

УДК 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции

В.Ю. Половников[✉], С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]polovnikov@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Положения о необходимости перехода на альтернативные источники энергии и энергетической безопасности, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях во многом могут опираться на использование геотермальной энергии. Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий является исследование тепловых режимов геотермальных теплообменников. Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между геотермальным теплообменником и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок, в том числе и предварительно увлажненных. **Цель.** Исследование влияния интенсификации теплоподвода к геотермальным теплообменникам за счет изменения теплопроводности в результате увлажнения засыпки в элементах его конструкции и наличия фазовых переходов. **Методы.** Решение задачи получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял от 1 до 10 мм. **Результаты и выводы.** Исследования выполнены для шести месяцев непрерывной работы геотермального теплообменника. При анализе тепловых режимов рассматриваемой системы основное внимание уделялось исследованию интенсификации теплоподвода к геотермальному теплообменнику с учетом влияния испарения влаги в его засыпке, ее характеристик и условий эксплуатации рассматриваемых систем. Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки геотермального теплообменника приводит к росту теплопритоков на 3,2...7,8 %. Выявлено существенное влияние нестационарности процессов переноса на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе. Показано, что вклад эффекта испарения в теплопритоки к геотермальному теплообменнику составляет около 22 %. Обоснован вывод о том, что при выборе варианта регулирования тепловых режимов геотермальных теплообменников следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальный теплообменник, математическое моделирование, теплопритоки, испарение

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464).

Для цитирования: Половников В.Ю., Шелемехова С.Д., Любивый Е.В. Численный анализ теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом испарения влаги в его конструкции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

UDC 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure

V.Yu. Polovnikov[✉], S.D. Shelemekhova, E.V. Lyubiviy

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]polovnikov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Provisions on the need to transition to alternative energy sources and energy security, reduction of environmental emissions and energy conservation in various industries can largely rely on the use of geothermal energy. A separate area in the field of modeling geothermal technologies is the study of thermal regimes of geothermal heat exchangers. The need to ensure reliable thermal contact between the geothermal heat exchanger and its environment leads to the use of a variety of backfills, including pre-moistened ones. **Aim.** Study of the intensification of heat supply to geothermal heat exchangers, taking into account the effect of moisture evaporation in its backfill, its characteristics and operating conditions of the systems under consideration. **Methods.** The solution to the problem was obtained by the finite difference method. An implicit difference scheme and sweep algorithm were used. The coordinate step ranged from 1 to 10 mm. **Results and conclusions.** Study was carried out for six months of continuous operation of a geothermal heat exchanger. When analyzing the thermal conditions of the system under consideration, the main attention was paid to the study of the intensification of heat supply to the geothermal heat exchanger, taking into account the effect of moisture evaporation in its backfill, its characteristics and operating conditions of the systems under consideration. It was established that an increase in the sand backfill humidity of a geothermal heat exchanger leads to a growth in heat inflows by 3.2–7.8%. A significant effect of the unsteadiness of transfer processes on heat transfer intensification in the system under consideration was revealed. It was shown that the increase in heat flow to the geothermal heat exchanger due to the presence of evaporation is about 22%. The conclusion is substantiated that when choosing an option for regulating the thermal conditions of geothermal heat exchangers, the volumetric humidity of the sand backfill should be primarily changed.

Keywords: geothermal energy, geothermal heat exchanger, mathematical modeling, heat gain, evaporation

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00464.

For citation: Polovnikov V.Yu., Shelemekhova S.D., Lyubiviy E.V. Numerical analysis of heat gain to geothermal heat exchangers with moisture evaporation in the structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 89–97. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4579

Введение

Известные положения о необходимости перехода на альтернативные источники энергии и энергетической безопасности, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях [1–3] являются подтверждением актуальности использования геотермальной энергии в различных приложениях.

Например, Исландия [4, 5], где отопление домохозяйств за счет геотермальных ресурсов приближается к 100 %, является в рассматриваемой области признанным лидером. Российская Федерация также обладает достаточными запасами геотермальной энергии и по оценкам, приведенным в [6], они в 8–12 раз превышают потенциал всех углеводородных ресурсов.

Теоретический анализ теплопритоков к геотермальным теплообменникам базируется на двух основных подходах к моделированию теплопереноса в конструкциях и зонах размещения геотермальных систем: аналитическом и численном.

Основным недостатком аналитического описания процессов переноса в рассматриваемых системах является наличие достаточно большого количества допущений, без введения некоторых из них получить аналитическое решение невозможно. Можно выделить следующие главные ограничивающие допущения, при которых решаются задачи: однонаправленность теплового потока [7], использование

граничных условий первого рода [8] или линейного источника тепла [9] на границах области расчета, возможность сегментирования конечного линейного источника тепла [10] и его стратификации [11].

