb Muhammad., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В последние годы в Европе появилась значительная тенденция к внедрению альтернативных решений для систем отопления и охлаждения. Интерес объясняется двумя основными факторами: продолжающимся ростом цен на ископаемые виды топлива (такие как нефть, газ и уголь), с одной стороны, и ужесточением экологических законов, ограничивающих вредные выбросы, с другой стороны [1–3]. Обеспечение теплового климата внутри зданий — один из ключевых приоритетов архитектурного проектирования. Теплоизоляция основана на использовании специальных материалов, которые уменьшают потери тепла здания зимой и препятствуют его проникновению летом, хотя люди приспособились жить в жарком климате, а в холодных регионах для поддержания тепла требуются дополнительные системы отопления в дополнение к теплоизоляции.

Земля обладает огромным запасом возобновляемой тепловой энергии, так как подстилающие слои почвы сохраняют постоянную температуру в течение всего года. Указанное свойство делает недра естественным резервуаром тепловой энергии, которую можно эффективно и без ущерба для окружающей среды использовать с помощью тепловых насосов. Первая успешная установка геотермального теплового насоса была осуществлена компанией «Индианаполис» в 1945 г. В последующие годы появились самые ранние формы геотермальных систем отопления [4–5]. Геотермальные тепловые насосы преобразуют геотермальную энергию в полезное тепло, производя тепловую энергию, превышающую потребление электричества в 4–5 раз. К примеру, насос мощностью 1,8 кВт может обогреть площадь в 90 кв. м. Данная технология доказала свою эффективность за более чем 40 лет использования в скандинавских странах, где цены на традиционную энергию высоки. Эти системы стали стандартом в современном строительстве, правительства субсидируют их установку в домах и требуют использования их в государственных зданиях [6].

В [7] представлен подробный обзор использования геотермальных тепловых насосов для экологичного и экономичного отопления и охлаждения домов. В работе описан принцип работы тепловых насосов, различные виды геотермальных систем, а также приведены основные факторы для выбора подходящей системы, такие как площадь земельного участка, состояние грунта и существующая отопительная инфраструктура.

В [8] показано, как компании могут добиться повышения прибыли и эффективности, перейдя на альтернативные источники энергии и сократив выбросы углекислого газа. В работе на практиче-

ских примерах показано, что сокращение выбросов углекислого газа не сказывается на прибыли компаний. Наоборот, компании, которые переходят на современные методы отопления, такие как геотермальные тепловые насосы, чтобы сократить выбросы парниковых газов, часто добиваются повышения производительности, снижения затрат и увеличения рентабельности. Компании, добивающиеся снижения выбросов парниковых газов до 50 %, отмечают сокращение расходов и рост эффективности, что обеспечивает окупаемость минимум 50 % вложений в экологически устойчивые технологии.

В работе [9] рассматривается развитие геотермальной технологии и ее растущее глобальное внедрение. Показано, что тепловые насосы способны вырабатывать значительно больше энергии, чем потребляют электроэнергии, при этом геотермальные системы демонстрируют особенно высокую эффективность. Данные системы превосходят тепловые насосы с воздушным источником энергии, производя от трех до шести единиц энергии для отопления или охлаждения на каждую единицу потребляемой энергии. Их повышенная эффективность обусловлена ключевыми технологическими достижениями, включая тестирование теплового отклика для оценки свойств грунта, разработки инъекционных материалов с превосходной теплопроводностью и модернизацию конструкций тепловых насосов, способных выдерживать более высокие температуры подачи.

В Российской Федерации внедрение этой технологии было отложено из-за наличия в Советском Союзе дешевого газа. Однако с изменением экономических условий и ростом цен на энергоносители частные лица и предприятия ищут более экономичные решения, что приводит к росту спроса на тепловые насосы, созданные по успешной европейской модели.

В программе Правительства РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. № 2446-Р) [10] представлена амбициозная дорожная карта по достижению качественного скачка в энергоэффективности с особым акцентом на устойчивые технологии отопления, такие как геотермальные тепловые насосы. В рамках усилий по снижению энергоемкости ископаемого топлива в экономике страны на 40 % российское правительство уделяет значительное внимание возобновляемым источникам энергии, включая геотермальную энергию и выделяя бюджетные средства на поддержку исследований и разработок, направленных на повышение эффективности этих систем в суровых климатических условиях, особенно в Сибири

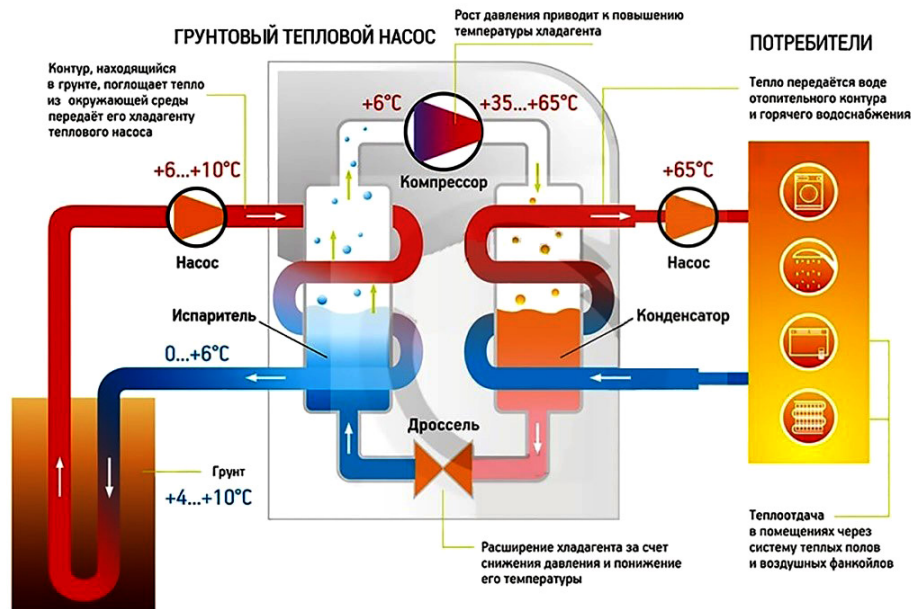


Рис. 1. Принцип работы геотермального теплового насоса

Fig. 1. Operating principle of a geothermal heat pump

Источник: <https://makipa.ru/stati/montazh-sistem-otopleniya/geotermalnoe-otoplenie-osnovnye-vidy/>

и на Дальнем Востоке. Стимулы включали в себя щедрые гранты для поощрения частного сектора и домохозяйств к внедрению этой технологии, а также поправки к строительным нормам и правилам для облегчения ее интеграции в новые проекты. Наиболее серьезными проблемами, с которыми столкнулась государственная программа, были высокая первоначальная стоимость бурения скважин и установки контуров заземления, а также нехватка квалифицированного технического персонала для обслуживания сложных систем. Несмотря на это, в рамках программы было успешно установлено 500 систем геотермальных тепловых насосов в элитных жилых комплексах в Москве и на туристических объектах. Наиболее ярким примером успешной реализации программы является внедрение систем геотермальных тепловых насосов на туристических объектах в Сочи, где проходили зимние Олимпийские игры 2014 г. Системы также успешно применяются для отопления школ и больниц в отдаленных районах, снижая их зависимость от ископаемого топлива. В результате геотермальные тепловые насосы были вновь включены в Национальную энергетическую стратегию до 2035 г. и стали одним из ключевых компонентов стандартов устойчивого строительства. Последние данные свидетельствуют об устойчивом росте рынка геотермальных тепловых насосов на 12 % в год, что отражает растущее доверие потребителей и инвесторов к этой экологически чистой технологии.

