

УДК: 621.644.4:620.92

Жоробеков Болотбек Астаевич, к.т.н., доцент,
SPIN-код: 2775-7236, AuthorID: 919241
Режевалиев Байыш Режевалиевич, магистрант,
Песочин Олег Абдурахманович, преподаватель,
Ошский технологический университет,
г. Ош, Кыргызская Республика

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

В условиях растущего глобального спроса на экологически чистые и устойчивые источники энергии геотермальные ресурсы приобретают особую значимость как надежное и эффективное решение. Их актуальность особенно проявляется в регионах с высоким геотермальным потенциалом, таких как город Джалал-Абад в Кыргызской Республике. Однако успешное освоение этих ресурсов сопряжено с необходимостью учета сложного взаимодействия множества факторов: термического сопротивления пород, изменения геотермального градиента и показателей теплопроводности. Эти параметры играют ключевую роль в эффективности процессов теплопередачи. Цель данного исследования заключается в разработке многофакторной математической модели, способной детализировать влияние термических характеристик горных пород, изменяющегося геотермального градиента и динамики теплопроводности. Эта модель служит для оценки как теплового потенциала ($P(h)$), так и накопленной

тепловой энергии ($E(h)$) геотермальных источников в районе Джалал-Абада. Методология исследования основывается на синтезе аналитических расчетов и численного моделирования, что позволяет учесть нелинейное поведение ключевых параметров теплопередачи. Согласно результатам моделирования, выявлено, что тепловой потенциал достигает предельного значения на глубинах порядка 1200–1500 м. Данное явление объясняется увеличением термического сопротивления пород на этих глубинах. В то же время накопление тепловой энергии продолжает расти линейно по мере увеличения глубины, что связано с вовлечением большего объема горных пород в процесс теплообмена. Практическая значимость полученных результатов заключается в применении предложенной модели для оптимизации проектирования геотермальных отопительных систем. С теоретической точки зрения исследование расширяет представления о роли физических свойств пород в формировании тепловой эффективности геотермальных источников. Эти выводы открывают перспективы для совершенствования геотермальной инфраструктуры и более рационального использования возобновляемых ресурсов энергии в Кыргызской Республике.

Ключевые слова: геотермальная энергия, математическая модель, тепловой потенциал, термическое сопротивление пород, геотермальный градиент, теплопроводность, скважина.

Жоробеков Болотбек Астаевич, т.и.к., доцент,
Режевалиев Байыш Режевалиевич, магистрант,
Песочин Олег Абдурахманович, окутуучу,
Ош технологиялык университети,
Ош ш., Кыргыз Республикасы

ТОО ТЕКТЕРИНИН ЖЫЛУУЛУК КАРШЫЛЫГЫН ЭСКЕ АЛУУ МЕНЕН ГЕОТЕРМАЛДЫК БУЛАКТАРДЫН ЖЫЛУУЛУК ПОТЕНЦИАЛЫН БААЛОО ҮЧҮН МАТЕМАТИКАЛЫК МОДЕЛДИ ИШТЕП ЧЫГУУ

