

Классификация технологий по извлечению геотермальной теплоты

В.А. Лебедев, А.Н. Федоткина✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ fedotkina.anastasiy@yandex.ru

Резюме: В статье рассматривается вопрос разработки новой классификации технологий по извлечению геотермальной энергии при обобщении и анализе существующих теоретических и экспериментальных исследований в данной области. Рассматриваются существующие подходы к классификации геотермальных систем, в том числе, с выделением гидротермальные и петротермальные технологии, а также их применение в зависимости от различных условий их использования. В работе подчеркивается значимость внедрения новых технологий и необходимость обновления классификации существующих для достижения устойчивого развития российской энергетической системы. Подчеркивается, что геотермальная энергия является экологически чистым ресурсом, геотермальные системы имеют возможность масштабирования, геотермальная энергия относится к неисчерпаемым энергоресурсам. Основное внимание уделяется созданию систематического подхода к классификации, которая учитывает разнообразие технологий и их специфические особенности. Предложенная классификация включает пять уровней, охватывающих источники теплоты, расположение зоны отбора, глубину залегания источника теплоты, принцип реализации и тип извлечения источника теплоты. В статье рассматриваются преимущества и недостатки различных систем. В результате исследования были проведены оценка и ранжирование технологий по критериям стоимости, экологической безопасности, надежности и потенциала для масштабирования. Предложенные классификация и критерии оценок позволят систематически описать и сравнить различные типы геотермальных технологий по извлечению геотермальной энергии, что может помочь в выборе наиболее подходящей технологии для конкретных регионов и условий. В результате исследования установлено, что геотермальные термосифоны с естественной циркуляцией рабочего тела являются рациональным выбором при применении в петротермальных циркуляционных системах.

Ключевые слова: геотермальная энергия, термосифон с естественной циркуляцией, трансфер теплоты, метод ранжирования, петротермальная энергия, гидротермальная энергия

Для цитирования: Лебедев В.А., Федоткина А.Н. Классификация технологий по извлечению геотермальной теплоты. *Горная промышленность*. 2025;(2):176–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-176-183>

Classification of geothermal heat extraction technologies

V.A. Lebedev, A.N. Fedotkina✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ fedotkina.anastasiy@yandex.ru

Abstract: This article deals with the issue of developing a new classification of geothermal energy extraction technologies by generalizing and analyzing existing theoretical and experimental studies in this field. The existing approaches to the classification of geothermal systems are considered, distinguishing hydrothermal and petrothermal technologies, as well as their application depending on different conditions of their use. The paper emphasizes the importance of introducing new technologies and updating the classification of the existing ones to achieve sustainable development of the Russian energy system. It is emphasized that geothermal energy is an environmentally friendly resource, geothermal systems are scalable, and geothermal energy belongs to inexhaustible energy resources. The focus is on creating a systematic approach to classification that takes into account the diversity of technologies and their specific characteristics. The proposed classification includes five levels covering the heat sources, location of the extraction zone, depth of the heat source, principle of implementation and type of heat source extraction. The paper discusses advantages and disadvantages of different systems. The study evaluated and ranked the technologies according to the criteria of cost, environmental safety, reliability and potential for scaling. The proposed classification and evaluation criteria will make it possible to systematically describe and compare different types of technologies for geothermal energy extraction, which can help in selecting the most appropriate technology for specific regions and conditions. Based on the study, it is found that geothermal thermosyphons with natural circulation of the working medium are a rational choice when applied in petrothermal circulation systems.

Keywords: geothermal energy, thermosyphon with natural circulation, heat transfer, ranking method, petrothermal energy, hydrothermal energy

For citation: Lebedev V.A., Fedotkina A.N. Classification of geothermal heat extraction technologies. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):176–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-176-183>

Введение

В настоящее время геотермальная энергия Земли является перспективным источником энергии, такой вид энергии находит широкое применение в ряде отраслей промышленности: энергетике, сельском хозяйстве, теплоаккумуляции и др. При отборе, транспортировании и извлечении геотермальной энергии Земли негативное антропогенное влияние на окружающую среду значительно снижено; современные геотермальные системы имеют возможность масштабирования; геотермальная энергия относится к неисчерпаемым энергоресурсам [1–3].

Широкое промышленное использование геотермальных ресурсов во многом зависит от решения научно-технических, экономических и организационных задач. Применение геотермальной энергии в промышленности демонстрирует устойчивый рост с ежегодным увеличением ее использования в мире. Прямое использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии составляет более 58% от общего объема тепловой энергии, извлекаемой из недр Земли. На втором месте по объему использования находится обогрев помещений, занимающий 21%, применение в сельском хозяйстве занимает третью позицию с долей 16%. Остальные направления использования геотермальной энергии составляют около 5% [4; 5]. Согласно статистическим данным извлечение энергии с использованием геотермальных технологий демонстрирует устойчивый рост по всему миру и сопровождается значительным увеличением установленной мощности геотермальных электростанций с 1975 г. и к 2024 г. составляет уже 22 ГВт по всему миру.