В [11] рассматривается применение геотермальных тепловых насосов в жилых зданиях и экономическая целесообразность использования технологий геотермальных тепловых насосов для отопления и охлаждения по сравнению с традиционными системами, такими как газ и электричество. Результаты исследования показывают, что геотермальные тепловые насосы являются более энергоэффективными, позволяя экономить от 30 до 50 % эксплуатационных расходов в год, хотя первоначальные затраты на установку могут быть относительно высокими. Срок окупаемости инвестиций составляет

от 5 до 7 лет, что делает их экономически выгодным вариантом в долгосрочной перспективе, особенно в свете растущих цен на ископаемые энергоносители и экологических проблем. Исследование также подчеркивает важность теплоизоляции, климата и типа используемой системы для определения общей эффективности.

В статье представлен всесторонний обзор современных геотермальных тепловых насосов как энергоэффективных и экологически безопасных систем отопления зданий. Рассматриваются конструктивные особенности различных типов геотермальных контуров (открытые и замкнутые, горизонтальные и вертикальные), а также принципы их работы. Особое внимание уделено анализу теплопроводных свойств грунта и их влиянию на проектирование и эффективность систем. Описаны преимущества геотермальных технологий в условиях сурового климата, приведены примеры их успешного внедрения в России и ряде других стран, указаны экономические аспекты, в том числе расчёты сроков окупаемости систем при различных вариантах сравнения с традиционными источниками тепла.

Основные принципы геотермальных тепловых насосов

Геотермальные тепловые насосы работают по принципу передачи тепла между зданием и землей через подземные трубы, заполненные жидкостью (обычно пропиленгликолем). Указанные системы отличаются от обычных систем отопления тем, что используют естественное тепло земли, а не сжигают ископаемое топливо. Земля служит постоянным источником или резервуаром тепла, поглощая или отдавая тепло в землю в зависимости от потребностей в обогреве или охлаждении. Зимой хладагент перекачивается по трубам, зарытым в землю, поглощая тепло из земли, которая теплее окружающего воздуха. После поглощения тепла из земли оно передается тепловому насосу. В результате циркулирующий в трубах фреон переходит из жидкого состояния в газообразное

и нагнетается в компрессор насоса, повышая его температуру (примерно до 70 °С). Затем это тепло передается в систему отопления здания. Летом система работает в обратном направлении. Излишки тепла из здания перекачиваются в грунт, где температура ниже, чем у окружающего воздуха. Это тепло передается изнутри здания хладагенту, который затем перекачивается обратно в грунт для распределения и поглощения [12–14] (рис. 1).

Коэффициент теплопроводности грунта является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы геотермальных тепловых насосов. Этот показатель отражает способность грунта передавать тепло от земли к проложенным в ней трубам и наоборот. Он измеряется в ваттах на метр на кельвин (Вт/м·К) [15]. Значение теплопроводности зависит от типа и состава почвы: влажные грунты обладают высокой теплопроводностью, обычно в пределах от 1,5 до 2,5 Вт/м·К, тогда как у сухих грунтов этот показатель значительно ниже — от 0,25 до 1,0 Вт/м·К. Глинистые и песчаные влажные почвы считаются хорошими теплоносителями, а такие горные породы, как гранит и базальт, являются одними из самых эффективных благодаря высокому коэффициенту теплопроводности, который может превышать 3,5 Вт/м·К [16].

Значимость данного показателя заключается в его прямом влиянии на проектирование системы: чем выше теплопроводность грунта, тем меньшая длина труб необходима, и тем выше общая эффективность установки, что позволяет снизить эксплуатационные затраты. Способность почвы к передаче тепла также зависит от её влажности, поскольку наличие воды между частицами улучшает теплопередачу. Именно поэтому на этапе проектирования часто проводится полевой тест, известный как

Thermal Response Test (испытание термического отклика), позволяющий точно определить теплопроводность грунта на месте установки.

Примерная длина трубы, необходимая для обеспечения заданной тепловой мощности, обычно рассчитывается в соответствии со следующей приблизительной зависимостью [17]:

$$L = \frac{Q}{q}, \quad (1)$$

где L — требуемая длина трубы (метры); Q — требуемая тепловая нагрузка (Вт); q — теплоемкость, которую может обеспечить каждый метр трубы в зависимости от почвы (Вт/м).

На основании предыдущей формулы можно определить примерную длину труб, необходимых для системы геотермального теплового насоса с замкнутым контуром, исходя из типа почвы и коэффициента теплопроводности, согласно табл. 1. В табл. 2 приведены средние значения температуры грунта (°С) на глубине 1,5 м в некоторых городах Российской Федерации по месяцам года [18].

Выбор способа прокладки подземных труб напрямую зависит от имеющейся площади. Обычно существует четыре основные системы контуров, одна из которых — открытый контур, а три — закрытый: горизонтальный, вертикальный и контур для прокладки в прудах и озерах.

Открытый контур

Система геотермального теплового насоса с открытым контуром — это устойчивая система отопления и охлаждения, которая основана на заборе грунтовых вод непосредственно из скважины или природного источника воды и использовании их

Таблица 1. Расчетные значения длины трубопроводов для замкнутого контура геотермального теплового насоса в зависимости от типа грунта и его коэффициента теплопроводности

Table 1. Calculated values of piping lengths for a closed loop geothermal heat pump depending on the type of soil and its thermal conductivity coefficient

Тип почвы	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Требуемая тепловая нагрузка, Вт	Требуемая длина трубы, м
Мокрая глина	2	40	10000	250
Мокрый песок	1,5	35	10000	285,7
Сухой песок	0,4	20	10000	500
Осадочные породы	2,5	50	10000	200
Сухая почва	0,8	25	10000	400

Таблица 2. Среднемесячные значения температуры грунта (°С) на глубине 1,5 м для различных городов Российской Федерации

Table 2. Average monthly values of ground temperature (°C) at a depth of 1.5 m in different Russian cities

Город	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Москва	3,8	3,2	2,7	3	6,2	9,6	12,1	13,4	12,5	10,1	7,3	5
Санкт-Петербург	1,9	2,4	1,7	1,2	1,2	3,2	6,7	9,7	11,1	10,7	8,5	5,6
Новосибирск	2,1	1,2	0,6	0,5	1,3	5	9,1	11,3	10,9	8,8	5,8	3,6
Ростов-на-Дону	8	6,6	5,9	6,8	9,9	12,9	15,5	17,3	17,5	15,8	13	10
Сочи	11,2	9,8	9,6	11	13,4	16,2	18,9	20,8	21	19,2	16,8	13,5
Якутск	-5,6	-7,4	-7,9	-7	-4,1	-1,8	0,3	1,5	1,1	0,1	-0,1	-2,4

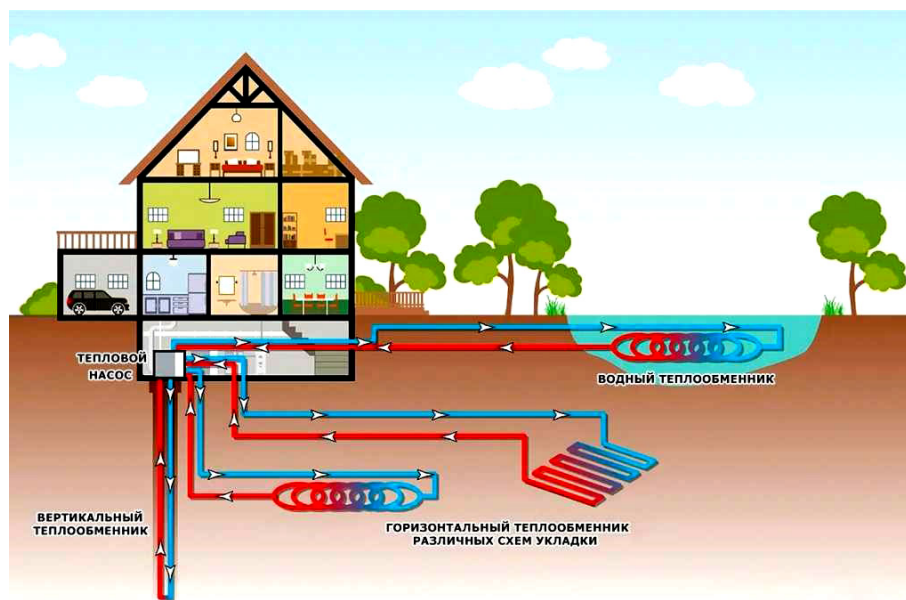


Рис. 2. Способы прокладки подземных труб геотермального насоса
 Fig. 2. Geothermal pump underground piping methods