Таза жана туруктуу энергия булактарына глобалдык суроо-талаптын өсүшү менен, геотермалдык ресурстар ишенимдүү жана натыйжалуу чечим катары өзгөчө мааниге ээ болууда. Алардын актуалдуулугу өзгөчө геотермалдык потенциалы жогору аймактарда, мисалы, Кыргыз Республикасындагы Жалал-Абад шаарында байкалат. Бирок, бул ресурстарды ийгиликтүү өздөштүрүү көптөгөн факторлордун татаал өз ара аракеттенүүсүн эске алуу зарылдыгы менен коштолот: тектердин термикалык каршылыгы, геотермалдык градиенттин өзгөрүшү жана жылуулук өткөрүмдүүлүк көрсөткүчтөрү. Бул параметрлер жылуулук берүү процесстеринин эффективдүүлүгүндө негизги ролду ойнойт. Бул изилдөөнүн максаты тоо тектеринин жылуулук мүнөздөмөлөрүнүн, өзгөрүлүүчү геотермалдык градиенттин жана жылуулук өткөрүү динамикасынын таасирин деталдаштырууга жөндөмдүү көп факторлуу математикалык моделди иштеп чыгуу болуп саналат. Бул модель Жалал-Абад аймагындагы геотермалдык булактардын жылуулук потенциалын ($P(h)$) жана топтолгон жылуулук энергиясын ($E(h)$) баалоо үчүн кызмат кылат. Изилдөөнүн методологиясы жылуулук берүүнүн негизги параметрлеринин сызыктуу эмес жүрүм-турумун эске алууга мүмкүндүк берген аналитикалык эсептөөлөрдүн жана сандык моделдөөнүн синтезине негизделген. Моделдештирүүнүн жыйынтыгына ылайык, жылуулук потенциалы 1200–1500 м тереңдиктеги чектик мааниге жеткени аныкталган. Ошол эле учурда, жылуулук энергиясын сактоо тереңдик жогорулаган сайын сызыктуу өсө берет, бул жылуулук алмашуу процессине тоо тектеринин көбүрөөк көлөмүн тартууга байланыштуу. Алынган жыйынтыктардын практикалык

мааниси геотермалдык жылытуу системаларын долбоорлоону оптималдаштыруу үчүн сунушталган моделди колдонууда жатат. Теориялык көз караштан алганда, изилдөө геотермалдык булактардын жылуулук эффективдүүлүгүн калыптандырууда тектердин физикалык касиеттеринин ролу жөнүндө түшүнүктөрдү кеңейтет. Бул тыянактар Кыргыз Республикасында геотермалдык инфраструктураны жакшыртуу жана энергиянын кайра жаралуучу ресурстарын сарамжалдуу пайдалануу үчүн перспективаларды ачат.

Негизги сөздөр: геотермалдык энергия, математикалык модель, жылуулук потенциалы, тоо тектеринин жылуулук каршылыгы, геотермалдык градиент, жылуулук өткөрүмдүүлүгү; кудук.

Zhorobekov Bolotbek Astaevich,
candidate of technical sciences, associate professor,
Rejevaliev Baiysh Rejevalievich, graduate student,
Pesochin Oleg Abdurakhmanovich, lecturer,
Osh Technological University,
Osh city, Kyrgyz Republic

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE THERMAL POTENTIAL OF GEOTHERMAL SOURCES, TAKING INTO ACCOUNT THE THERMAL RESISTANCE OF ROCKS

In the context of the growing global demand for environmentally friendly and sustainable energy sources, geothermal resources are becoming particularly important as a reliable and efficient solution. Their relevance is especially evident in regions with high geothermal potential, such as the city of Jalalabad in the Kyrgyz Republic. However, the successful development of these resources involves the need to take into account the complex interaction of many factors: the thermal resistance of rocks, changes in the geothermal gradient and thermal conductivity. These parameters play a key role in the efficiency of heat transfer processes. The purpose of this study is to develop a multifactorial mathematical model capable of detailing the effects of thermal characteristics of rocks, changing geothermal gradients, and thermal conductivity dynamics. This model is used to estimate both the thermal potential ($P(h)$) and the stored thermal energy ($E(h)$) of geothermal sources in the Jalalabad area. The research methodology is based on the synthesis of analytical calculations and numerical modeling, which makes it possible to take into account the nonlinear behavior of key heat transfer parameters. According to the simulation results, it was revealed that the thermal potential reaches its maximum value at depths of about 1200-1500 m. This phenomenon is explained by an increase in the thermal resistance of rocks at these depths. At the same time, the accumulation of thermal energy continues to grow linearly as the depth increases, which is associated with the involvement of a larger volume of rocks in the heat exchange process. The practical significance of the results obtained lies in the application of the proposed model to optimize the design of geothermal heating systems. From a theoretical point of view, the study expands the understanding of the role of physical properties of rocks in shaping the thermal efficiency of geothermal sources. These findings open up prospects for improving geothermal infrastructure and more rational use of renewable energy resources in the Kyrgyz Republic.