Активное использование геотермальных систем на территории Российской Федерации пришлось на середину прошлого века. В городах Кизляре, Махачкале, Избербаше и других поселениях Дагестана успешно применялись системы отопления теплиц и обогрева водоемов [6–8]. В конце 1980-х годов в Краснодарском крае существовали масштабные проекты по применению геотермального тепла в циркуляционных обогревательных системах. Принцип функционирования таких систем заключался в следующем: теплоноситель из геотермальной скважины поступал в систему отопления зданий, далее транспортировался в теплицы для поддержания температуры, необходимой для роста овощных культур, затем теплоноситель поступал в систему обогрева рыбопродуктивных прудов, после возвращался в зону теплового коллектора по замкнутому контуру [9; 10]. В настоящее время на территории Российской Федерации действуют три геотермальные станции, расположенные на полуострове Камчатка: Паужетская ГеоЭС, Менделеевская ГеоЭС и Мутновская ГеоЭС. Их суммарная мощность составляет более 70 МВт электрической энергии [11–13].

В связи с ростом использования геотермальной энергии Земли по всему миру перспективным направлением является создание новых и совершенствование существующих геотехнологий по отбору, транспортированию и извлечению геотермального тепла из подземных естественных тепловых коллекторов. В настоящее время разрабатыва-

ются способы и методы по использованию геотермальной теплоты на основе принципов ESG: повышение энергоэффективности геотермальных систем, использование георесурсов с минимизацией вреда окружающей среде.

Развитие новых и совершенствование существующих геотермальных технологий требуют расширения их классификации для систематизации и выбора метода извлечения в зависимости от условий внешней среды и выявления конкретных методов модернизации таких систем с учетом ESG-принципов.

Целью работы является разработка систематического подхода к классификации устройств по извлечению геотермальной энергии и определение критериев рационального выбора технологии извлечения тепла в зависимости от условий залегания областей с высоким температурным потенциалом.

Методология исследования

Геотермальные технологические системы по извлечению геотермального тепла разделены на две группы: гидротермальные и петротермальные [11; 14; 15].

Использование гидротермальных систем базируется на циркуляции жидкости в нагнетательных и добычных геотермальных скважинах. Гидротермальные системы применяются для отбора теплоты из естественных водоносных пластов для аккумуляции тепла в теплоприемниках и для процессов генерации электроэнергии [16–18].

При применении петротермальных систем для извлечения геотермальной энергии предполагается транспортирование теплоносителя в зону подземного теплового котла с помощью специальных геотермальных устройств, где рабочее тело прогревается до температуры массива горных пород, после чего теплоноситель транспортируется до зоны отбора теплоты [14; 19; 20].

Геотермальные установки могут классифицироваться по расположению зоны отбора: извлечение геотермальной энергии с выпуском и без выпуска тепла на поверхность. При расположении зоны отбора над поверхностью земли геотермальное тепло может быть направлено на выработку электроэнергии, отопление помещений, горячего водоснабжения и холодопроизводительность. При расположении зоны отбора под поверхностью тепло Земли используется в основном для аккумуляции энергии в подземных теплоприемниках. Выбор расположения зоны отбора происходит в зависимости от назначения геотермальной установки [21; 22].

Классификация способов разработки может проводиться на основе методов извлечения геотермальной энергии относительно глубины залегания: глубинные, приповерхностные и внутренние системы.

Для извлечения энергии из области с низкопотенциальным температурным режимом грунта в приповерхностных геотермальных системах используют добычную и нагнетательную скважины глубиной от 200 до 400 м. На данной глубине температура грунта значительно колеблется в зависимости от внешних условий, состава грунта, тепловых характеристик, влажности и других факторов, поэтому

для применения таких систем необходимо использование дополнительного оборудования для повышения их энергоэффективности и производительности. Примером вспомогательного оборудования служат тепловые насосы, пароконденсационные установки, двухфазные термосифоны, пиковые-водогрейные котельные и др. [23; 24].

Приповерхностные гидротермальные системы по принципу реализации технологии разделяются на две группы: закрытая петля, где система соединяется в грунте, и открытая петля, где устройства транспортирования располагаются в грунтовых водах. Технологии приповерхностных гидротермальных систем могут реализовываться с применением как горизонтальных, так и вертикальных геотермальных скважин.