Численное моделирование базируется чаще всего на использовании коммерческих программных комплексов: Feflow [12, 13], OpenGeoSys [14], Ansys Fluent [15, 16] и Comsol Multiphysics [17], в основу которых заложен метод конечных элементов. Основная трудность в случае использования такого программного обеспечения состоит в необходимости использования большого количества элементов пространственной сетки, а это обстоятельство неизбежно приводит к увеличению длительности вычислений. В исследовании [18] показано, что время расчета одного отопительного периода при эксплуатации геотермальной скважины на персональном компьютере с процессором 2,2 ГГц и 64 ГБ оперативной памяти составляет 143 часа.

Использование оригинальных программных кодов и, в частности, метода конечных разностей позволяет существенно сократить продолжительность расчетов до адекватных значений (несколько минут). В [19, 20] показано, что скорость расчетов рассматриваемых систем можно увеличить на порядки по сравнению с коммерческим программным обеспечением.

Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий [1–3] является исследо-

вание тепловых режимов геотермальных теплообменников (ГТ). Конструктивно наиболее типичный ГТ представляет собой теплообменник типа «труба в трубе», установленный в скважине (рис. 1). Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между ГТ и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента [21] до материалов с фазовыми переходами [22]. Однако использование этих материалов заметно повышает и без того существенные капитальные затраты при строительстве скважин с ГТ. В [23] было предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Использование увлажненного песка в качестве засыпки для ГТ неизбежно будет связано с наличием фазовых переходов и изменением механизмов теплопереноса в конструкции геотермального теплообменника.

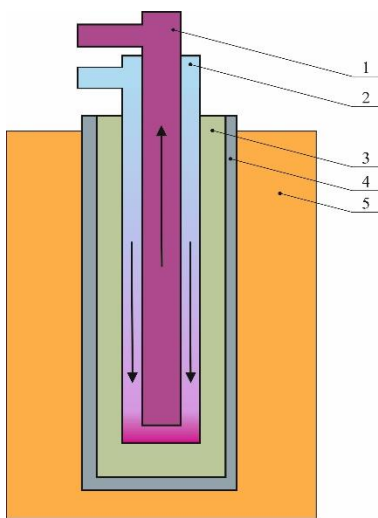


Рис. 1. Схема скважины с ГТ: 1 – внутренняя труба; 2 – кольцевой канал; 3 – засыпка; 4 – обсадная колонна; 5 – горячие породы

Fig. 1. Diagram of a well with a geothermal heat exchanger: 1 – inner pipe; 2 – ring channel; 3 – backfill; 4 – casing; 5 – hot rock

Анализ научной литературы по исследуемой проблематике [1–23] показал, что исследование теплопереноса в конструкциях и зонах размещения ГТ с учетом взаимосвязи характеристик засыпок, режимных параметров и фазовых переходов до настоящего времени не выполнено. Целью данной работы является исследование влияния интенсификации теплоподвода к ГТ за счет изменения теплопроводности в результате увлажнения засыпки в элементах его конструкции и наличия фазовых переходов.

Постановка задачи

Прототипом рассматриваемой конструкции ГТ является реальный объект, геометрические и физические параметры которого описаны в [22]. Обсадная колонна, выполняющая в [22] роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а кольцевой канал ГТ – из стали. На рис. 2 приведена схема области решения рассматриваемой задачи.

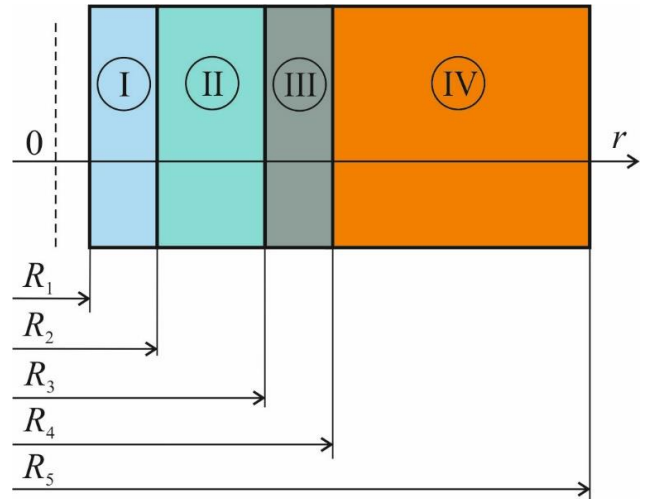


Рис. 2. Схема области решения: I – внешняя труба кольцевого канала ГТ; II – засыпка; III – обсадная колонна; IV – горячие породы

Fig. 2. Diagram of the solution area: I – outer ring channel pipe; II – backfill; III – casing; IV – hot rock

Предполагается, что до начала эксплуатации ГТ в рассматриваемой области решения (рис. 2) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени отличный от нуля через ГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. На границе R_1 вводятся граничные условия третьего рода, а на границе R_5 выставляются граничные условия первого рода.

Влага, наполняющая поры песчаной засыпки II, на границе контакта (R_3) с разогретой конструкцией обсадной колонны III испаряется. Образовавшийся пар диффундирует в зону меньших концентраций. На поверхности R_2 происходит конденсация пара с выделением тепла (рис. 2).