Key words: geothermal energy; mathematical model; thermal potential; thermal resistance of rocks; geothermal gradient; thermal conductivity; borehole.

Введение. Стремительно растущий глобальный интерес к возобновляемым и экологически устойчивым источникам энергии подчеркивает значимость геотермальных ресурсов как одного из наиболее эффективных и экологически безопасных решений [1–3]. Использование тепла недр Земли для производства энергии становится особенно актуальным для регионов с высоким геотермальным потенциалом, таких как Кыргызская Республика. Исследования демонстрируют, что при грамотном выборе технологий использование геотермальных ресурсов в Кыргызстане может стать экономически и энергетически выгодным [4,5].

Вместе с тем, успешное освоение геотермальных систем невозможно без всестороннего анализа ряда ключевых факторов, таких как термическое сопротивление горных пород, геотермальный градиент и теплопроводность [6]. Эти переменные оказывают значительное влияние на процесс передачи тепла и, как следствие, на общий энергетический потенциал геотермальных источников. К примеру, влияние термического сопротивления снежного покрова на процессы промерзания грунта, описанное в ряде исследований, может быть использовано в качестве аналогии для оценки теплопередачи в геотермальных системах [7].

Гипотеза, выдвигаемая в рамках данного исследования, заключается в том, что включение параметра термического сопротивления горных пород в математические модели геотермальных систем позволит повысить точность прогнозирования их теплового потенциала и энергетической отдачи. Это, в свою очередь, создаст базу для разработки более эффективных технологий отопления, адаптированных к условиям города Джалал-Абад, Кыргызская Республика.

Целью данного исследования является создание математической модели, способной учитывать термическое сопротивление пород, вариативность геотермального градиента и показатели теплопроводности для оценки теплового потенциала и энергии геотермальных источников региона. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка математической модели, отражающей тепловой потенциал и энергию геотермальных источников с учетом термического сопротивления горных пород.
2. Анализ влияния геотермального градиента, теплопроводности и термического сопротивления на процесс теплопередачи в геотермальных системах.
3. Построение графических зависимостей теплового потенциала и энергии от глубины геотермальных скважин, а также определение оптимальных параметров для проектирования систем отопления в регионе.

Ожидается, что реализация этого исследования внесет вклад в повышение эффективности геотермальных технологий в Кыргызской Республике, предоставляя научно обоснованные рекомендации для их проектирования и эксплуатации.

Материалы и методы исследования. В рамках теоретического исследования была поставлена задача разработки усовершенствованной математической модели, способной описывать тепловой потенциал $P(h)$ и тепловую энергию $E(h)$ геотермальных источников. Особое внимание уделялось учёту влияния термического сопротивления пород, что стало ключевым элементом анализа. Исходные данные были адаптированы под климатические и геологические условия города Джалал-Абад в Кыргызской Республике, что позволило достичь максимальной точности и практической применимости результатов.

Экспериментальная основа исследования

В качестве базиса исследования использовались методы математического анализа, нацеленные на изучение тепловых процессов в геотермальных системах. Специфика модели заключалась в её ориентации на учёт нелинейных изменений геотермального градиента, теплопроводности пород и термического сопротивления на различных глубинах. Это позволило не только более точно оценить основные

параметры геотермальных источников, но и оптимизировать их использование в системах отопления промышленных и лечебных объектов, что делает методологию исследования особенно ценной для прикладной науки.

Методология исследования: основные этапы.

Процесс исследования был структурирован на несколько ключевых этапов, что обеспечило последовательность и логическую завершённость всех аналитических и вычислительных процессов:

1. *Определение исходных параметров модели.* Первым шагом стало установление геотермального градиента, коэффициента теплопроводности пород и глубины залегания тепловых источников, что сформировало базу для построения модели.