Эффективность функционирования приповерхностных геотермальных систем зависит от изменений метеорологических условий. Для обеспечения работы установки в холодный период при пиковых нагрузках необходимо поддерживать заданные параметры дополнительными источниками тепла. Кроме того, использование данных систем возможно не повсеместно, так как источник геотермальной теплоты может находиться на значительном расстоянии от потребителя, что влечет за собой увеличение эксплуатационных и капитальных затрат.

На сегодняшний день для извлечения теплоты из зоны с высоким температурным режимом грунта (петротермальная энергетика) используют фонтанные и циркуляционные технологии [9; 25; 26].

В фонтанных технологиях по эксплуатационным скважинам нагретый теплоноситель поднимается на поверхность за счет избыточного давления в коллекторе, после отбора теплоты сбрасывается в естественные или искусственные водоемы. Фонтанные технологии характеризуются низкой энергоэффективностью эксплуатационных скважин, ограниченным сроком службы и необходимостью применения вспомогательных средств для увеличения давления в геоскважинах.

Основным направлением развития глубинной геотермальной технологии в настоящее время считается циркуляционный метод извлечения тепловой энергии из горных пород с использованием добычной и нагнетательной скважины. Традиционные геотермальные системы по методу извлечения геотермальной энергии классифицируются следующим образом: с естественными проницаемыми коллекторами, с преобразуемыми трещинными зонами, с искусственно создаваемыми коллекторами в слабопроницаемых скальных породах. Геотермальные устройства (тепловые трубы и термосифоны) помещаются внутрь добычной и нагнетательной скважин для реализации циркуляции теплоносителя внутри системы. В случае если давление на устье добычных скважин недостаточное, для создания дополнительной депрессии могут применяться погружные насосы.

В работе [27] представлена перспективная технология для извлечения геотермальной теплоты – геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела. Эта система использует разницу температур для создания естественного потока теплоносителя, что позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить эффективность. Геотермальный термосифон не требует дополнительных источников энергии для поддержания циркуляции, поскольку циркуляция теплоносителя происходит за счет естественных процессов, таких как конвекция. Это делает технологию более экономичной и надежной,

особенно в удаленных и труднодоступных районах, где обслуживание и ремонт могут быть затруднены. Кроме того, такая система минимизирует воздействие на окружающую среду. Извлекаемое геотермальное тепло с помощью геотермального термосифона применяется для отопления зданий, систем горячего водоснабжения и других процессов, требующих объемов энергии.

Результаты и их обсуждение

Традиционные схемы часто не учитывают разнообразие технологий и их специфические особенности, что может затруднять выбор рационального решения для конкретных условий эксплуатации. С развитием новых технологий извлечения геотермальной теплоты становится актуальным создание новой классификации геотермальных систем. Современные методы требуют более детального и структурированного подхода к их классификации и должны отражать различные аспекты.

После анализа перечисленных исследований была предложена классификация методов по извлечению геотермальной теплоты (рис. 1) по следующим признакам: по типу геотермальной системы; расположению зоны отбора тепла; глубине залегания; принципу реализации; типу извлечения.

Технологиям в классификации был присвоен пятиуровневый классификационный код. Определение подходящего классификатора на каждом уровне формирует окончательную структуру системы извлечения геотермальной энергии, что критически важно для определения её окончательной архитектуры. Этот выбор напрямую влияет на конструктивные особенности системы и в конечном итоге на её целесообразность.

Такая схема позволяет осуществлять выбор необходимого комплекса, ориентируясь на наличие добычной и нагнетательной скважин.

Классификация технологии по четвертому уровню связана с различиями по принципу ее реализации. В работе представлены новая циркуляционная технология с естественной конвекцией и новое запатентованное геотермальное устройство для ее реализации, а также место технологии в архитектуре представленной классификации.

Геотермальный термосифон (пат. RU 222634) основан на способе транспортирования глубинного тепла Земли и использования транспортированной тепловой энергии в целях применения в энергетике, промышленности или в отрасли народного хозяйства с возможностью автономной работы и экономии электрической энергии в условиях долгосрочных проектов. Устройство предназначено для использования в зонах с пониженной геотермальной степенью, в которых массив горных пород имеет температуру значительно более высокую относительно температуры окружающей среды над поверхностью на глубине от 10 м до 1 км. Примерами таких зон в Российской Федерации служат полуостров Камчатка, Северный Кавказ и др.

Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела включает Т-образный корпус, выполненный из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, например, алюминий. Внутри Т-образного корпуса установлена труба с воронкой. Устройство работает следующим образом: рабочая жидкость внутри системы нагревается от геотермального тепла Земли. Под воздействием передающегося тепла от грунта к поверхности устройства теплоноситель движется вверх по высоте устройства.