Источник: https://razdolny.ru/charging_device/teplovyye-nasosy-rossijskogo-proizvodstva.html

тепла или холода для теплообмена в тепловом насосе. Затем вода сбрасывается либо в колодезь, либо в другой водоем в соответствии с экологическими нормами. Система отличается высокой тепловой эффективностью и способна значительно снизить затраты на электроэнергию. Однако она сталкивается с рядом проблем. Наиболее заметные проблемы, которые могут возникнуть, — загрязнение воды или наличие примесей, минералов, бактерий, сероводорода и известковых отложений, которые могут привести к закупорке труб или коррозии оборудования, что требует установки фильтров и регулярного подкисления воды [19]. Если эти показатели слишком высоки, лучше использовать систему замкнутого цикла. Изменение уровня грунтовых вод, особенно в засушливые сезоны, также может привести к неэффективности или даже остановке системы, поэтому перед внедрением рекомендуется тщательно изучить местную гидрологию. Существуют также юридические проблемы, связанные со сбросом использованной воды, что требует получения предварительных экологических разрешений. Тем не менее эта технология остается экономически и экологически жизнеспособной при условии продуманного проектирования системы, использования коррозионноустойчивых материалов, систем контроля давления и регулярного технического обслуживания для обеспечения долгосрочной устойчивости и эффективности.

В системах с замкнутым контуром механизм передачи тепла отличается, поскольку оно должно проходить через слои грунта и несколько слоев труб. Эта система основана на теплообмене между раствором антифриза и хладагентом внутри теплового насоса, где раствор антифриза подается по трубам, погруженным либо в источник воды, либо под землю [20].

Горизонтальное бурение

Горизонтальное бурение — одна из наиболее часто используемых закрытых систем, особенно в сельской местности или на открытых пространствах. В системе выкапываются горизонтальные

траншеи, обычно глубиной от 30 до 50 см, и пластиковые трубы укладываются в виде змеевиков или множества схем (например, петель, рис. 2). Система использует тепло грунта у поверхности для обмена теплом с жидкостью, протекающей внутри труб. К ее основным преимуществам относится более низкая стоимость земляных работ по сравнению с вертикальной прокладкой и простота установки. Однако она требует большой площади поверхности, что делает ее непрактичной в городских районах. Система также не подходит для интенсивной сельскохозяйственной деятельности из-за сильного промерзания почвы под действием насосов. В холодном климате, когда верхние слои почвы промерзают, это также может сказаться на производительности. Глубина установки систем наземного теплового насоса в Российской Федерации варьируется в зависимости от типа почвы и составляет от 1,3 до 2,5 м [21]. Для установки таких систем требуются большие площади — не менее 200 кв. м, а точная площадь определяется исходя из потребностей объекта в тепловой энергии. Среднее потребление оценивается примерно в 10 кВт на 100 кв. м, а работы по установке ограничены летним периодом в связи с климатическими условиями.

Вертикальное бурение

Вертикальное бурение (рис. 2) — идеальное решение в условиях ограниченного пространства, например, в городских районах или зданиях с узкой площадью. Система основана на бурении узких скважин, обычно глубиной от 30 до 150 м [22]. В каждую скважину вставляются U-образные трубы и соединяются друг с другом через центральную распределительную систему. Большая глубина позволяет круглый год сохранять тепло грунта, повышая эффективность системы, как для отопления, так и для охлаждения. Несмотря на высокую эффективность, стоимость установки относительно высока из-за необходимости использования специализированного бурового оборудования и проведения тщательных геологических исследований для определения необходимой глубины. Тем не менее

это отличный долгосрочный вариант благодаря своей стабильной работе.

Во многих случаях на российском рынке предлагается бурение скважин под наклонным углом, например 45 градусов, вместо традиционного вертикального бурения, чтобы снизить затраты на бурение [22]. Хотя этот вариант может показаться экономичным, он может привести к значительным эксплуатационным проблемам. При длительном воздействии низких температур на почву может произойти глубокое промерзание грунта, что негативно скажется на окружающей растительности. Кроме того, ошибки в инженерных расчетах, связанные с углом бурения, в некоторых случаях могут привести к структурным повреждениям фундаментов зданий, что повлечет за собой значительные затраты на ремонт.

Контуры для прокладки в прудах и озерах

В тех случаях, когда имеется постоянный источник воды, например, озеро или большой пруд, можно использовать менее дорогую систему гидроудаления с замкнутым циклом. В этом случае трубы укладываются в спираль и погружаются на дно водоема, где вода используется в качестве теплообменника для обмена энергией с жидкостью внутри труб (рис. 2). Такая система проста в установке и требует минимальных земляных работ, что значительно снижает затраты. Однако ее использование ограничено наличием большого постоянного источника воды. Кроме того, необходимо позаботиться о защите труб от биологических отложений и водорослей, а для использования водных ресурсов могут потребоваться экологические разрешения.

Первая геотермальная электростанция в России была построена в поселке Паужека на Камчатском полуострове в 1966 г., её мощность составила 5 МВт. К 2005 г. совокупная установленная мощность геотермальной энергетики достигла 79 МВт, при этом половина вырабатываемой энергии использовалась для отопления жилых домов и зданий, треть — для обогрева теплиц и около 13 % — для промышленных нужд [23].

Наиболее широко используемым типом геотермальных тепловых насосов в России являются вертикальные грунтовые тепловые насосы, доля которых составляет примерно 60 % от общего числа установок на рынке. Данные системы основаны на бурении глубоких вертикальных скважин, достигающих термически стабильных слоёв грунта, что делает их особенно эффективными в суровых климатических условиях, таких как Сибирь, где необходима значительная глубина для размещения теплообменных труб, что наиболее рационально реализуется в вертикальных системах.

Второе место по распространённости занимают горизонтальные системы, их доля оценивается в 25 %. Они отличаются относительной дешевизной и простотой монтажа, однако требуют значительных площадей для укладки труб и характеризуются сниженной эффективностью в регионах с глубоким промерзанием почвы, что ограничивает их применение в большинстве регионов России.

Системы, использующие грунтовые воды (водо-водяные тепловые насосы), составляют около 15 % от общего объёма установок. Они основаны на использовании близлежащих водоёмов или артезианских скважин в качестве источника и стока тепла. Несмотря на их высокую энергетическую эффективность, такие системы имеют ограниченное распространение из-за экологических ограничений

и необходимости получения специальных разрешений.

Одними из наиболее активных регионов по использованию геотермальных тепловых насосов являются Камчатка и Восточная Сибирь, где природная геотермальная активность делает данный вид энергии логичным и устойчивым выбором. В этих регионах реализуются инфраструктурные проекты, включающие школы, больницы и административные здания, которые полностью обеспечиваются отоплением за счёт геотермальных систем. По статистическим данным, такие проекты позволили значительно сократить выбросы CO₂, а также снизить зависимость от традиционных систем отопления, работающих на угле или дизельном топливе, которые являются дорогостоящими и экологически вредными.