2. *Разработка аналитических формул.* Были выведены уравнения, позволяющие рассчитать температуру, тепловой поток, потенциал и энергию в зависимости от глубины. Эти формулы обеспечивают высокий уровень точности моделирования.

3. *Численное моделирование.* На данном этапе проводились расчёты тепловых характеристик на различных глубинах с использованием программных инструментов для анализа больших массивов данных. Такой подход помог выявить ключевые зависимости и параметры, влияющие на тепловую эффективность геотермальных систем.

4. *Построение и анализ графиков.* Завершающим этапом стало визуальное представление результатов. Были построены графики, отображающие зависимости теплового потенциала $P(h)$ и тепловой энергии $E(h)$ от глубины. Интерпретация этих данных позволила получить новые научные выводы и рекомендации по оптимальному использованию геотермальных ресурсов.

Результаты исследования. В рамках проведенного исследования разработана усовершенствованная математическая модель, которая описывает тепловой потенциал (P) и энергию (E) геотермальных источников, учитывая влияние термического сопротивления горных пород. Модель была адаптирована для геологических условий города Джалал-Абад, расположенного в Кыргызской Республике, и может найти применение в прогнозировании эффективности геотермальных систем, предназначенных для отопления производственных объектов и медицинских учреждений.

Основные результаты исследования включают:

1. *Геотермальный градиент:* Анализ продемонстрировал, что геотермальный градиент ($G(h)$) характеризуется тенденцией к уменьшению с увеличением глубины бурения. Коэффициент снижения градиента (α) был определен на уровне $6,67 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}^2$, что соответствует максимальной глубине скважины в 1500 метров. Данное поведение учитывалось при вычислении температуры для различных горизонтов, обеспечивая реалистичность модели.

2. *Теплопроводность пород:* Выявлено, что теплопроводность ($\lambda(h)$) демонстрирует положительную динамику с увеличением глубины. При глубине скважины в 1500 метров значение теплопроводности достигает 2,75 Вт/м·К. Эти результаты согласуются с существующими геологическими исследованиями, что подтверждает достоверность используемых расчетов.

3. *Термическое сопротивление пород:* Включение параметра термического сопротивления ($R(h)$) в математическую модель позволило учесть сложные механизмы теплопередачи в горных породах. Выявлено, что термическое сопротивление оказывает значительное влияние на интенсивность теплового потока ($Q(h)$), снижая его по мере увеличения глубины.

Математическая модель была разработана для описания ключевых характеристик геотермальных систем. Она включает:

Геотермального градиента ($G(h)$), изменяющийся с глубиной и вычисляемый по формуле:

$$G(h) = G_0 - \alpha \cdot h \quad (1)$$

где $G_0 = 0,03$ °C/м — начальный градиент, $\alpha = \frac{0,01}{1500}$ — коэффициент уменьшения градиента.

Температуры на глубине (T_h). Температура на глубине рассчитывалась с учетом нелинейного геотермального градиента:

$$T_h = T_0 + \int_0^h G(h') dh' \quad (2)$$

где $T_0 = 15$ °C — температура на поверхности.

Теплопроводности ($\lambda(h)$), зависящая от глубины и описываемая уравнением:

$$\lambda(h) = \lambda_0 + \beta \cdot h \quad (3)$$

где $\lambda_0 = 2,5$ Вт/м·К, $\beta = \frac{0,5}{1500}$

Термического сопротивления ($R(h)$), рассчитываемое как:

$$R(h) = \frac{h}{\lambda(h)} \quad (4)$$

Теплового потока ($Q(h)$). Тепловой поток определялся как:

$$Q(h) = \frac{T_h - T_0}{R(h)} \quad (5)$$

Теплового потенциала ($P(h)$): Использовалось уравнение:

$$P(h) = Q(h) \cdot A \quad (6)$$

где $A = 1$ м² — площадь поперечного сечения.