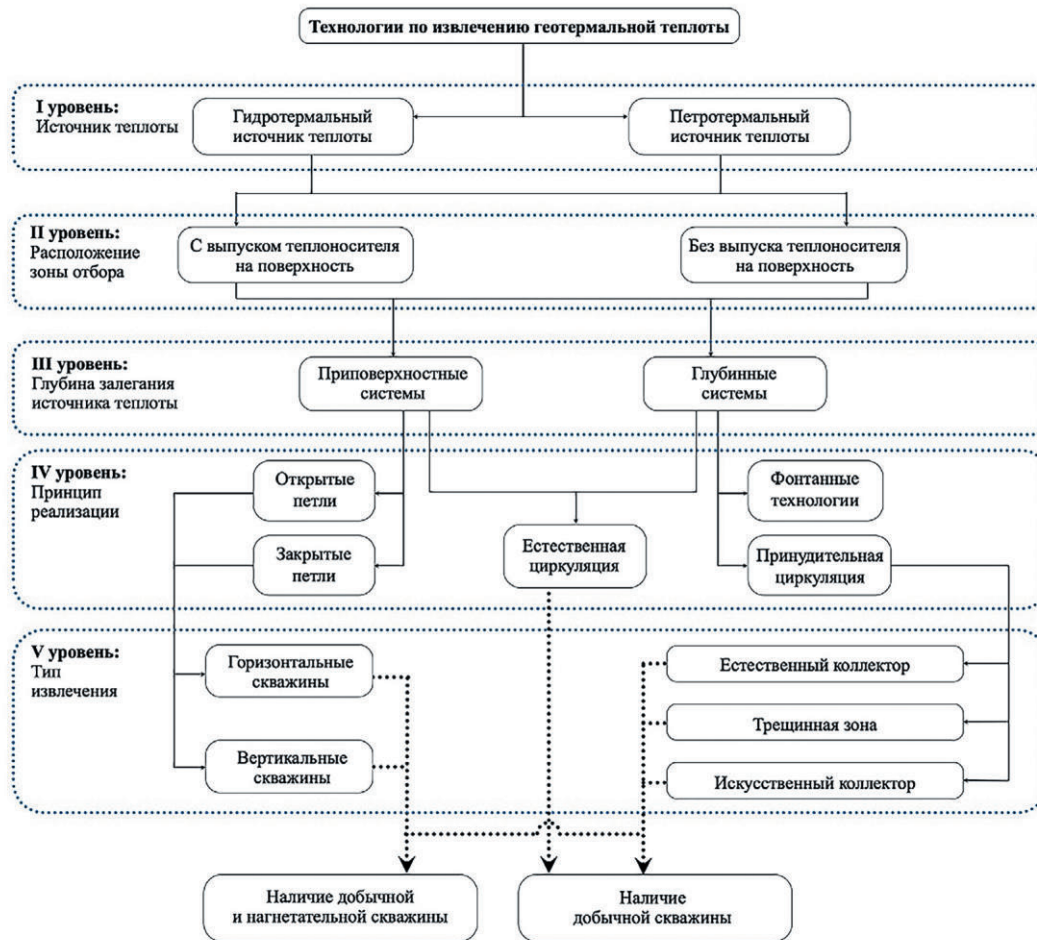


Рис. 1
Классификация технологий по извлечению геотермальной энергии

Fig. 1
Classification of the geothermal energy extraction technologies

Из-за разности плотностей нагретые слои рабочего тела за счет естественной конвекции поднимаются вверх по внутренней поверхности внешней трубки. В то же время по внутренней поверхности внутренней трубки слои с низкой температурой рабочего тела спускаются вниз. Интенсивность теплообмена между нагретыми слоями рабочего тела и низкотемпературных слоев снижается за счет термоизолятора на внутренней трубке. Создается естественная циркуляция рабочего тела по замкнутому контуру без необходимости его принудительного движения с помощью насосных установок по всей длине термосифона [18; 28].

По результатам классификаций технологий для извлечения геотермальной энергии проведено ранжирование устройств, применяемых в гидротермальных приповерхностных системах (открытые и закрытые петли), фонтанных и циркуляционных технологиях с принудительной и естественной циркуляцией по характеризующим технико-технологическим критериям на основе инженерно-логического анализа.

При ранжировании осуществляется проведение технического обоснования выбора технологии в зависимости от внешних условий и ее реализации с повышенной эффективностью. Для проведения рационального выбора технологий сформирован список критериев: стоимость, экологическая безопасность, надежность и потенциал для масштабирования извлекаемой тепловой мощности [29; 30].

Каждая система была проанализирована в соответствии с указанными критериями, и были определены соответствующие ранги (табл. 1).