В аналогичном контексте небольшие розничные предприятия, особенно магазины, специализирующиеся на продаже органических продуктов и местной продукции, стали внедрять геотермальные тепловые насосы в свою инфраструктуру. Такая тенденция отражает стремление к продвижению концепции «зеленой энергетики» и снижению углеродного следа, что положительно сказывается на восприятии этих магазинов среди российских потребителей. Согласно отчётам, такие торговые точки смогли извлечь выгоду из термической стабильности, обеспечиваемой системой, что позволило сохранить качество продукции, снизить количество отказов традиционного холодильного и отопительного оборудования, а также сократить ежегодные расходы на коммунальные услуги примерно на 50 % [23].

Согласно [24], в лаборатории Мурманского государственного технического университета было проведено экспериментальное исследование, направленное на определение коэффициента эффективности теплового насоса (КТН). Данный параметр характеризует отношение произведённой тепловой энергии к потребляемой электрической, что позволяет оценить энергетическую эффективность устройства. В ходе эксперимента в качестве исследуемого объекта применялся бытовой кондиционер инверторного типа, состоящий из внутреннего и наружного блоков. Особенностью данного оборудования является возможность работы в двух режимах: обогрева и охлаждения, что обеспечивает его круглогодичную эксплуатацию — в летний период для кондиционирования воздуха, а в зимний — в качестве отопительного прибора. Процедура испытаний включала несколько этапов. Сначала запускалась система и задавалась нужная температура с помощью панели управления. Далее осуществлялось наблюдение за показаниями давления и температуры до момента стабилизации параметров. После этого данные замеров вносились в таблицу, на их основе в специализированной программе строилась рабочая диаграмма цикла, а затем проводились расчёты коэффициента эффективности по установленной методике. Результаты показали, что значение КТН составило 4,64, что означает: на каждую единицу потреблённой электроэнергии приходится 4,64 единицы полученной тепловой энергии, что свидетельствует о высокой эффективности системы. Помимо лабораторных испытаний технологии тепловых насосов успешно применяются в Мурманской области на практике. Так, в городе Мончегорск промышленный тепловой насос был установлен на очистных сооружениях сточных вод. Система использует низ-

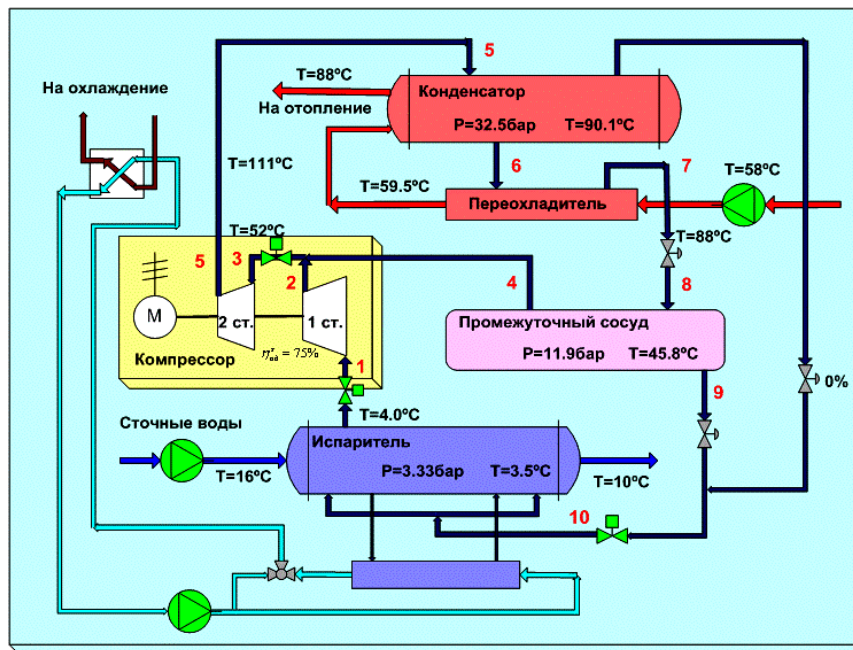


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема высокотемпературного теплового насоса, работающего на низкопотенциальном тепле сточных вод:

- 1 — теплообменник-утилизатор; 2 — испаритель; 3 — компрессор;
 4 — конденсатор; 5 — регулятор давления; 6 — система подачи сточных вод;
 7 — система отбора тепловой энергии [25]

Fig. 3. Principal thermal scheme of a high-temperature heat pump operating on low-potential heat of waste water: 1 — heat exchanger-utilizer; 2 — evaporator; 3 — compressor; 4 — condenser; 5 — pressure regulator; 6 — wastewater supply system; 7 — heat energy extraction system [25]

копотенциальное тепло сточных вод, нагревая их до 70°C и снижая затраты на отопление. Стоимость проекта составила около 8 миллионов рублей, при этом срок окупаемости — 4,5 года. Экономический эффект оказался значительным: себестоимость одной гигакалории тепла, вырабатываемой тепловым насосом, оказалась на 40 % ниже, чем при использовании традиционных котельных, работающих на мазуте. Таким образом, применение тепловых насосов, особенно в условиях сурового климата Крайнего Севера, представляет собой перспективное и экологически безопасное решение. Благодаря влиянию тёплого течения Северо-Атлантического океана побережье Баренцева моря не замерзает даже зимой, что создаёт благоприятные условия для эффективного использования геотермальных и водных источников тепла. Установка тепловых насосов на очистных сооружениях и в системах водооборота предприятий открывает большие возможности по повторному использованию энергии и сокращению вредных выбросов в атмосферу.

В [25] рассматривается эффективность и целесообразность использования тепловых насосов, особенно большой мощности, в системах централизованного теплоснабжения. Отмечается, что такие установки способны передавать потребителям в 3–5 раз больше тепловой энергии, чем потребляют в виде электроэнергии, что делает их как энергоэффективными, так и экологически безопасными. В работе приводятся примеры широкого распространения тепловых насосов в развитых странах, где они успешно используются в масштабных проектах теплоснабжения, используя в качестве источников тепла морскую воду или сточные воды. В качестве иллюстрации приведён пример экспериментального исследования, в ходе которого была испытана

тепловая насосная установка тепловой мощностью 17 МВт, работающая на теплосодержании сточных вод. Установка включала двухступенчатый центробежный компрессор и промежуточный ресивер, в качестве хладагента использовался экологически безопасный R-134a (рис. 3).

В ходе эксперимента сточные воды охлаждались с 16 до 10°C , а сетевая вода нагревалась с 58 до 88°C . Электропотребление составляло $7,1$ МВт, а коэффициент преобразования тепла достигал $2,4$, что считается высоким показателем при значительной разнице температур в испарителе и конденсаторе. Также рассматривался альтернативный режим работы установки, использующей в качестве источника тепла обратную сетевую воду. При этом коэффициент преобразования тепла увеличивался до $4,2$, а потребление электроэнергии снижалось до $4,1$ МВт. Полученные данные демонстрируют высокий потенциал применения тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения, особенно при адаптации к региональным условиям, наличии государственной поддержки и разработке новых, экологически безопасных хладагентов, пригодных для работы при высоких температурах.

В [26] была проведена оценка эффективности и экономичности геотермальной теплонасосной системы, применяемой в высотных жилых зданиях в Южной Корее, по сравнению с традиционными системами отопления, такими как централизованное теплоснабжение и электрический тепловой насос. Была построена динамическая имитационная модель энергопотребления, учитывающая условия проживания людей, нагрузку на здание и эксплуатационные характеристики системы (рис. 4).