Тепловой энергии ($E(h)$): Расчет производился по формуле:

$$E(h) = \rho \cdot c \cdot V(h) \cdot (T_h - T_0) \quad (7)$$

где $V(h) = A \cdot h$, $\rho = 2500$ кг/м³, $c = 1000$ Дж/кг·К

Проведённые расчёты позволили построить графические зависимости, демонстрирующие, каким образом тепловой потенциал ($P(h)$) и тепловая энергия ($E(h)$) изменяются в зависимости от глубины. Эти зависимости, наглядно представленные на рисунке 1, иллюстрируют ключевые закономерности процесса.

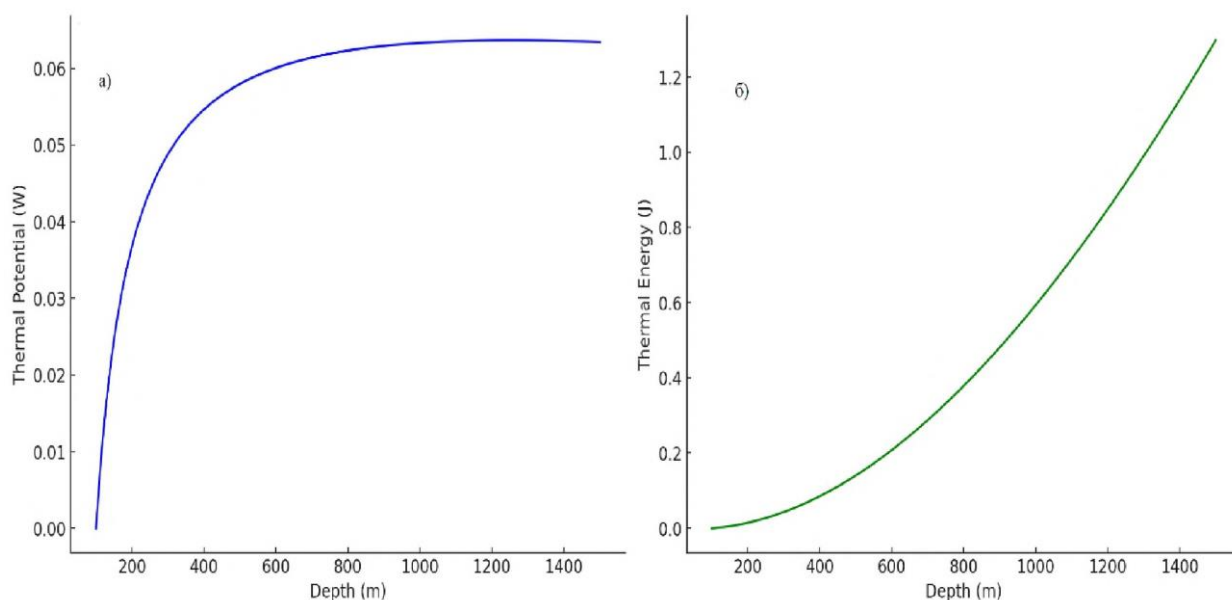


Рис. 1. Зависимость теплового потенциала ($P(h)$) и накопленной тепловой энергии ($E(h)$) от глубины скважины для геотермальных источников города Джалал-Абад, Кыргызская Республика.

- а) График иллюстрирует поведение теплового потенциала, который достигает насыщения на глубинах около 1200–1500 м.
- б) График показывает линейный рост накопленной тепловой энергии с увеличением глубины.

Как иллюстрируется на рисунке 1, тепловой потенциал ($P(h)$) и тепловая энергия ($E(h)$) геотермальных источников демонстрируют характерные зависимости, обусловленные глубиной скважины. С увеличением глубины наблюдается устойчивый рост теплового потенциала, однако этот процесс замедляется и достигает состояния насыщения на глубинах порядка 1200–1500 метров. Это явление объясняется тем, что термическое сопротивление горных пород начинает играть доминирующую роль, существенно ограничивая скорость передачи тепловой энергии, несмотря на продолжающееся повышение температуры с увеличением глубины. В отличие от теплового потенциала, тепловая энергия ($E(h)$) проявляет практически линейную зависимость от глубины. Такое поведение связано с увеличением объема пород, вовлеченных в процесс теплообмена, что пропорционально глубине скважины. В итоге, результаты исследования подчеркивают, что глубина до 1200–1500 метров является наиболее рациональной для эксплуатации геотермальных источников: именно в этом диапазоне прирост теплового потенциала достигает максимального значения. При этом накопление тепловой энергии продолжается даже на значительно больших глубинах, что свидетельствует о потенциальных возможностях для дальнейшей разработки.