При реализации гидротермальных приповерхностных технологий и циркуляционных технологий с принудительной циркуляцией требуется наличие нагнетательной и добычной скважин, что существенно увеличивает капитальные затраты на обустройство геотермальных зон. Для реализации фонтанной технологии и циркуляционных технологий с принудительной циркуляцией требуется применение вспомогательных средств для возникновения движения рабочего тела внутри установки при их эксплуатации, что существенно увеличивает эксплуатационные затраты. Для функционирования циркуляционной системы с естественной циркуляцией требуется лишь одна добычная скважина, а циркуляция рабочего тела происходит посредством естественных конвекционных процессов [23; 31].

При транспортировании геотермальной энергии с помощью гидротермальных приповерхностных систем происходит перемещение гидротермальной воды, что ведет к нарушению естественного гидрологического режима экосистемы. Для циркуляционных технологий с естественной циркуляцией в качестве теплоносителя используется вода, которая при возможной утечке не оказывает существенного негативного влияния на окружающую среду [32; 33].

Разработка дополнительной скважины увеличивает ри-

Таблица
Присвоение оценок для систем по извлечению геотермальной энергии

Table 1
Assignment of ratings for the geothermal energy extraction systems

Критерии	Гидротермальные приповерхностные технологии	Фонтанные технологии	Циркуляционные технологии с принудительной циркуляцией	Циркуляционные технологии с естественной циркуляцией
Стоимость реализации	3	2	4	1
Экологическая безопасность	4	3	1	1
Надежность геотермального устройства	2	1	4	2
Возможность масштабирования	4	2	2	3

ски возникновения чрезвычайных ситуаций, а введение вспомогательного оборудования повышает риск возникновения отказов системы [34].

Возможность масштабирования приповерхностных систем может быть ограничена технологическими аспектами, такими как глубина бурения, сложность установки оборудования и необходимость поддержания высоких стандартов безопасности. Увеличение числа скважин требует значительных инвестиций [35].

Для определения наиболее рациональной системы трансфера геотермальной энергии необходимо проверить согласованность мнений экспертов по выставленным оценкам с помощью коэффициента конкордации [36]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^n (S_j - S_{cp})^2}{m^2 \cdot n(n^2 - 1) - m \sum_{i=1}^m T_i'} \quad (1)$$

где $(S_j - S_{cp})^2$ – сумма квадратов отклонений суммы рангов по отдельным показателям от средней суммы рангов; m – количество критериев; n – количество сравниваемых систем; T_i' – поправочный коэффициент, вычисляемый для каждого критерия.

Для оценки значимости коэффициента конкордации необходимо проверить статистическую значимость критерия χ^2 , должно выполняться следующее условие:

$$m(n - 1)W > \chi_{n-1}^2, \quad (2)$$

где χ_{n-1}^2 – табличное число степеней свободы $\gamma = (n-1)$ и уровень доверительной вероятности P . Значение P рекомендуется принимать в интервале 0,95–0,99.

Полученное значение коэффициента конкордации для сравниваемых систем с выставленными оценками экспертов равно 0,30. Величина $m(n - 1)W$ равна 3,62, а значение χ_{n-1}^2 при доверительной вероятности 0,95 равно 0,35. Следовательно, условие (2) выполняется и согласованность мнений экспертов не случайна. Анализ результатов показал, что наиболее рациональной системой для трансфера

геотермальной энергии является система с наименьшей суммой оценок, т.е. циркуляционные технологии с естественной циркуляцией.

Заключение

Энергетическая устойчивость занимает ключевое место в государственных программах развития, что подчеркивает важность развития геотермальной энергетики и ее потенциала. В связи с развитием технологий по извлечению геотермальной теплоты и появлением новых технологий проведена классификация технологий по новым признакам.

В данной работе представлена классификация технологий по извлечению геотермальной энергии, которая включает в себя классификацию по типу геотермальной системы, виду использования теплоносителя, глубине залегания, типу конструкции и способу реализации. Данная классификация учитывает не только традиционные комплексы по транспортировке геотермальной энергии в районах с низким температурным режимом, но и комплексы устройств, работающих в области с высоким геотермальным потенциалом.

Такой подход позволит не только систематизировать существующие технологии, но и способствовать их дальнейшему развитию, облегчая интеграцию новых решений в существующие энергетические системы. Создание новой классификации также будет способствовать более эффективному обмену знаниями и опытом среди специалистов в области геотермальной энергетики, что в итоге приведет к более широкому внедрению устойчивых и экологически чистых технологий.

Предложенные классификация и критерии оценок позволят систематически описать и сравнить различные типы геотермальных технологий по извлечению геотермальной энергии, что может помочь в выборе наиболее подходящей технологии для конкретных регионов и условий.

Вклад авторов

В.А. Лебедев – генерация идеи и постановка задач исследования.

А.Н. Федоткина – получение данных для анализа, создание схем, написание текста статьи.