Результаты показали, что эффективность системы может повыситься на $12,6\%$ в зависимости

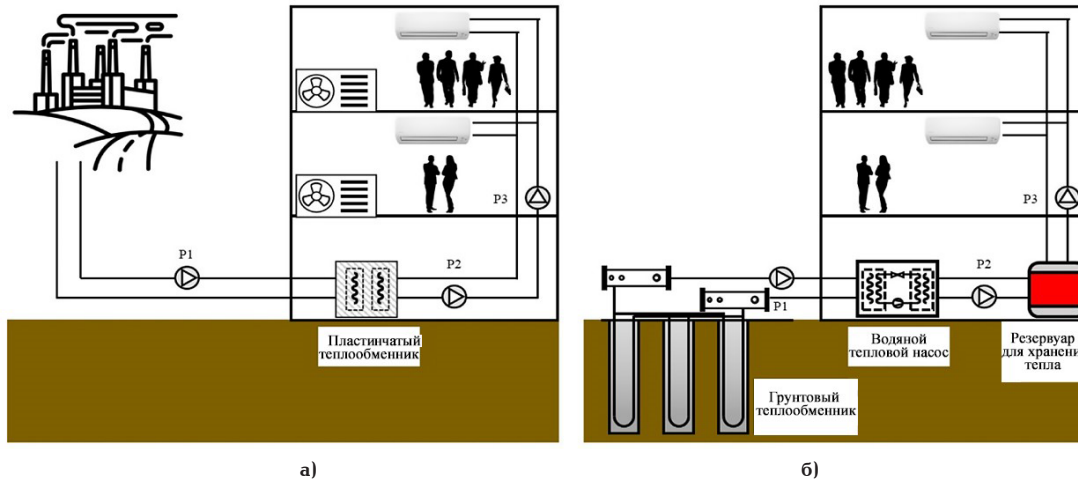


Рис. 4. Схемы систем теплового насоса с грунтовым источником тепла, централизованного теплоснабжения и электрического теплового насоса:

- а) система централизованного теплоснабжения и электрический тепловой насос;
 б) система грунтового теплового насоса [26]

Fig. 4. Schemes of ground source heat pump, district heating and electric heat pump systems:
 а) district heating system and electric heat pump; б) ground source heat pump system [26]

от таких факторов, как емкость теплоаккумулятора, длина геотермальных теплообменников и рабочая температура. Хотя первоначальная стоимость инвестиций в систему геотермального теплового насоса была на 51,5–84,7 % выше, ежегодные эксплуатационные расходы были на 20,8–33,1 % ниже, чем у традиционных систем, что делает систему более экономичной в долгосрочной перспективе. Исследование также показало, что ежегодные выбросы углекислого газа от геотермальной тепловой насосной системы были на 49,1% ниже, что еще больше повышает ее роль в снижении углеродного следа.

В [27] было проведено исследование по оценке производительности и эффективности систем геотермальных тепловых насосов в сочетании с фотоэлектрическими коллекторами в трех иракских городах с различным климатом: Багдад, Мосул и Басра. В исследовании использовалось динамическое моделирование с помощью программного обеспечения TRNSYS для имитации гибридной системы и анализа ее тепловых и электрических характеристик в течение 40-летнего периода. Результаты показали, что включение фотоэлектрических коллекторов позволило сократить длину котлована на 45%, а также добиться экономии энергии на 25,7 %, следовательно, увеличить чистую приведенную стоимость на 13,2 %. В Багдаде комбинированные системы сэкономили 200 МВт·ч в год, 93 % из которых пришлось на тепловой насос. Экономический анализ показал, что, несмотря на увеличение первоначальных инвестиционных затрат на 16,47 %, сокращение расходов на земляные работы и повышение эффективности эксплуатации привели к снижению базовых затрат на 27,14 %. В результате исследования усатновлено, что сочетание фотоэлектрических систем с геотермальным тепловым насосом в суровом климате, как в Ираке, обеспечивает устойчивые и эффективные решения в области тепловой энергии в условиях плотной застройки.

В [28] проведено исследование, направленное на оценку целесообразности и эффективности геотермальной системы централизованного теплоснабжения в Цэцэрлэге (Монголия) путем ее объединения с ветроэлектростанцией и резервным угольным котлом.

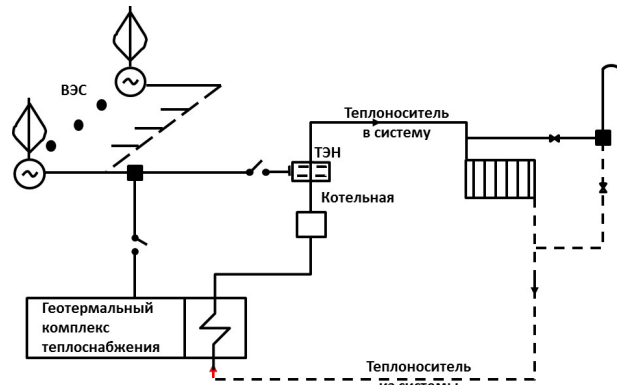


Рис. 5. Принципиальная схема ветро-геотермального комплекса теплоснабжения: ВЭС — ветроэлектрическая станция; ТЭН — электронагреватель [28]

Fig. 5. Basic scheme of the wind-geothermal heat supply complex: WES — wind power plant; TEN — electric heater [28]

Рис. 5 представляет собой принципиальную схему интегрированной системы теплоснабжения, основанной на комбинированном использовании тепловой насосной станции (ТНС), ветроэлектростанции (ВЭС) и резервной угольной котельной для покрытия пиковых нагрузок. Такая схема признана наиболее эффективной для города Цэцэрлэг благодаря наличию значительных геотермальных ресурсов и высокого ветрового потенциала в окрестностях города. Геотермальная энергия используется для покрытия базовой части тепловой нагрузки, в то время как ветроустановки обеспечивают большую часть тепловой энергии в периоды пикового потребления. В периоды отсутствия ветра в работу включается угольная котельная. Дополнительно электрическая энергия, вырабатываемая ВЭС, может быть направлена на привод компрессоров ТНС, что позволяет снизить потребление внешней электроэнергии и повысить общую энергоэффективность комплекса.

Результаты показали, что использование теплонасосной системы позволяет значительно сократить вредные выбросы и снизить общее воз-

Таблица 3. Оборудование, используемое для обеспечения отопления и горячего водоснабжения
Table 3. Equipment for heating and hot water supply

Компонент	Технические характеристики	Стоимость (в рублях, 2024 г.)
Тепловой насос мощностью (10 кВт)	Тип: тепловой насос «вода-вода» (для отопления и горячей воды)	500 000
Глубина бурения (100 м) Система	Вертикальное бурение, U-образная труба из полиэтилена высокой плотности	300 000
Система распределения	Подогрев пола (теплый пол)	200 000
Дополнительные расходы	Монтаж, электричество, разрешения	100 000
Общая стоимость		1 100 000

Таблица 4. Сравнение сроков окупаемости в разных городах России
Table 4. Comparison of return on investment in different Russian cities

Город	Зимняя температура, °С	Коэффициент полезного действия	Ежегодная экономия, руб.	Срок окупаемости без государственной поддержки	Срок окупаемости с государственной поддержкой
Москва	От -10 до -15	3,5–4	89285–93750	12,3–11,7 лет	8,6–8 лет
Сочи	От 0 до +5	4,5–5	100000–110000	11–10 лет	7,9–7 лет
Норильск	От -30 до -35	2,5–3	60000–70000	18–15 лет	12–11 лет

действие на окружающую среду при сохранении хороших экономических показателей. Кроме того, создание системы, сочетающей возобновляемые источники энергии (геоэлектрические и ветровые), обеспечивает стабильное энергоснабжение даже в периоды пикового спроса и снижает зависимость от угля, импортируемого из отдаленных регионов. В результате исследования был сделан вывод, что данная интегрированная модель централизованного теплоснабжения является не только экологически устойчивым, но и экономически выгодным вариантом с периодом окупаемости 2–4 года, что делает ее практически осуществимым решением в климатических и природных условиях, аналогичных Цэцэрлэгу.