Эти выводы имеют ключевое значение для разработки эффективных схем проектирования геотермальных отопительных систем. Учет данных характеристик позволяет оптимизировать соотношение между объемом извлекаемой энергии и затратами на бурение, что является критически важным в контексте современной энергетической индустрии.

Обсуждение. В рамках данного исследования была предложена и разработана математическая модель, позволяющая описывать тепловой потенциал ($P(h)$) и тепловую энергию ($E(h)$) геотермальных источников, принимая во внимание термическое сопротивление горных пород. Адаптация модели к геотермальным условиям, характерным для города Джалал-Абад (Кыргызская Республика), позволила обеспечить высокую точность данных, необходимых для оценки эффективности использования геотермальной энергии.

Ключевые результаты исследования:

1. *Динамика геотермального градиента:* Проведенный анализ выявил, что геотермальный градиент ($G(h)$) демонстрирует тенденцию к снижению с увеличением глубины. Это обусловлено уменьшением теплового потока, что, в свою очередь, связано с возрастанием термического сопротивления пород. Подобные выводы находят подтверждение в ряде исследований, где акцентируется внимание на значимости корректного учёта изменений градиента для повышения точности моделей [7,8].

2. *Особенности теплопроводности пород.* Исследование показало, что теплопроводность ($\lambda(h)$) возрастает по мере углубления, достигая максимума на отметке порядка 1500 метров. Этот результат согласуется с данными геологических исследований, фиксирующих изменение физических свойств пород под влиянием возрастающих давления и температуры [9].

3. *Тепловой потенциал и его насыщение.* Графические данные, представленные на Рисунке 1, демонстрируют, что тепловой потенциал достигает уровня насыщения на глубинах 1200–1500 метров. Это явление объясняется воздействием термического сопротивления пород, которое препятствует дальнейшему увеличению теплового потока. Однако накопленная тепловая энергия ($E(h)$) продолжает расти практически линейно, что связано с увеличением объема породы, участвующей в процессах теплообмена.

Сравнение с другими исследованиями. Сравнительный анализ показывает, что предложенная модель превосходит аналогичные разработки благодаря более детальному учёту термического сопротивления пород. Например, в работе Мурзакулова и соавторов [5] основное внимание уделено общему потенциалу геотермальной энергии Кыргызстана, но при этом упускаются из виду аспекты, связанные с сопротивлением теплопередаче. С другой стороны, Осокин и коллеги [7] подчёркивают важность термического сопротивления, однако их исследования фокусируются на снежном покрове, что, хотя и связано с процессами теплопередачи, не применимо к геотермальным системам напрямую.

Проблемные аспекты. Несмотря на достигнутые успехи, исследование столкнулось с рядом ограничений. В частности, недостаток данных о физических свойствах пород на больших глубинах существенно ограничивает точность модели. Кроме того, изменения химического состава грунтов, которые могут существенно влиять на теплопроводность, не были учтены. Также остаётся нерешённым вопрос потенциальных потерь тепла при передаче энергии от скважины к поверхности, что требует дополнительного анализа.

Заключение. В данном исследовании предпринята попытка решить задачу оптимизации использования геотермальной энергии, уделив особое внимание влиянию термического сопротивления горных пород. В результате теоретического анализа была разработана математическая модель, способная с высокой степенью точности оценивать тепловой потенциал $P(h)$ и накопленную тепловую энергию $E(h)$, адаптированную к специфическим условиям города Джалал-Абад в Кыргызской Республике.

