



МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД КАК НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

В.Р. ВОЛОШИН*, К.В. БЕЛОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с развитием новых энергосберегающих технологий происходит внедрение альтернативных источников теплоснабжения, одним из которых являются теплонасосные установки. Одна из схем эксплуатации — использование низкопотенциального тепла грунтового водоносного горизонта. В статье на основе модельных расчетов обосновывается выбор наиболее оптимальной схемы работы.

Цель. Модельные расчеты с целью количественной оценки возможности использования грунтового водоносного горизонта в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии.

Материалы и методы. Для изучения гидродинамических процессов и процесса теплопереноса в водоносном горизонте использовался расчетный код GERA/E1.0, предназначенный для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования.

Результаты. Разработано несколько численных моделей для различных схем эксплуатации грунтового водоносного горизонта. На основании расчета выбрана наиболее перспективная схема эксплуатации.

Заключение. Количественно оценена возможность эксплуатации водоносного горизонта в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии. Выбрана наиболее перспективная схема эксплуатации подземных вод.

Ключевые слова: гидрогеология, альтернативные источники, тепловой насос, моделирование, грунтовый водоносный горизонт

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы благодарят сотрудников лаборатории №12 геомиграционного моделирования ИБРАЭ РАН и лично кандидата физико-математических наук Капырина И.В.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Волошин В.Р., Белов К.В. Модельные исследования эффективности использования грунтовых вод как низкопотенциальных источников энергии. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(3):88—99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>

Статья поступила в редакцию 15.08.2024

Принята к публикации 16.09.2024

Опубликована 30.09.2024

* Автор, ответственный за переписку

MODEL STUDIES ON GROUNDWATER EFFICIENCY AS A LOW-GRADE ENERGY SOURCE

VALERY R. VOLOSHIN*, KONSTANTIN V. BELOV

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. New energy-saving technologies induce the implementation of alternative heat supply sources, including heat pump systems. One of their operational schemes utilizes low-grade heat from groundwater aquifers. The paper substantiates the selection of the most optimal operational scheme based on model calculations.

Aim. To conduct model calculations aimed at computing the feasibility of using groundwater aquifers as a low-grade heat energy source.

Materials and methods. The hydrodynamic processes and heat transfer within the aquifer were studied using the GERA/E1.0 computational code, designed for three-dimensional geofiltration and geomigration modeling.

Results. Several numerical models are developed for various operational schemes of groundwater aquifers. The most promising operational scheme was selected based on the calculations.

Conclusion. The feasibility of using groundwater aquifers as a low-grade heat energy source has been quantitatively assessed. The most optimal operational scheme has been selected.

Keywords: hydrogeology, alternative sources, heat pump, modeling, groundwater aquifer

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgments: the authors thank the staff of Laboratory No. 12 of Geomigration Modeling IBRAE RAN, and personally the candidate of physical and mathematical sciences Kapyrin I.V.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Voloshin V.R., Belov K.V., Akatiev I.D. Model studies on groundwater efficiency as a low-grade energy source. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(3):88—99. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-3-88-99>

Manuscript received 15 August 2024

Accepted 16 September 2024

Published 30 September 2024

* Corresponding author

В настоящее время одной из мировых проблем является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Истощение традиционных видов топлива, экологические проблемы, возникающие вследствие их сжигания, повлекли за собой интерес к переходу на альтернативные виды получения энергии.

Преимущества использования технологий, основанных на альтернативных источниках тепловой энергии, заключаются не только в значительном снижении энергетических затрат, но также в их экологической устойчивости и возникновении новых возможностей для увеличения автономности систем отопления. Одним из ключевых направлений является внедрение новейших

нетрадиционных источников тепловой энергии, таких как геотермальная энергия.

Геотермальные системы в зависимости температуры извлекаемой воды можно разделить на два вида: высокопотенциальные (с температурой более 30 °С) и низкопотенциальные (с температурой менее 30 °С).

К высокопотенциальным источникам относятся петротермальные и гидротермальные ресурсы — горные породы и подземные воды, которые были нагреты до высоких температур вследствие получения большого количества тепла от земных недр, а также энергии, выделяемой вследствие протекания геологических процессов. Несмотря на высокий потенциал данного вида энергии,

он имеет ряд недостатков, главным из которых является локальное распространение на Земле, этот вид ресурсов существует при определенных геологических условиях, как правило, в зонах активного вулканизма, сейсмоактивных районах или в зонах конвективной циркуляции подземных вод в областях высоких температур. В Российской Федерации областями распространения гидротермальных ресурсов являются Курильские острова, Камчатка, Краснодарский и Ставропольский края, республики Дагестан, Ингушетия и т. д. В Европе источниками высокопотенциальной гидрогеотермальной энергии активно пользуются Исландия, Венгрия, Франция, Германия [2, 5—7, 8, 10—12].

К низкопотенциальным источникам тепловой энергии относятся источники тепловой энергии с относительно низкими температурами, порядка 7—10 °С. Такими источниками могут являться как естественные, так и искусственно созданные. К естественным относятся тепловая энергия подземных вод, грунтов, а также тепло наружного воздуха. Искусственными источниками могут являться удаляемый вентиляционный воздух, канализационные стоки, промышленные сбросы тепла, тепло, выделяемое при проведении технологических процессов [2—12].

В отличие от прямого использования высокопотенциальных источников тепловой энергии, эксплуатация низкопотенциального тепла возможна при помощи геотермальных тепловых насосов.

Геотермальные тепловые насосы широко используются в жилых домах, коммерческих зданиях и промышленных объектах. Они могут обеспечивать отопление зимой и охлаждение летом, что делает их универсальным решением для любых климатических условий. Система состоит из компрессора, испарителя, конденсатора и теплообменника. При нагнетании газообразного фреона компрессором происходит его сжатие до жидкости в конденсаторе, сопровождающееся сильным нагревом, далее при дросселировании фреон переходит из сжиженного состояния в газообразное (в испарителе) с сильным охлаждением.