Для оценки экономической эффективности использования геотермальных тепловых насосов в России представлен упрощенный пример установки вертикальной замкнутой геотермальной системы отопления для небольшого жилого дома в Москве. В анализе будет проведено сравнение с традиционными системами теплоснабжения. В табл. 3 представлено оборудование, используемое для обеспечения отопления и горячего водоснабжения, а также их общая стоимость [29].

Среднегодовое потребление энергии на отопление и горячее водоснабжение для небольшого жилого дома составляет около 25 000 кВт·ч. С учетом того, что коэффициент преобразования геотермального теплового насоса в условиях суровой зимы достигает приблизительно 3,5 (то есть на 1 кВт·ч потребляемой электроэнергии производится 3,5 кВт·ч тепловой энергии), фактическое годовое потребление электроэнергии системой составляет примерно 7 143 кВт·ч. При средней стоимости электроэнергии в Москве — 5 руб. за кВт·ч; газа — 2,5 руб. за кВт·ч можно рассчитать экономию:

по сравнению с электроотоплением:
 $(25\ 000 \cdot 5) - (7\ 143 \cdot 5) = 89\ 285$ руб./год;

по сравнению с газовым отоплением:
 $(25\ 000 \cdot 2,5) - (7\ 143 \cdot 5) = 21\ 785$ руб./год.

Срок окупаемости без государственной под-

держки по сравнению с электроотоплением: $1\ 100\ 000 / 89\ 285 \approx 12,3$ года;

по сравнению с газовым отоплением: $1\ 100\ 000 / 21\ 785 \approx 50,5$ лет — что делает проект нецелесообразным без субсидий.

В то же время в ряде регионов России предоставляются субсидии до 30 % от стоимости оборудования и монтажа [10], что позволяет сократить срок окупаемости примерно до 8,6 года, делая установку геотермального теплового насоса более привлекательной с экономической точки зрения. В табл. 4 приведено сравнение сроков окупаемости в разных городах России с учетом влияния государственных субсидий.

На основании предыдущих результатов отмечается, что системы геотермальных тепловых насосов являются наиболее эффективным и целесообразным вариантом в регионах с мягкими зимами, таких как Москва и Сочи, предлагая значительную долгосрочную экономию затрат на отопление по сравнению с электрическими котлами или газовыми системами. Срок окупаемости таких систем составляет от 11 до 13 лет без субсидий, и этот срок может быть сокращен до 7–9 лет с учетом государственных субсидий, покрывающих около 30 % стоимости.

Расчет полной стоимости жизненного цикла геотермальных тепловых насосов представляет собой комплексный экономический анализ, охватывающий все этапы функционирования системы, — от первоначальных капитальных вложений на приобретение и установку оборудования до затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание, замену ключевых компонентов, а также расходов, связанных с демонтажом, безопасной утилизацией оборудования и рекультивацией территории по завершении срока службы (табл. 5).

Таким образом, формула расчета стоимости жизненного цикла (в рублях):

$$L_{CC} = C_{\text{начальная}} + \sum_{n=1}^T \left(\frac{C_{\text{эксплуатация}} + C_{\text{обслуживание}}}{(1+r)^n} \right) + C_{\text{замена}} + C_{\text{конечная}} \quad (2)$$

Таблица 5. Компоненты стоимости жизненного цикла
Table 5. Components of life cycle costs

Компонент	Детали	Метод расчета
Первоначальные затраты	Цена насоса, бурение, установка, разрешения	Сумма prepaid счетов
Эксплуатационные расходы	Электричество, обслуживание, ремонт	Годовое потребление × тариф + обслуживание
Затраты на замену	Запчасти (например, компрессоры)	Стоимость детали × количество замен
Конечные затраты	Демонтаж или утилизация системы	≈ 10–20 % от первоначальной стоимости

где $C_{\text{начальная}}$ — первоначальная стоимость; $C_{\text{эксплуатация}}$ — годовые эксплуатационные затраты (электричество); $C_{\text{обслуживание}}$ — годовое обслуживание; $C_{\text{замена}}$ — замена оборудования; $C_{\text{конечная}}$ — конечная стоимость; r — ставка дисконтирования (3 % для России); T — срок службы (25 лет).

Расчеты будут выполнены для ранее упомянутого примера небольшого дома в Москве:

- первоначальная стоимость: 1100000 руб. (включая насос, бурение, установку);
- годовое потребление энергии: 6250 кВт·ч (при КПД = 4,0);
- тариф на электричество: 5 руб./кВт·ч (с ежегодным ростом на 2 % из-за инфляции);
- годовое обслуживание: 10000 руб. (рост на 1 % в год);
- замена компрессора через 15 лет: 200000 руб.;
- конечная стоимость: 150000 руб.;
- ставка дисконтирования (r): 3 %.

На основании представленных выше данных совокупные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание геотермальной системы в течение 25-летнего срока службы составят ориентировочно 1 050 000 руб. Дополнительно при расчёте учитываются расходы на замену компрессора и окончательные затраты, связанные с демонтажом оборудования, его безопасной утилизацией и рекультивацией площадки. При условной ставке дисконтирования 3 % приведённые расходы на замену компрессора (200000 руб.) и на демонтаж с утилизацией (150000 руб.) составят соответственно: $(200000 / 1,03^{15}) + (150000 / 1,03^{25})$, что в сумме составляет около 164000 руб. Таким образом, в соответствии с формулой (2), общая приведённая стоимость проекта за 25 лет эксплуатации составляет приблизительно 2313000 руб.

Сравнительный анализ стоимости жизненного цикла (LCC) различных систем отопления демонстрирует, что геотермальные тепловые насосы (ГТН) обладают значительными экономическими преимуществами по сравнению с альтернативами. В частности, затраты на протяжении 25 лет эксплуатации ГТН составляют около 2,31 млн руб., что ниже, чем у систем на газе (3,2 млн руб.) и электроэнергии (4,5 млн руб.). Экономия при использовании ГТН достигает от 25 до 50 %. На итоговый показатель LCC влияют такие факторы, как эффективность теплового насоса (чем выше коэффициент производительности, тем ниже расходы на электроэнергию), тарифы на энергоресурсы (например, рост тарифа на электричество до 6 руб./кВт·ч может снизить LCC на ≈2,1 млн руб.) и государственная поддержка (например, субсидия в размере 30 % от начальной стоимости оборудования может сократить LCC до ≈2 млн руб.). В целом, ключевым фактором является начальный инвестиционный вклад (до 50 %

от LCC), который компенсируется за счёт низких эксплуатационных расходов в долгосрочной перспективе.