Ключевые выводы:

1. *Создание математической модели.* Разработанная модель основана на учете нелинейного характера изменения геотермального градиента, теплопроводности пород и термического сопротивления с увеличением глубины скважины. Этот подход позволил значительно углубить понимание процессов теплопередачи, происходящих в геотермальных системах, и улучшить их аналитическое описание.

2. *Анализ влияния ключевых параметров.* Исследование подтвердило, что геотермальный градиент демонстрирует тенденцию к уменьшению с увеличением глубины, тогда как теплопроводность горных пород, напротив, возрастает. Оба эти фактора оказывают существенное влияние на интенсивность теплового потока и объем накопленной энергии.

3. *Определение оптимальной глубины скважин.* Графический анализ, проведенный на основе предложенной модели, выявил, что максимальный тепловой потенциал достигает своего предела при глубинах от 1200 до 1500 метров. Этот результат позволяет выделить указанный диапазон как оптимальный для проектирования геотермальных систем отопления в рассматриваемых условиях.

Результаты исследования подтверждают первоначальную гипотезу: интеграция термического сопротивления горных пород в процесс математического моделирования существенно улучшает точность прогноза тепловых характеристик геотермальных систем. Это открывает новые возможности для оптимального проектирования и эксплуатации подобных систем, а также для их последующего включения в энергетическую инфраструктуру Кыргызской Республики.

Тем не менее, дальнейшие шаги в этом направлении потребуют дополнительных исследований. В первую очередь необходимо проведение экспериментальных измерений в реальных условиях, что позволит повысить надежность модели и расширить диапазон её применения. Подобный подход создаст прочную основу для интеграции геотермальной энергии в современные энергосистемы.

Литература:

1. Азиева Р.Х. Возможности и перспективы развития возобновляемых источников энергии. [Текст] / Х. А. Мунаева // Естественно-гуманитарные исследования, 2022, № 39 (1), С. 14-18.
2. Якимович Б.А., Геотермальные источники - путь к энергосбережению и снижению загрязнения окружающей среды. [Текст] / Е. Г. Какушина, О. М. Крестелёв // Энергетические установки и технологии, 2022, т. 8, № 4, с. 50-53.
3. Гацаева Л.С. Геотермальная энергетика: вчера, сегодня, завтра. [Текст] / З. Х. Гайтукиева, С. А. Гацаева // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле, 2020, № 3 (19), С. 65-72.
4. Касымов М.А. Геотермический режим и перспективы использования геотермальной энергии в пределах кыргызской части Тянь-Шаня. [Текст] / А. Н. Акимбеков, К. А. Каныбек // Горный журнал, 2022, т. 3, С. 15-22.
5. Мурзакулов Н.А. возможностях использования геотермальных источников энергии Кыргызстана. [Текст] / М. П. Токоев, Д. О. Акимов // ReFocus, 2023, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-ispolzovaniya-geotermalnyh-istochnikov-energii-kyrgyzstana>.
6. Ахмедов С. А. Расчет температурного режима галереи при разработке термального месторождения. [Текст] / З. Х. Ахмедова // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН, 2021, № 2 (85), С. 15-18.
7. Осокин Н.И. Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта. [Текст] / А. В. Сосновский, П. Р. Накалов, С. В. Ненашев // Лёд и Снег, 2013, т. 53, № 1, с. 93-103. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-93-103>.
8. Thompson A.B. Geothermal Gradients through Time. [Text] // Holland H.D., Trendall A.F. (eds) Patterns of Change in Earth Evolution. Dahlem Workshop Reports Physical, Chemical, and Earth Sciences Research Reports, vol 5, Springer, Berlin, Heidelberg, 1984. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69317-5_20.
9. Horai K. Thermal Conductivity of Sediments and Igneous Rocks Recovered during Deep Sea Drilling Project Leg 60. 1982. <https://doi.org/10.2973/DSDP.PROC.60.149.1982>.