Таким образом, подбирая степень сжатия фреона и его марку, электрическую мощность компрессора, площадь конденсатора и испарителя (или длину трубопровода, по которой циркулирует фреон), возможно создать установку, которая, используя подземные или поверхностные воды, воздух, влажный грунт в качестве источника тепла с температурой около 5—10 °С, позволяет получить температуру теплоносителя до 70 °С [3].

Существует множество конструктивно различающихся вариантов сбора низкопотенциального тепла недр:

1) при достаточной площади земельного участка путем закапывания в грунт замкнутой трассы из полиэтиленовой трубы (горизонтальный геотермальный контур);

2) более компактный метод устройства геотермального контура — вертикальный геотермальный контур, что позволяет разместиться на небольшой территории. Для этого производится бурение вертикальных скважин и монтаж в них геотермальных зондов. В случае наличия водоносного горизонта с высокими фильтрационными свойствами возможно создание схемы, при которой из одной скважины производится откачка воды, а в другую, после «съема» тепла в тепловом насосе, закачка обратно в водоносный горизонт;

3) наклонно-кластерный геотермальный контур. Производится проходка наклонных скважин (например, под углом 45° к горизонту). Для выполнения работ по такой технологии в грунт закапывают бетонное кольцо диаметром 1,5 м и на нем монтируют компактную буровую установку. Далее внутри бетонного кольца бурят наклонную скважину и опускают в нее геотермальный зонд. После окончания бурения первой скважины буровую установку поворачивают вокруг вертикальной оси на кольцо и бурят следующую скважину, и так далее, до достижения необходимого общего метража зондов [1—3, 12, 13].

Материалы и методы

Подземные воды могут быть использованы в качестве источника низкопотенциального тепла. Температура подземных вод в зоне постоянных годовых температур (глубина залегания около от 10,0 до 20,0 м в зависимости от климата, геологического строения, гидрогеологических условий) является постоянной и составляет от 7 до 10 °С. Наличие уклона потока подземных вод и, как следствие, постоянная циркуляция (по этой причине использование подземных вод в качестве теплоаккумулятора является невозможным), высокая величина теплопроводности грунта, высокая величина теплоемкости воды говорят о перспективе использования водоносных горизонтов в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии.

В ходе эксплуатации системы из водозаборных и нагнетательных скважин для отбора из них тепловой энергии изменяется структура потока подземных вод и нарушается тепловой режим грунтов. Это приводит, с одной стороны, к изменению

уровня подземных вод, с другой — к выхолаживанию массива.

Постановка задачи

Для расчета предполагается обеспечить тепловой энергией дом общей площадью 120 м². Согласно СП 60.13330.2020 «Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003» для такой площади необходимо обеспечить источник тепла мощностью не менее 18,0 кВт. Основной характеристикой теплового насоса является коэффициент преобразования, или COP — от английского «Coefficient of Performance» — отношение теплопроизводительности к полезной потребляемой электрической мощности устройства при любых установленных номинальных условиях (показывает количество переданной тепловой энергии при затратах 1,0 кВт электрической). Этот коэффициент будет зависеть от нескольких параметров, но среднее его значение составляет порядка 4. Тепловой насос, работающий по схемам «вода-вода» и «рассол-вода», использующий земные воды (ground-water heat pump application), применяет воду, забираемую из скважины или водоема для эксплуатации в качестве источника тепла. При этом температура отбираемой воды изменяется, связана с климатическими условиями и может варьироваться в пределах от 5 до 25 °С для глубоких скважин [5].

В толще грунтового массива выделяются слои суточных, сезонных и годовых температур. Пояс постоянных годовых температур — глубина, на которой амплитуда годовых колебаний температуры равна 0 °С. Суточные температуры проникают на глубину не более 2,0 м. Сезонные температурные изменения связаны с сезонами года и развиты на глубину до 10,0 м, годовые — до 30,0 м. Глубина этого пояса изменяется в значительных пределах, а сама температура может колебаться от -13 до +20 °С. Обычно эта температура близка к среднегодовой температуре воздуха на поверхности земли.

Отопление и горячее водоснабжение предполагаются при помощи теплонасосной установки с коэффициентом преобразования (COP) равным 4. Исходя из этого требуется отбор 4,5 кВт тепловой энергии из низкопотенциального источника (грунтового водоносного горизонта). Эксплуатация предполагается открытым типом (посредством водозаборных и нагнетательных скважин) [4, 7, 10, 12].

Для количественной оценки возможности использования грунтового водоносного горизонта

в качестве источника низкопотенциального тепла при помощи расчетного кода GERA/E1.0 разработана численная модель области фильтрации и проведено моделирование процесса теплопереноса.

При численном моделировании решались следующие задачи:

- оценка размеров области взаимовлияния скважин (гидродинамической и тепловой) в зависимости от дебита скважин,
- оценка длительности процесса выхолаживания массива и «выход» это процесса на стационарный режим,
- подбор оптимальной схемы расположения скважин для отбора и закачки воды с целью минимизации выхолаживания массива и попадания фронта холодной воды в водозаборную скважину.

Для решения поставленных задач создана трехмерная модель размером в плане 1000×1000 м (большие размеры области моделирования взяты для минимизации влияния граничных условий). На левой и правой границах модели задавались напоры величиной 6,0 и 7,0 м (гидравлический уклон потока 0,001). Начальные уровни воды в скважинах задавались в диапазоне от 6,45 до 6,55 м. Нижняя и верхняя поверхности на модели задавались как непроницаемая граница (при решении задачи теплопереноса тепловой поток через эти поверхности задавался равным нулю).

В центральной части модели размещались водозаборные и нагнетательные скважины. Дебиты скважин изменялись от 10,3 до 46,3 м³/сут. Фильтрационные параметры среды задавались изотропными, равными 1,0 м/сут ($K_x = K_y = K_z = 1,0$ м/сут). Активная пористость среды 0,1. Мощность водоносного горизонта на модели постоянна и составляет 10,0 м. Согласно справочнику гидрогеолога В.А. Максимова, значение коэффициента фильтрации величиной 1,0 м/сут отвечает мелко- и среднезернистым пескам. В генетическом отношении такими породами являются неглубоко залегающие аллювиальные и аллювиально-флювиогляциальные отложения, имеющие широкое распространение в Московской области.