Authors' contribution

V.A. Lebedev – generation of the idea and setting of the research objectives research.

A.N. Fedotkina – obtaining data for analysis, creation of schemes, writing the text of the article.

Список литературы / References

1. Серегина А.А. Перспективы зеленой энергетики для России. *Геоэкономика энергетики*. 2023;21(1):108–122. https://doi.org/10.48137/26870703_2023_21_1_108
Seregina A.A. Prospects of green energy for Russia. *Geoeconomics of Energetics*. 2023;21(1):108–122. (In Russ.) https://doi.org/10.48137/26870703_2023_21_1_108
2. Непша Ф.С., Варнавский К.А., Воронин В.А., Заславский И.С., Ливен А.С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях. *Записки Горного института*. 2023;261:455–469. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16215> (дата обращения: 23.12.2024).
Nepsha F.S., Varnavskiy K.A., Voronin V.A., Zaslavskiy I.S., Liven A.S. Integration of renewable energy at coal mining enterprises: problems and prospects. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:455–469. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16215> (accessed: 23.12.2024).
3. Зимин Р.Ю., Сержан С.Л., Малеванный Д.В. Применение преобразователей на постоянном и переменном токе в автономных системах электроснабжения на основе ветрогенераторов в условиях арктического шельфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_69
Zimin R.Yu., Serzhan S.L., Malevanniy D.V. Application of DC/AC converters in self-contained power supply systems based on wind generators in the conditions of the Arctic Shelf. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(6):69–87. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_6_0_69
4. Романенко А.В., Жинов А.А. Определение оптимальных параметров геотермальной паротурбинной установки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024;(5):90–99. Режим доступа: https://izvuzmash.bmstu.ru/catalog/pow_met/turb/2222.html (дата обращения: 23.12.2024).
Romanenko A.V., Zhinov A.A. Determination of the optimum parameters of a geothermal steam turbine installation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024;(5):90–99. (In Russ.) Available at: https://izvuzmash.bmstu.ru/catalog/pow_met/turb/2222.html (accessed: 23.12.2024).
5. Тимашев Э.О. Методика расчета пневмокомпенсаторов для плунжерных насосов с погружным приводом. *Записки Горного института*. 2020;245:582–590. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.10>
Timashev E.O. Method of calculating pneumatic compensators for plunger pumps with submersible drive. *Journal of Mining Institute*. 2020;245:582–590. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.10>
6. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики. *Записки Горного института*. 2020;244:428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to implementation of hydrogen initiatives in the context of global energy sustainable development. *Journal of Mining Institute*. 2020;244:428–438. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.5>
7. Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О., Рычкова Т.В., Карташева Е.В., Назарова М.А., Кузьмина А.А. Влияние вторичного минералообразования на показания Na-K-геотермометра на примере гидротермальной системы Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка). *Записки Горного института*. 2023;262:526–540. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15806> (дата обращения: 23.12.2024).
Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V., Usacheva O.O., Rychkova T.V., Kartasheva E.V., Nazarova M.A., Kuzmina A.A. The impact of secondary mineral formation on Na-K-geothermometer readings: a case study for the Valley of Geysers hydrothermal system (Kronotsky State Nature Biosphere Reserve, Kamchatka). *Journal of Mining Institute*. 2023;262:526–540. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15806> (accessed: 23.12.2024).
8. Михайлов А.В., Соловьев И.В. Анализ граб-выемки волокнистого торфяного сырья. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(4):1098–1107. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-1098-1107>
Mikhailov A.V., Soloviev I.V. Grab excavation analysis of fibrous peat raw material. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(4):1098–1107. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-1098-1107>
9. Соловьев Б.А., Бодылев А.С., Павлов А.Д., Каекбирдина И.Д. Анализ перспектив развития геотермальной энергетики. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2023;19(1):117–124.
Solovev B.A., Bodylev A.S., Pavlov A.D., Kaekbirdina I.D. Analysis of geothermal power engineering and development prospects. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2023;19(1):117–124. (In Russ.)
10. Гендлер С.Г., Крюкова М.С., Алферова Е.Л. Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями. *Горные науки и технологии*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>
Gendler S.G., Kryukova M.S., Alferova E.L. Investigation of thermodynamic parameters of the air environment in subway lines with single-track and double-track tunnels. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):250–262. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-02-223>
11. Борщев Н.О. Тепловая математическая модель двухфазного контура с механическим насосом и тепловым гидроаккумулятором. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2023;(2):73–83. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-2-73-83>
Borshev N.O. Thermal mathematical model of a two-phase circuit with mechanical pump and thermal hydraulic accumulator. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2023;(2):73–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-2-73-83>
12. Шпенст В.А., Бельский А.А., Орел Е.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы. *Записки Горного института*. 2023;261:479–492. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16177> (дата обращения: 17.12.2024).
Shpenst V.A., Belsky A.A., Orel E.A. Improving the efficiency of autonomous electrical complex with renewable energy sources by means of adaptive regulation of its operating modes. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:479–492. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16177> (accessed: 17.12.2024).