Выводы

1. Геотермальные тепловые насосы являются высокоэффективным и экологически устойчивым решением для систем отопления зданий, демонстрируя значительную экономию энергоресурсов в долгосрочной перспективе.
2. Применение различных типов грунтовых контуров (открытых и закрытых, вертикальных и горизонтальных) позволяет адаптировать системы к различным климатическим и геологическим условиям, обеспечивая гибкость проектирования.
3. Наибольшую эффективность геотермальные системы показывают в регионах с мягким климатом и стабильной температурой грунта, однако они также успешно функционируют в суровых климатических условиях при условии правильного проектирования и расчётов.
4. Эксплуатационные показатели (коэффициент преобразования тепла, сезонная эффективность, срок окупаемости) доказывают целесообразность внедрения геотермальных систем в жилом, коммерческом и государственном строительстве.
5. Основными сдерживающими факторами остаются высокая стоимость первоначальных инвестиций и ограниченные меры государственной поддержки, особенно в удалённых регионах.
6. Опыт пилотных проектов, реализованных в Москве, Сочи, Мурманске и на Камчатке, подтверждает практическую применимость и потенциал масштабного внедрения геотермальных технологий в России.
7. Для обеспечения устойчивого развития и снижения углеродного следа требуется дальнейшая интеграция геотермальных систем в государственные энергетические стратегии, нормативно-правовую базу и программы субсидирования.

Список источников / References

1. Haj Assad M. E., Nooman Amalaha M., Ramadan A. [et al.]. Geothermal heat pumps: principles and applications. *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. 2022. P. 1–8. DOI: 10.1109/ASET53988.2022.9734907.
2. Gao K., Zhao L., Wang C. [et al.]. Economic analysis of combined cooling, heating and power system coupled with heat pump based on energy PLAN. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*. 2020. P. 7268–7272. DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9327901.
3. Tetiana R., Myroslava K., Ivan S. The efficiency of nanofluid use in the heat supply system of a house with a geothermal heat pump. *2021 IEEE 11th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*. 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/NAP51885.2021.9568625.

4. Lucia U., Simonetti M., Chiesa G., Grisolia G. Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 70. P. 867–874. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.268.
5. Naveed Ahmed, Mohsen Assadi, Abdelazim Abbas Ahmed, Reyhaneh Banihabib. Optimal design, operational controls, and data-driven machine learning in sustainable borehole heat exchanger coupled heat pumps: Key implementation challenges and advancement opportunities. *Energy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 74. P. 231–257. DOI: 10.1016/j.esd.2023.04.004.
6. Фролов В. П., Щербаков С. Н., Фролов М. В., Шелгинский А. Я. Эффективность использования тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2004. № 7 (47). С. 34–39.
- Frolov V. P., Shcherbakov S. N., Frolov M. V., Shelginskiy A. Ya. Effektivnost' ispol'zovaniya teplovykh nasosov v tsentralizovannykh sistemakh teplosnabzheniya [Efficiency of using heat pumps in centralized heating systems]. *Novosti Teplosnabzheniya*. 2004. No. 7 (47). P. 34–39. (In Russ.).
7. El Haj Assad M., AlMallahi M. N., AlShabi M., Delnava H. Heating and cooling by geothermal energy. *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*. 2022. P. 1–7. DOI: 10.1109/ASET53988.2022.9734943.
8. Lloyd D. B. The smart guide to geothermal: how to harvest Earth's free energy for heating and cooling. PixyJack Press, 2011. P. 100. ISBN-10: 9780977372485; ISBN-13: 978-0977372485.
9. Pavlov A. A., Lavrenov A. A. Prospects for the implementation of innovative technologies in geothermal energy production. *2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. 2024. P. 393–396. DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554136.
10. Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года: Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 № 3268-р (ред. от 21.10.2024). Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
- Ob utverzhdenii Strategii razvitiya stroitel'noy otrasli i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda s prognozom do 2035 goda: Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 31.10.2022 № 3268-r (red. ot 21.10.2024) (On Approval of the Strategy for construction industry and housing and communal services development in the Russian Federation for period up to 2030 with a forecast up to 2035: Order of the Government of the Russian Federation of 31.10.2022 No. 3268-r (ed. of 21.10.2024). Available at ConsultantPlus. (In Russ.).
11. Васильев Г. П. Эффективность и перспектива использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы // Энергосбережение. 2007. № 8. С. 63–65. EDN: RWBMEX.
- Vasilyev G. P. Effektivnost' i perspektiva ispol'zovaniya teplovykh nasosov v gorodskom khozyaystve Moskvy [Efficiency and prospect of heat pumps usage in Moscow urban services]. *Energoberezheniye. Energy Saving*. 2007. No. 8. P. 63–65. EDN: RWBMEX. (In Russ.).
12. Гершкович В. Ф. Исследование работы теплового насоса, использующего теплоту грунта и канализационных стоков, в системе горячего водоснабжения // Новости теплоснабжения. 2007. № 7 (83). URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2465.
- Gershkovich V. F. Issledovaniye raboty teplovogo nasosa, ispol'zuyushchego teplotu grunta i kanalizatsionnykh stokov, v sisteme goryachego vodosnabzheniya [Investigation of the heat pump operation using ground heat and sewage effluent in a hot water supply system]. *Novosti Teplosnabzheniya*. 2007. No. 7 (83). URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2465. (In Russ.).
13. ГОСТ Р 54865–2011. Теплоснабжение зданий. Методика расчета энергопотребности и эффективности системы теплогенерации с тепловыми насосами. Введ. 01–07–2012. Москва: Стандартинформ, 2012. 108 с.
- GOST P 54865–2011. Teplosnabzheniye zdaniy. Metodika rascheta energopotrebnosti i effektivnosti sistemy teplogeneratsii s teplovyimi nasosami [Heat supply of buildings. Methods for calculation of energy requirements and efficiencies for heat generation with heat pump system]. 2012–07–01. Moscow, 2012. 108 p. (In Russ.).
14. Алхасов А. Б., Бутузов В. А., Алиев Р. М., Бадавов Г. Б. Современное состояние исследований и эксплуатации систем геотермального теплоснабжения в Дагестане // Материалы VI Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы» и XII школы молодых ученых «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» имени Э. Э. Шпильрайна. Махачкала: ООО «АЛЕФ», 2020. С. 67–80. DOI: 10.33580/2313-5743-2020-8-1-67-80. EDN: BTPTYF.
- Alkhasov A. B., Butuzov V. A., Aliyev R. M., Badavov G. B. Sovremennoye sostoyaniye issledovaniy i ekspluatatsii sistem geotermal'nogo teplosnabzheniya v Dagestane [Current state of research and operation of geothermal heat supply systems in Dagestan]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii «Vozobnovlyayemaya energetika: problemy i perspektivy» i XII shkoly molodykh uchennykh «Aktual'nyye problemy osvoyeniya vozobnovlyayemykh energoresursov» imeni E. E. Shpil'rayna. Renewable Energy: Problems and Prospects and Actual Problems of Renewable Energy Resources Development*. Mahachkala, 2020. P. 67–80. DOI: 10.33580/2313-5743-2020-8-1-67-80. EDN: BTPTYF. (In Russ.).
15. Сапрыкина Н. Ю. Исследование влияния на температуру грунта геотермальной системы теплоснабжения и кондиционирования в комплексе с тепловым насосом при долговременном нестационарном циклическом режиме работы // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2018. № 3 (25). С. 19–27. EDN: MLEGJX.
- Saprykina N. Yu. Issledovaniye vliyaniya na temperaturu grunta geotermal'noy sistemy teplosnabzheniya i konditsionirovaniya v komplekse s teplovyim nasosom pri dolgovremennom nestatsionarnom tsiklicheskom rezhime raboty [Investigation of the effect on the temperature of the soil of the geothermal system heat supply and air conditioning in complex with heat pump, with a long-term nonstationary cyclic operation mode]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya. Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2018. No. 3 (25). P. 19–27. EDN: MLEGJX. (In Russ.).
16. Leong W. H., Tarnawski V. R., Aittomäki A. Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance. *International Journal of Refrigeration*. 1998. Vol. 21, Issue 8. P. 595–606. DOI: 10.1016/S0140-7007(98)00041-3.
17. Wang F., You T., Yang H. Performance analysis and operation optimization of photovoltaic/thermal assisted energy-pile ground source heat pump system in cold regions. *Renewable Energy*. 2025. Vol. 244. P. 122722. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122722.
18. Васильев Г. П. Применение ГТСТ в России // Энергия: экономика, техника экология. 2009. № 7. С. 22–29. EDN: KUSHGD.
- Vasilyev G. P. Primeneniye GTST v Rossii [Application of geothermal heat pump heating systems in Russia]. *Energiya: Ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2009. No. 7. P. 22–29. EDN: KUSHGD. (In Russ.).
19. Алимгазин А. Ш., Петин Ю. М., Султангузин И. А. [и др.]. Анализ возможностей применения тепловых насосов с использованием геотермальной теплоты артезианских скважин для автономного теплоснабжения объектов в Павлодарской области // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12, № 4 (48). С. 149–159. EDN: JCHUMN.
- Alimgazin A. Sh., Petin Yu. M., Sultanguzin I. A. [et al.]. Analiz vozmozhnostey primeneniya teplovykh nasosov s ispol'zovaniyem geotermal'noy teploty artezianskikh skvazhin dlya avtonomnogo teplosnabzheniya ob'yektov v pavlodarskoy oblasti [Analysis of