При моделировании теплопереноса температура массива принималась равной 283 градуса Кельвина (10 °С). Плотность пород в области моделирования — 1,4 г/см³, удельная теплоемкость — 2900 Дж/(кг×К), теплопроводность — 1,91 Вт/(м×К) [1]. Отсутствие на верхней и нижней границах тепловых потоков, по нашему мнению, компенсируется наличием гидравлического уклона и, как следствием, поступлением подземных вод с постоянной температурой.

Таблица 1. Зависимость объемного расхода отбираемой воды теплонасосной установкой от разности температур при откачке и закачке

Table 1. Dependence of the volumetric flow rate of the extracted water by the heat pump installation on the temperature difference during pumping and injection

№ варианта	Расстояние между скважинами, м	Температура закачиваемой воды / разница температур при откачке и закачке, °С	Объемный расход воды, м ³ /сут
1	50,0	8,0/2,0	46,3
2		3,0/7,0	13,2
3		1,0/9,0	10,3

При решении гидродинамической задачи область моделирования задавалась гексаэдральной сеткой с размером на границах модели 10,0 м, в областях, примыкающих к скважинам, производилось сгущение сетки до 0,1 м (сами скважины). При решении задачи теплопереноса модельная сетка также разбивалась гексаэдральным генератором сеток с размерами 10,0 м на гранях и 1,0 м в области задания скважин.

Производительность скважин рассчитывалась исходя из необходимого перепада температур на входе и на выходе теплонасосной установки. Расчет осуществлялся по формуле:

$$P = C * Q_m * \Delta T,$$

где P — тепловая мощность 4500 Вт,
 C — удельная теплоемкость воды, 4200 Дж/(кг×К),
 Q_m — массовый расход теплоносителя (воды), кг/час,
 ΔT — разница температур, °С.

Исходя из этого для получения определенной температуры на выходе из теплового насоса рассчитаны значения расхода (табл. 1).

Анализируя данные в таблице 1, можно видеть, что расход отбираемой воды при одинаковой теплопроизводительности установки зависит от перепада температур на «входе» — водозаборной и на «выходе» — нагнетательной скважин. Чем больше перепад температур, тем ниже требуемый расход.

Для оценки размеров области взаимовлияния скважин (гидродинамической и тепловой) горные выработки задавались на расстоянии 50 м друг от друга (при дебите откачки и закачки 46,3 м³/сут). В результате решения задачи в нестационарной постановке получено распределение напоров в разрезе, показанное на рисунке 1, на различные моменты времени.

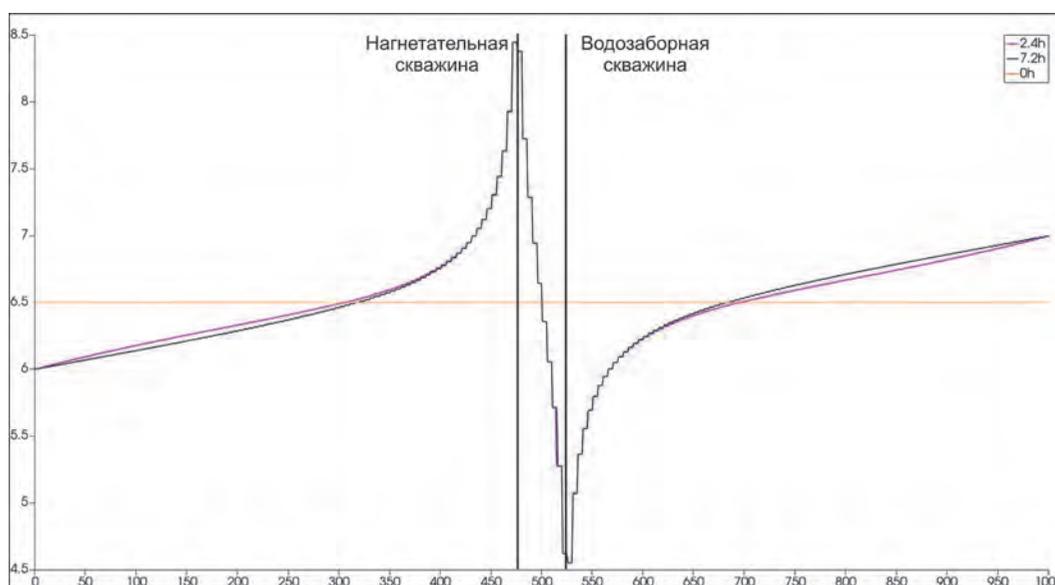


Рис. 1. Форма депрессионной кривой при моделировании отбора и закачки воды с расходом 46,3 м³/сут. Цветом показаны депрессионные кривые на различные моменты времени

Fig. 1. The shape of the depression curve in modeling the selection and injection of water with a flow rate of 46,3 m³/day. The color shows the depression curves at different points in time

Анализируя результаты гидродинамического моделирования, можно видеть, что за первые 7,2 часа происходит выход скважин на квазистационарный режим работы.

Расчет теплопереноса производился на период 5 лет при дебите скважины 46,3 м³/сут, температуры массива 10 °С и температуры закачиваемой воды 8 °С. Решение показывает, что привлечение холодной воды к водозаборной скважине произойдет на 300-й день после начала моделирования (рис. 2).

В результате решения задачи при задании расхода величиной 13,2 м³/сут наступление квазистационарного режима фильтрации происходит по истечении 14,4 часа (рис. 3).

Анализируя положение депрессионных кривых на различные моменты времени (рис. 2), можно видеть, что уровень в водозаборной скважине установился на отметке 5,95 м, осушение горизонта не произошло. При закачке воды произошел подъем уровня до отметки 7,05 м. При этом влияние скважин друг на друга сказалось практически сразу — спустя несколько часов (период моделирования составлял 10 суток).