13. Белова Т.П., Ратчина Т.И. Исследование сорбции лития катионитом КУ-2-8 из модельных растворов, имитирующих геотермальные теплоносители в динамическом режиме. *Записки Горного института*. 2020;242:197–201. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.197>
Belova T.P., Ratchina T.I. Research of lithium sorption by KU-2-8 cation exchanger from model solutions simulating geothermal fluids in the dynamic mode. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:197–201. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.197>
14. Пегин П.А., Филимонов Д.С. Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023;20(4):878–890. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-4-878-890>
Pegin P.A., Filimonov D.S. Features of design and construction of buildings in seismically hazardous areas with permafrost soils. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2023;20(4):878–890. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-4-878-890>
15. Кирюхин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В., Журавлев Н.Б. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации. *Записки Горного института*. 2023;263:698–714. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16305> (дата обращения: 17.12.2024).
Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V., Zhuravlev N.B. Magmatic system of the Klyuchevskoy volcano according to seismic data and their geomechanical interpretation. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:698–714. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16305> (accessed: 17.12.2024).
16. Петров И.В., Меркулина И.А., Харитоновна Т.В. Научно-методический подход к экологической оценке горнодобывающих и энергетических проектов Арктики. *Уголь*. 2023;(5):77–83. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-77-83>
Petrov I.V., Merkulina I.A., Kharitonova T.V. Scientific and methodological approach to environmental assessment of mining and energy projects in the Arctic. *Ugol'*. 2023;(5):77–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-77-83>
17. Васильев Л.Л., Журавлев А.С., Шаповалов А.В., Родин А.В., Олехнович В.А., Драгун Л.А. и др. Термосифоны и тепловые трубы в системах для использования низкопотенциального тепла. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*. 2019;(2):34–40.
Vasiliev L.L., Zhuravlev A.S., Shapovalov A.V., Rodin A.V., Olekhnovich V.A., Dragun L.A. et al. Thermosyphons and heat pipes in systems for low-grade heat utilization. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. P.O. Sukhogo*. 2019;(2):34–40. (In Russ.)
18. Богуславский Э.И., Фицак В.В. Технология и экономика освоения приповерхностных геотермальных ресурсов. *Записки Горного института*. 2017;224:189–198. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.189>
Boguslavskii E.I., Fitsak V.V. Technology and economics of near-surface geothermal resources exploitation. *Journal of Mining Institute*. 2017;224:189–198. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.2.189>
19. Шевчук А.М., Карасёв С.Ю., Лебедь Б.П., Сивохина Н.В. Применение новых строительных материалов и технологий дистанционного зондирования участков местности в экостроительстве. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(8):116–124.
Shevchuk A.M., Karasev S.Yu., Lebed B.P., Sivokhina N.V. Application of new building materials and technologies for remote sensing of terrain in eco-costruction. *Izvestiya Tulsckogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki*. 2023;(8):116–124. (In Russ.)
20. Костенко С.А. Применение энергосберегающей геотермальной термостабилизации дорожного полотна на транспортных развязках, эстакадах и автостоянках аэропортов. *Инновации и инвестиции*. 2021;(10):102–109.
Kostenko S.A. Application of energy-saving road clothing geothermal thermostabilization at airports' traffic intersections, overhead roads and parkings. *Innovation & Investment*. 2021;(10):102–109. (In Russ.)
21. Zhang Y., He Z., Qu F., He D., Hao H., Jiang H. Numerical simulation of geothermal energy from dry hot rocks with gravity heat pipe. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;647:012124. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/647/1/012124>
22. Stroykov G., Cherepovitsyn A.Y., Iamshchikova E.A. Powering multiple gas condensate wells in russia's arctic: power supply systems based on renewable energy sources. *Resources*. 2020;9(11):130. <https://doi.org/10.3390/resources9110130>
23. Bist N., Sircar A. Hybrid solar geothermal setup by optimal retrofitting. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;28:101529. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101529>
24. Cherepovitsyn A., Rutenko E. Strategic planning of oil and gas companies: the decarbonization transition. *Energies*. 2022;15(17):6163. <https://doi.org/10.3390/en15176163>
25. Кирюхин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В., Журавлев Н.Б. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации. *Записки Горного института*. 2023;263:698–714. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16305> (дата обращения: 17.12.2024).
Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V., Zhuravlev N.B. Magmatic system of the Klyuchevskoy volcano according to seismic data and their geomechanical interpretation. *Journal of Mining Institute*. 2023;263:698–714. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16305> (accessed: 17.12.2024).
26. Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A., Jaxybulatov K. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013;263:75–91. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014>
27. Соловьев И.Г., Панышин А.Е. Линеаризованный алгебраический анализ предельных температурных состояний мерзлых оснований, обустроенных термосифонами. *Вестник кибернетики*. 2007;(6):25–32.
Solovyev I.G., Pan'shin A.Ye. Linearized algebraic analysis of extreme temperature conditions of frozen foundations supplied with freezing siphons. *Proceedings in Cybernetics*. 2007;(6):25–32.