the possibilities of application of heat pumps using geothermal heat of artesian wells for autonomous heat supply of objects in the Pavlodar region]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2020. Vol. 12, no. 4 (48). P. 149–159. EDN: JCHUMN (In Russ.).

20. Костенко С. А., Пискунов А. А., Ганин Н. А. Организация укладки подземного контура теплообменника при использовании низкотемпературной геотермальной системы для термостабилизации дорожного полотна на многоуровневых транспортных развязках // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 3. С. 307–313. EDN: IDYRNF.

Kostenko S. A., Piskunov A. A., Ganin N. A. Organizatsiya ukladki podzemnogo kontura teplotobmennika pri ispol'zovanii nizkotemperaturnoy geotermal'noy sistemy dlya termostabilizatsii dorozhnogo polotna na mnogourovnevnykh transportnykh razvyazkakh [Organization of laying an underground heat exchanger circuit using a low-temperature geothermal system for thermal stabilization of the roadway at multi-level traffic intersections]. *Innovatsii i investitsii. Innovation & Investment*. 2021. No. 3. P. 307–313. EDN: IDYRNF. (In Russ.).

21. Краснов Д. К. Особенности применения геотермальных тепловых насосов в индивидуальном жилищном строительстве // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023. № 12-1 (87). С. 52–55. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-12-1-52-55. EDN: GZRDCW.

Krasnov D. K. Osobennosti primeneniya geotermal'nykh teplovykh nasosov v individual'nom zhilishchnom stroitel'stve [Features of the use of geothermal heat pumps in individual housing construction]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023. No. 12-1 (87). P. 52–55. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-12-1-52-55. EDN: GZRDCW. (In Russ.).

22. Псаров С. А., Шумилин Е. В., Каменчуков А. В. Методика определения суммарной длины вертикальных скважин для геотермальных тепловых насосов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 11-1 (101). С. 61–66. DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.009. EDN: TFOOUU.

Psarov S. A., Shumilin E. V., Kamenchukov A. V. Metodika opredeleniya summarnoy dliny vertikal'nykh skvazhin dlya geotermal'nykh teplovykh nasosov [Method for determining the total length of vertical wells for geothermal heat pumps]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. International Research Journal*. 2020. No. 11-1 (101). P. 61–66. DOI: 10.23670/IRJ.2020.101.11.009. EDN: TFOOUU. (In Russ.).

23. Фёдоров А. В. Применение геотермальных тепловых насосов для отопления коммерческих и инфраструктурных объектов // *Главный энергетик*. 2021. № 11. С. 4–11. EDN: BTIIVV.

Fedorov A. V. Primeneniye geotermal'nykh teplovykh nasosov dlya otopeniya kommercheskikh i infrastrukturykh ob'yektov [Application of geothermal heat pumps for heating commercial and infrastructure facilities]. *Glavnyy energetik*. 2021. No. 11. P. 4–11. EDN: BTIIVV. (In Russ.).

24. Паюсова Е. С., Клименко М. Г., Троценко А. А. Использование тепловых насосов в качестве альтернативного источника отопления в Мурманской области // *Дневник науки*. 2023. № 10 (82). EDN: NPIGAO.

Payusova E. S., Klimenko M. G., Trotsenko A. A. Ispol'zovaniye teplovykh nasosov v kachestve al'ternativnogo istochnika otopeniya v Murmanskoy oblasti [The use of heat pumps as an alternative source of heating in the Murmansk Region]. *Dnevnik Nauki*. 2023. No. 10 (82). EDN: NPIGAO. (In Russ.).

25. Султангузин И. А., Потапова А. А. Высокотемпературные тепловые насосы большой мощности для систем теплоснабжения // *РосТепло.ру*. 2023. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2363 (дата обращения: 15.06.2024).

Sultanguzin I. A., Potapova A. A. Vysokotemperaturnyye teplovyye nasosy bol'shoi moshchnosti dlya sistem

teplosnabzheniya [High-temperature, high-capacity heat pumps for heat supply systems]. *RosTeplo.ru*. 2023. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2363 (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).

26. Kwon Y., Nam Y., Bae S., Chae H. Economic and performance analysis of ground source heat pump system for high-rise residential buildings considering practical applications. *Energy Reports*. 2023. Vol. 10. P. 4359–4373. DOI: 10.1016/j.eyr.2023.10.086.

27. Hassan Q. Energy optimization of photovoltaic-thermal-coupled ground-source heat pumps across Iraqi climates. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. Vol. 72. 106387. DOI: 10.1016/j.csite.2025.106387.

28. Стенников В. А., Жарков С. В., Соколов П. А. Исследование эффективности геотермального теплоснабжения на примере г. Цэцэрлэг // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2012. № 10. С. 245–252. EDN: PHOZVH.

Stennikov V. A., Zharkov S. V., Sokolov P. A. Issledovaniye effektivnosti geotermal'nogo teplosnabzheniya na primere g. Tsetserleg [Studying efficiency of geothermal heat supply by example of Tsetserleg city]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2012. No. 10. P. 245–252. EDN: PHOZVH. (In Russ.).

29. Каталог оборудования для геотермальных тепловых насосов. URL: <https://www.brosk.ru/heat/catalog> (дата обращения: 15.06.2024).

Katalog oborudovaniya dlya geotermal'nykh teplovykh nasosov [Catalogue of equipment for geothermal heat pumps]. URL: <https://www.brosk.ru/heat/catalog> (accessed: 15.06.2024).

ДЕЕБ АЛИ, аспирант кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

Адрес для переписки: alideb20001@gmail.com

ДОРОШИН Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

SPIN-код: 1078-8914

AuthorID (РИНЦ): 751790

Адрес для переписки: DoroshinAN@mpei.ru

ДИБ МУХАММАД, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электромеханика, электрические и электронные аппараты» Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195

Адрес для переписки: muhammaddeeb002@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 28.05.2025; принята к публикации 03.06.2025.

ДЕЕБ Али, Postgraduate at the Hydropower and Renewable Energy Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.

Correspondence address: alideb20001@gmail.com

DOROSHIN Aleksandr Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Hydropower and Renewable Energy Department,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.
SPIN-code: 1078-8914
AuthorID (RSCI): 751790
Correspondence address: DoroshinAN@mpei.ru
DEEB MUHAMMAD, Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Department, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow.

AuthorID (SCOPUS): 57216623195
Correspondence address: muhamaddeeb002@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 28.05.2025; accepted for publication 03.06.2025.