После решения гидродинамической задачи производился расчет теплопереноса (период моделирования 5 лет). Водоотбор был задан в объеме 13,2 м³/сут, температура нагнетаемой воды 3 °С, температура массива 10 °С. Результаты расчета

показаны на рисунке 4. Полученные графики распределения температур в разрезе говорят о том, что на 600-е сутки произойдет привлечение фронта охлажденной воды в водозаборную скважину, что приведет к уменьшению эффективности работы теплонасосной установки.

Результаты моделирования отбора и закачки воды при расходе величиной 10,3 м³/сут свидетельствуют о том, что наступление квазистационарного режима фильтрации наступает по истечении 12 часов после начала расчета (рис. 5). По положению депрессионной кривой можно видеть, что уровень в водозаборной скважине установился на отметке 6,08 м, положение уровня в нагнетательной скважине составило 6,98 м.

Расчет теплопереноса производился при величине расхода 10,3 м³/сут при температуре закачиваемой воды 1 °С и температуре массива 10 °С. Результаты расчета приведены на рисунке 6. Проникновение фронта охлажденной воды в сферу влияния водозаборной скважины произойдет на 500-е сутки после начала расчета.

Расчеты указывают на то, что наиболее рациональной схемой использования грунтовых вод как источника низкопотенциального тепла является схема при отборе 13,2 м³/сут и температуре закачиваемой в водоносный пласт воды 3 °С, так как при этом водоотборе наблюдается максимальное время выхолаживания массива (600 суток).

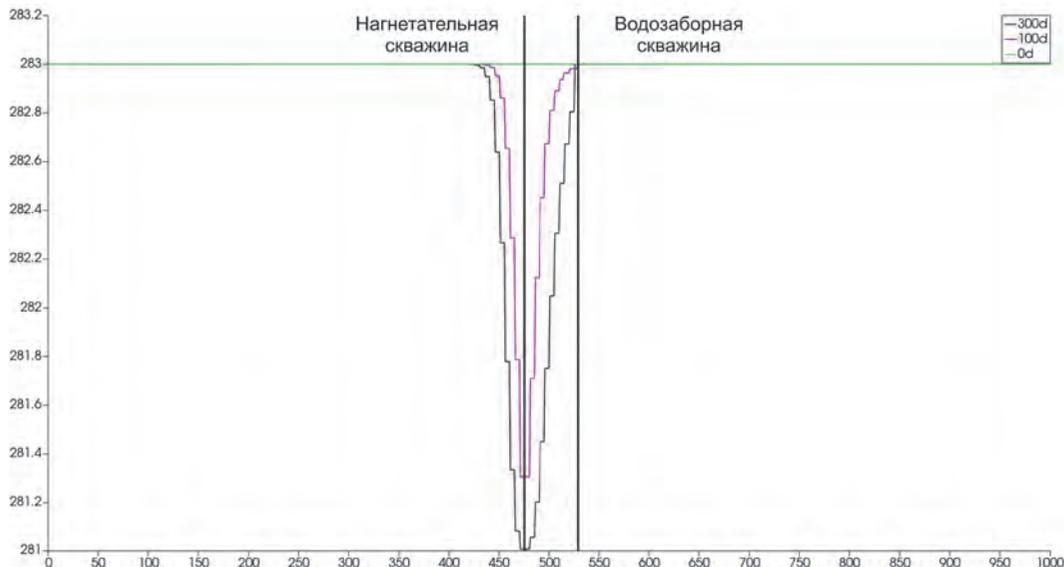


Рис. 2. Формы изотерм при моделировании отбора и закачки воды с расходом 46,3 м³/сут. Цветом показаны изотермы на различные моменты времени. Температура нагнетаемой воды 8 °С (281 К), температура массива 10 °С (283 К)

Fig. 2. Forms of isotherms in modeling the selection and injection of water with a flow rate of 46,3 m³/day. The color shows the isotherms at different points in time. The temperature of the injected water is 8 °С (276 K), the temperature of the array is 10 °С (283 K)

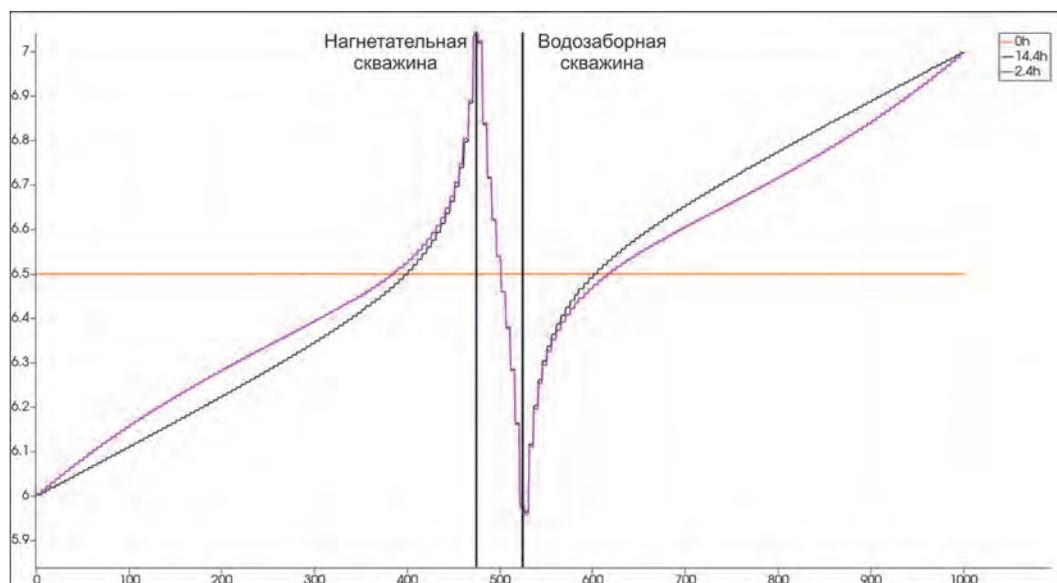


Рис. 3. Формы депрессионных кривых при моделировании отбора и закачки воды с расходом $13,2 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны депрессионные кривые на различные моменты времени