28. Лебедев В.А., Зайцева Е.А., Федоткина А.Н. Геотермальный термосифон с естественной циркуляцией рабочего тела. Патент RU 222634 U1 Российская Федерация. Заявл. 27.11.2023, опублик. 16.01.2024.
29. Епифанов А.А., Дымо Б.В., Долганов Ю.А., Анастасенко С.Н. Экспериментальное исследование двухфазных закрытых термосифонов для экономайзеров котлов. *Проблемы региональной энергетики*. 2020;(2):65–78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898239>
Epifanov A.A., Dymo B.V., Dolganov Y.A., Anastasenko S.N. Experimental investigation of two-phase closed thermosiphons for boiler economizers. *Problems of the Regional Energetics*. 2020;(2):65–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898239>
30. Максимов В.И., Нурпейис А.Е. Новый подход к моделированию процесса формирования теплового режима термосифонов больших размеров для использования геотермальной теплоты. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(8):78–86. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2214>
Maksimov V.I., Nurpeis A.E. New approach to modelling the formation of large-sized thermosiphons thermal regime for using geothermal heat. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(8):78–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2214>
31. Eidan A.A., Najim S.E., Jalil J.M. An experimental and a numerical investigation of HVAC system using thermosyphon heat exchangers for sub-tropical climates. *Applied Thermal Engineering*. 2017;114:693–703. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.027>
32. Карабарин Д.И., Михайленко С.А. Использование низкопотенциальных источников энергии на основе органического цикла Ренкина. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2018;11(7):867–876. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0101>
Karabarin D.I., Mihailenko S.A. The use of low-potential energy sources based on organic Rankine cycle. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2018;11(7):867–876. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0101>
33. Martynova T.A., Gilenko E.V., Kitaeva E.M., Bondar V.A., Orlova E.V., Drozdova N.P., Cherenkov V.I. Interdisciplinary communicative competence: From conceptualising to operationalising. *Education and Science Journal*. 2023;25(4):12–36. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2023-4-12-36>
34. Мовчан И.Б., Шайгаллямова З.И., Яковлева А.А. Выявление факторов структурного контроля коренных золоторудных проявлений методом беспилотной аэромагниторазведки на примере Нерюнгринского района Якутии. *Записки Горного института*. 2022;254:217–233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
Movchan I.B., Shaygallyamova Z.I., Yakovleva A.A. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungriskiy district of Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:217–233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.23>
35. Куликова Е.Ю., Полянкин А.Г., Потокина А.М. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений. *Записки Горного института*. 2023;264:895–905. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/iew/15784> (дата обращения: 17.12.2024).
Kulikova E.Y., Polyankin A.G., Potokina A.M. Specifics of geotechnical risk control in the design of underground structures. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:895–905. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15784> accessed: 17.12.2024).
36. Александров А.А., Акатьев В.А., Тюрин М.П., Бородин Е.С., Седяров О.И. Аналитическое исследование теплообмена при нагреве или охлаждении лимитированного объема жидкости. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки*. 2021;(6):17–34. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-17-34>
Aleksandrov A.A., Akatev V.A., Tyurin M.P., Borodina E.S., Sedlyarov O.I. Analytical study of heat transfer when heating or cooling a limited volume of liquid. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2021;(6):17–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-6-17-34>

Информация об авторах

Владимир Александрович Лебедев – кандидат технических наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0956-5772>; e-mail: Lebedev_VA@pers.spmi.ru

Анастасия Николаевна Федоткина – аспирант кафедры теплотехники и теплоэнергетики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-0956-5772>; e-mail: fedotkina.anastasiy@yandex.ru.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.01.2025

Поступила после рецензирования: 05.03.2025

Принята к публикации: 18.03.2025

Information about the authors

Vladimir A. Lebedev – Cand. Sci. (Eng.), Professor, Department of Heat engineering and thermal power engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: Lebedev_VA@pers.spmi.ru

Anastasia N. Fedotkina – Postgraduate Student, Department of Heat engineering and thermal power engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: fedotkina.anastasiy@yandex.ru.

Article info

Received: 16.01.2025

Revised: 05.03.2025

Accepted: 18.03.2025