Fig. 3. The shapes of depression curves in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $13,2 \text{ м}^3/\text{day}$. The color shows the depression curves at different points in time

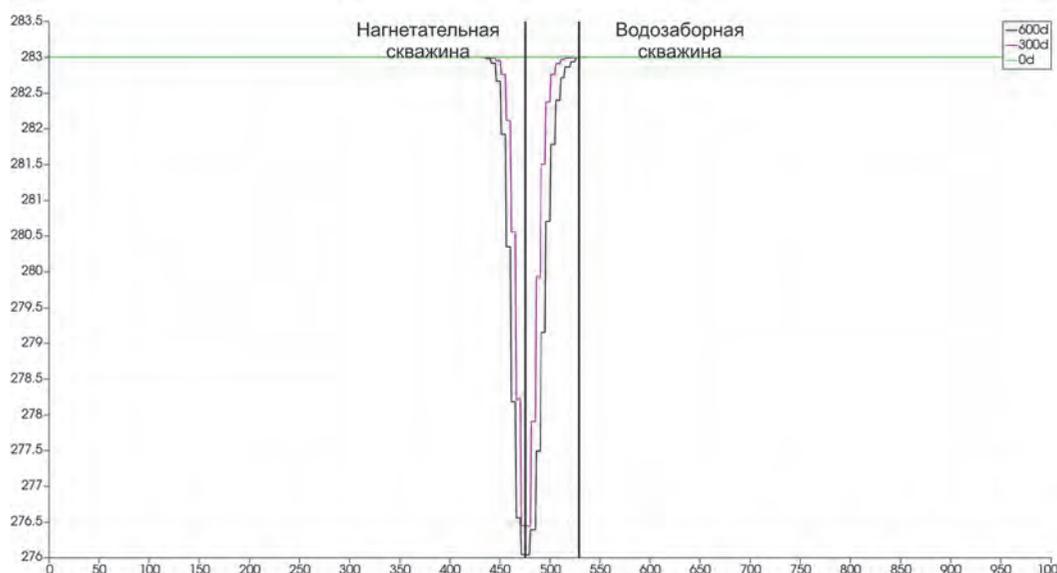


Рис. 4. Формы изотерм при моделировании отбора и закачки воды с расходом $13,2 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны изотермы на различные моменты времени. Температура нагнетаемой воды $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (276 K), температура массива $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

Fig. 4. Forms of isotherms in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $13,2 \text{ м}^3/\text{day}$. The color shows the isotherms at different points in time. The temperature of the injected water is $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (276 K), the temperature of the array is $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

Дальнейшее исследование направлено на возможность увеличения срока эффективной службы теплонасосной установки путем изменения схемы расположения и количества водозаборных и нагнетательных скважин.

В качестве начальных условий был взят наиболее перспективный результат исследования (расход $13,2 \text{ м}^3/\text{сут}$) при температуре нагнетаемой воды $3 \text{ }^\circ\text{C}$.

В дальнейших расчетах используются следующие варианты расположения скважин (табл. 3, рис. 7).

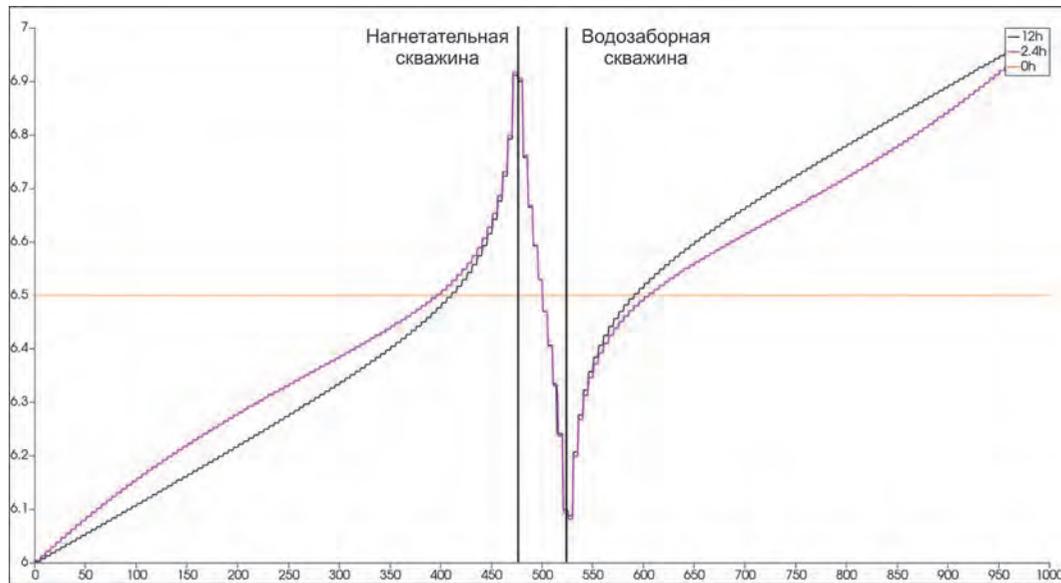


Рис. 5. Формы депрессионных кривых при моделировании отбора и закачки воды с расходом $10,3 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны депрессионные кривые на различные моменты времени

Fig. 5. The shapes of depression curves in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $10.3 \text{ m}^3/\text{day}$. The color shows the depression curves at different points in time

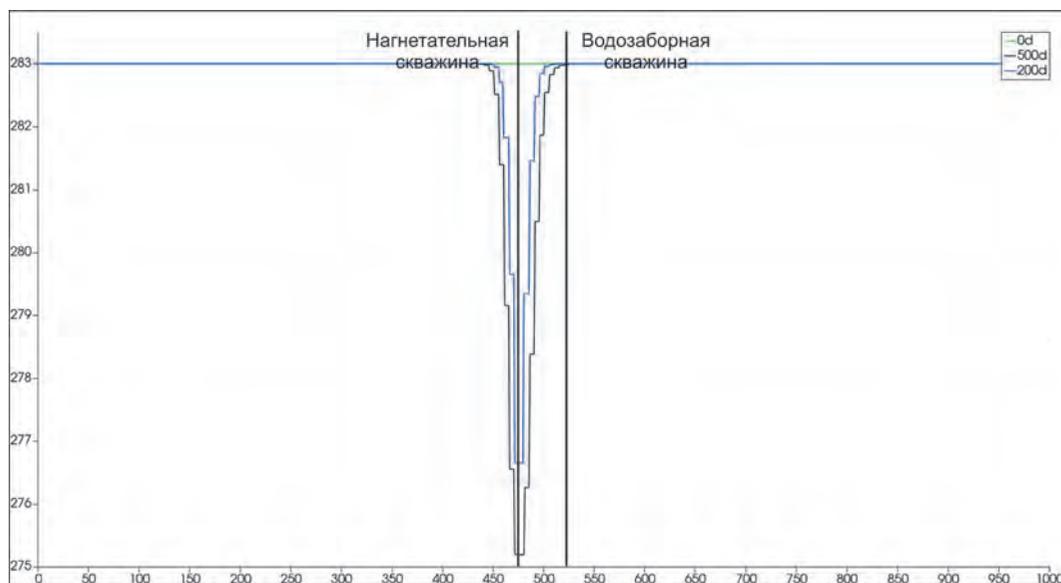


Рис. 6. Формы изотерм при моделировании отбора и закачки воды с расходом $10,3 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны изотермы на различные моменты времени. Температура нагнетаемой воды $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (274 K), температура массива $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

Fig. 6. Forms of isotherms in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $10.3 \text{ m}^3/\text{day}$. The color shows the isotherms at different points in time. The temperature of the injected water is $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (276 K), the temperature of the array is $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

В результате решения гидродинамической задачи и задачи теплопереноса получены следующие результаты (табл. 3).

Установление уровней при любой схеме расположения скважин происходит в течение 7,2 часа.

При решении задачи теплопереноса привлечение охлажденных вод к водозаборным скважинам произойдет значительно позже: максимальное время эксплуатации без подтягивания охлажденных вод составит 1000—1200 суток (табл. 3).

Таблица 2. Схемы расположения скважин
Table 2. Well layout diagrams

№ варианта	Количество и назначение скважин
Вариант 2.1	2 водозаборные (6,6 м ³ /сут); 1 нагнетательная (13,2 м ³ /сут)
Вариант 2.2	1 водозаборная (13,2 м ³ /сут); 2 нагнетательные (6,6 м ³ /сут)
Вариант 2.3	2 водозаборные (6,6 м ³ /сут); 2 нагнетательные (6,6 м ³ /сут)

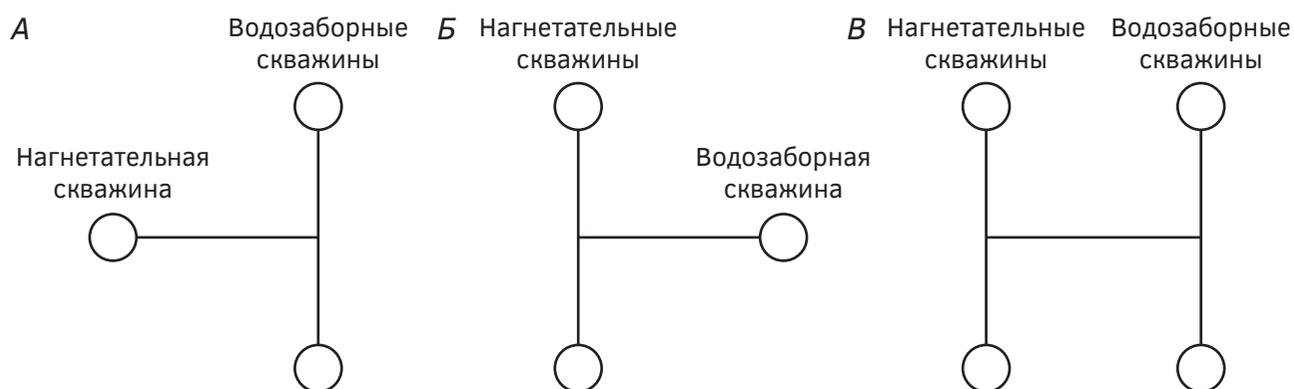


Рис. 7. Схемы расположения водозаборных и нагнетательных скважин
Fig. 7. Diagrams of the location of intake and injection wells

Таблица 3. Результаты решения гидродинамических задач и задач теплопереноса
Table 3. Hydrodynamic and heat transfer solutions

№ схемы	Максимальное понижение в водозаборной скважине, м	Максимальный напор в нагнетательной скважине, м	Период выхода на квазистационарный режим, ч	Продолжительность периода привлечения охлажденной воды, сут
А	6,4	7,1	7,2	1000
Б	5,69	6,38	7,2	1200
В	6,41	5,72	7,2	1000

Наиболее рациональной схемой расположения является схема Б, срок привлечения охлажденной воды к водозаборной скважине и, соответственно, максимальный срок эффективной эксплуатации теплонасосной установки составит 1200 суток (рис. 8, 9).

Результаты и обсуждения

Рассмотрены основные схемы использования грунтовых вод как низкопотенциальных источников тепла для отопления и горячего водоснабжения.

Проведены модельные расчеты в программном комплексе GeRa/E1.0. В результате решения гидродинамических и задач теплопереноса

установлено, что наиболее оптимальной схемой, в которой грунтовые воды являются низкопотенциальным источником тепла, является схема с одной водозаборной и двумя нагнетательными скважинами. При других вариантах расположения подтягивание охлажденных вод происходит еще раньше. Однако стоит учесть, что влияние от работы нагнетательных скважин будет заметно уже через 3,2 года после начала эксплуатации, в дальнейшем постепенно будет происходить снижение эффективности работы теплового насоса из-за выхолаживания массива.

При моделировании не учитывалось множество факторов, которые могут существенно исказить результаты моделирования. Структура

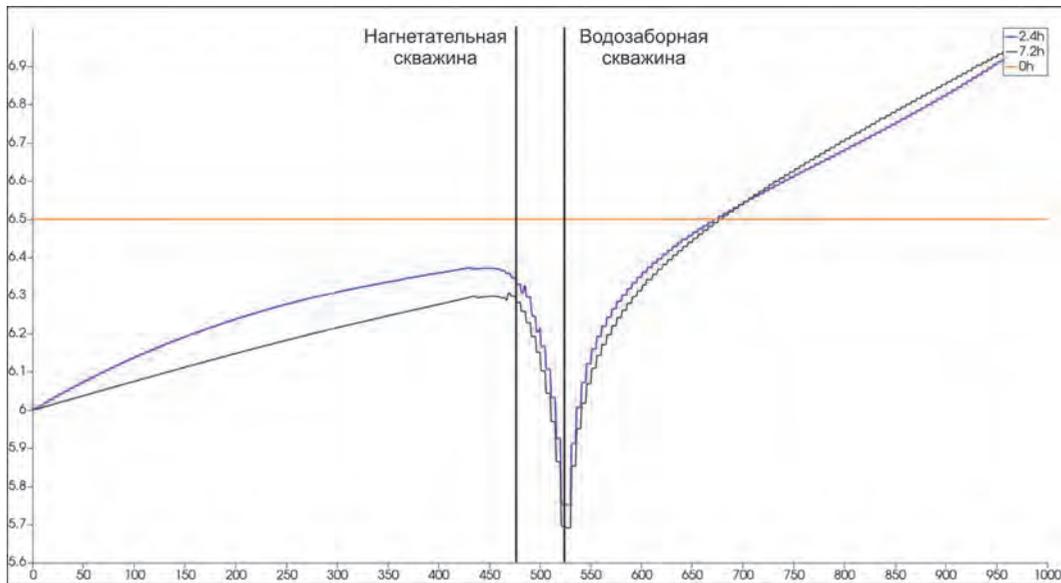


Рис. 8. Формы депрессионных кривых при моделировании отбора и закачки воды по схеме Б с расходом $13,2 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны депрессионные кривые на различные моменты времени
Fig. 8. The shapes of depression curves in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $13.2 \text{ m}^3/\text{day}$. The color shows the depression curves at different points in time

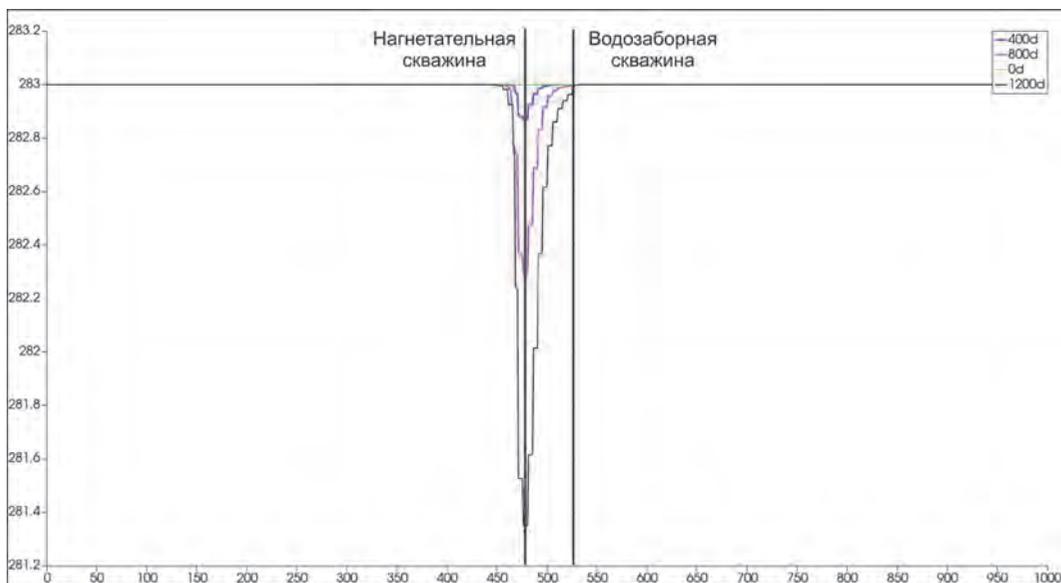


Рис. 9. Формы изотерм при моделировании отбора и закачки воды по схеме «Б» с расходом $13,2 \text{ м}^3/\text{сут}$. Цветом показаны изотермы на различные моменты времени. Температура нагнетаемой воды $3 \text{ }^\circ\text{C}$ (276 K), температура массива $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)
Fig. 9. Forms of isotherms in modeling the selection and injection of water with a flow rate of $13.2 \text{ m}^3/\text{day}$. The color shows the isotherms at different points in time. The temperature of the injected water is $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (276 K), the temperature of the array is $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (283 K)

потока подземных вод определяется граничными условиями, которые на модели заданы достаточно упрощенными. Фильтрационные параметры, мощности водоносного горизонта в природных условиях изменчивы даже

на небольшом расстоянии, а также оказывает влияние анизотропия фильтрационных параметров. Теплофизические свойства грунтов также имеют различия (пески разного минерального состава, глинистости).

Заключение

Дальнейшие исследования планируется развивать в двух направлениях: натурные полевые исследования на территории Учебно-научно-производственного полигона МГРИ для обеспечения теп-

ловой энергией лаборатории кафедры гидрогеологии им. В.М. Швеца и лабораторные исследования изменения величины теплопроводности грунтов в зависимости от их гранулометрического и минерального состава, степени водонасыщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бутузов В.А.* Обзор российских геотермальных теплонасосных технологий. *Энергетик*. 2022. № 2. С. 40—44. EDN: TPRCLL
2. *Васильев Г.П.* Применение ГТСТ в России. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2009. № 7. С. 22—29. EDN: KUSHGD
3. *Васильев Г.П.* Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. М.: Граница, 2006. 173 с. ISBN 5-94691-202-X. EDN: QNMCSN
4. *Васильев Г.П.* Использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли для теплохладоснабжения здания. *Теплоэнергетика*. 1994. № 2. С. 31—35. EDN: ZYZXTF
5. ГОСТ 34346.2-2017. Тепловые насосы с водой в качестве источника тепла. Испытания и оценка рабочих характеристик. Часть 2. ISO 13256-2:1998
6. *Дадацкий А.В., Космовский П.Ю.* Тепловой насос. Принцип работы теплового насоса. Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства: сб. науч. ст., Гродно, 23—24 мая 2019 года Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2019. С. 172—174. EDN: BJJVFS
7. *Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И.* Возобновляемые и вторичные источники энергии инженерных систем при эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений. *Вестник евразийской науки*. 2023. 12 с. Т. 15(2). № 4. EDN: ENJZMH
8. Свод правил СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854682.htm>
19. *Хладотеплотехника: инновации и достижения: монография, посв. 55-летию со дня основания кафедры холодильной и торговой техники имени В.В. Осокина.* Донецк: Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, 2024. 536 с. ISBN 978-5-00202-518-3. EDN: BTQVZG
10. *Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н.* Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов. *Георесурсы*. 2020. Т. 22, № 4. С. 113—122. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>. EDN: LBRNG
11. *Cantor A., Owen D., Harter D., Nylén G., Kiparsky M.* Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act, Center for Law, Energy & the Environment, UC Berkeley School of Law, Berkeley, C, 2018.
12. *Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S.* Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of groundwater associated aquatic ecosystems (GWAAEs) and groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs), 2021.
13. *Lund J.W., Toth A.N.* Direct Utilization of Geothermal Energy: 2020 Worldwide Review. Proc. of the 2020 World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland. 2020. 39 p.

REFERENCES

1. Butuzov V.A. Review of Russian geothermal heat pump technologies. *Energetik*. 2022. No. 2. P. 40—44 (In Russ.). EDN: TPRCLL
2. Vasiliev G.P. Application of GTSP in Russia. *Energy: economics, technology, ecology*. 2009. No. 7. P. 22—29 (In Russ.). EDN: KUSHGD
3. Vasiliev G.P. Heat and cooling supply of buildings and structures using low-potential thermal energy of the Earth's surface layers. Moscow: Granitsa, 2006. 173 p. (In Russ.). ISBN 5-94691-202-X. EDN: QNMCSN
4. Vasiliev G.P. Use of low-potential thermal energy of the soil of the Earth's surface layers for heat and cooling supply of a building. *Thermal Power Engineering*. 1994. No. 2. P. 31—35 (In Russ.). EDN: ZYZXTF
5. GOST 34346.2-2017 HEAT PUMPS WITH WATER AS A HEAT SOURCE. Testing and evaluation of performance. Part 2. (In Russ.).
6. *Dadatsky A.V., Kosmovsky P.Yu.* Heat pump. Operating principle of a heat pump. Traditions, modern problems and prospects for the development of construction: Collection of scientific articles, Grodno, May 23—24, 2019. Grodno: Yanka Kupala State University of Grodno, 2019. P. 172—174 (In Russ.). EDN: BJJVFS
7. *Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I.* Renewable and secondary energy sources of engineering systems in the operation and reconstruction of buildings and structures. *Bulletin of Eurasian Science*. 2023. 12 p. Vol. 13.2. No. 4 (In Russ.). EDN: ENJZMH
8. Code of rules SP 25.13330.2012 Foundations and foundations on permafrost soils Updated version of SNiP 2.02.04-88. (In Russ.).
9. *Cooling and heat engineering: innovations and achievements: monograph dedicated to the 55th*

- anniversary of the founding of the Department of Refrigeration and Commercial Equipment named after V.V. Osokina. Donetsk: Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, 2024. 536 p. (In Russ.). ISBN 978-5-00202-518-3. EDN: BTQVZG
10. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Modern trends in the development of geothermal resources. Georesources. 2020. Vol. 22. No. 4. P. 113—122 (In Russ.). <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.113-122>. EDN: LBRRNG
 11. Cantor A., Owen D., Harter D., Nysten G., Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act, Center for Law, Energy & the Environment, UC Berkeley School of Law, Berkeley, CA, 2018.
 12. Psomas A., Bariamis G., Rouillard J., Stein U., Roy S. Study of the impacts of pressures on groundwater in Europe: Analysis of groundwater associated aquatic ecosystems (GWAAEs) and groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTes), 2021.
 13. Lund J.W., Toth A.N. Direct Utilization of Geothermal Energy: 2020 Worldwide Review. Proc. of the 2020 World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland. 2020. 39 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Волошин В.Р. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, внес вклад в разработку методики статьи и результатов исследования, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Белов К.В. — участвовал в разработке концепции статьи, внес вклад в разработку методики статьи и результатов исследования, участвовал в подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Valery R. Voloshin — made the main contribution to the development of the article concept, contributed to the development of the article methodology and research results, prepared the article text, gave final approval to the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Konstantin V. Belov — participated in the development of the article concept, contributed to the development of the article methodology and research results, participated in the preparation of the article text, gave final approval to the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Волошин Валерий Романович* — аспирант, преподаватель кафедры гидрогеологии им. В.М. Швеца ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: voloshinvr@gmail.com тел.: +7 (925) 414-44-41 ORCID: <https://doi.org/0009-0003-1971-3852>

Белов Константин Владимирович — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой гидрогеологии им. В.М. Швеца ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: belovkv@gmail.com тел.: +7 (925) 314-09-39 SPIN-код: 2980-3434 ORCID: <https://doi.org/0009-0009-5105-4627>

Valery R. Voloshin* — postgraduate student, lecturer of the V.M. Shvets Hydrogeology Department of the Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University. 23, Miklukho-Maklaya St., Moscow 117997, Russia e-mail: voloshinvr@mgi.ru tel.: +7 (925) 414-44-41 ORCID: <https://doi.org/0009-0003-1971-3852>

Konstantin V. Belov — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Head of the V.M. Shvets Hydrogeology Department of the Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University. 23, Miklukho-Maklaya st., Moscow 117997, Russia e-mail: belovkv@mgi.ru tel.: +7 (925) 314-09-39 SPIN-code: 2980-3434 ORCID: <https://doi.org/0009-0009-5105-4627>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author