Решение задач массопереноса с учетом всего многообразия фазовых переходов в рассматриваемой конструкции геотермального теплообменника существенно усложнит поиск ответа на поставленный вопрос. В соответствии с заявленной целью исследуется исключительно интенсификация теплопереноса в конструкции ГТ за счет изменения

эффективной теплопроводности элементов его конструкции и наличия фазовых переходов в них. По этой причине при оценке влияния описанных факторов, но не ограничиваясь ей, при постановке задачи приняты следующие основные допущения:

1. Теплофизические характеристики материалов, веществ и их компонентов являются постоянными и известными величинами.
2. Теплота в области диффузии паров и жидкости передается только теплопроводностью, а учет фазовых переходов осуществляется только на поверхностях испарения и конденсации.
3. В местах соприкосновения слоев (рис. 2) выполняются условия идеального теплового контакта.
4. Не рассматривается перенос тепла в энергоносителе, циркулирующем в ГТ, а также процессы массопереноса в засыпке и горячей породе (рис. 2).
5. Считается, что вдали от скважины поддерживается неизменная температура пород.

Математическая модель

Уравнения теплопроводности и соответствующие им краевые условия для рассматриваемой области решения (рис. 2) имеют следующий вид:

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r \leq R_5;$$

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right); \quad i = \text{I–IV}; \quad (1)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_5; T_i = T_0 = \text{const}; \quad i = \text{I–IV}; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_1; \alpha (T_{r=R_1} - T_{\text{in}}) = -\lambda_{\text{I}} \frac{\partial T_1}{\partial r}; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \lambda_{\text{I}} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2}{\partial r} + Jq; T_1 = T_2; \quad (4)$$

$$\tau > 0, r = R_3; \lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_{\text{III}} \frac{\partial T_3}{\partial r}; T_2 = T_3; \quad (5)$$

$$\tau > 0, r = R_4; \lambda_{\text{III}} \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_{\text{IV}} \frac{\partial T_4}{\partial r}; T_3 = T_4; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_5; T_5 = T_{\text{ex}} = \text{const}. \quad (7)$$

Теплофизические свойства песчаной засыпки при известных плотности ρ и объемной влажности W вычислялись из следующих соотношений [23]:

$$\lambda_{\text{II}} = -1,337 + 0,00125\rho + 0,01W; \quad (8)$$

$$c_{\text{II}} = -0,018 + 0,0009\rho + 0,031W. \quad (9)$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи в канале кольцевого поперечного сечения использовалось широко известное уравнение [24]:

$$\text{Nu} = 0,017 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_e^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_e}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18},$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_e}; \quad \text{Re} = \frac{Vd}{\nu_e}; \quad d = d_2 - d_1.$$

Коэффициент аккомодации, скорость и теплота фазового перехода вычислялись из соотношений [25]:

$$a = \frac{0,059}{P_s^{0,5}};$$

$$J = \frac{a(P_s - P_p)}{\left(\frac{2\pi R_g T|_{r=R_2}}{M} \right)^{0,5}};$$

$$q = 2500,64 - 2,369T|_{r=R_2}.$$

Теплопритоки Q без учета термического сопротивления металлической стенки трубы ГТ находились из выражения:

$$Q = -\lambda_{\text{II}} \frac{\partial T_2|_{r=R_2}}{\partial r} \frac{F}{l} + \frac{JqF}{l}.$$

Второе слагаемое в последнем выражении является дополнительной частью теплопритока к теплообменнику за счет фазового перехода.

Обозначения: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с; τ – время, с; R – граница области расчета, м; T – температура, К; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, м; V – скорость, м²/с; W – объемная влажность, %; d – эквивалентный диаметр, м; d_2, d_1 – внешний и внутренний диаметры кольцевого канала, м; $\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}$ – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; $\pi=3,14$; a – коэффициент аккомодации; J – скорость испарения, кг/(м²·с); M – молекулярная масса паров, кг/моль; P – давление, Па; q – теплота фазового перехода, Дж/кг; R_g – газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); Q – теплопритоки, Вт/м; l – единичная длина, м; $F=2\pi R_2 l$ – площадь поверхности, м².

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2, 3, 4, 5 – номера границ областей расчета (рис. 2); in – внутренний; ex – наружный; e – жидкость (энергоноситель); w – стенка; p – парциальный; s – насыщение; I, II, III, IV – номера областей расчета (рис. 2).

Метод решения и исходные данные

Решение задачи (1)–(7) получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял от 1 до 10 мм. Геометрические параметры ($R_1=0,05$ м; $R_2=0,055$ м; $R_3=0,14$ м;

$R_4=0,25$ м) соответствовали конструкции скважины, описанной в [22], а $R_5=10$ м. Внешний и внутренний диаметры кольцевого канала составляли: $d_1=2\cdot R_1$; $d_2=0,06$ м.

Начальная температура T_0 в рассматриваемой области решения принималась равной температуре разогретых пород $T_{ex}=373,15$ К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла $T_{in}=278,15$ К. Объемная влажность песчаной засыпки W варьировалась от 5 до 25 % и была ограничена открытой пористостью. Расход энергоносителя задавался от 0,004 до 0,04 м³/с, что соответствует скоростям движения по кольцевому каналу $V=0,1-1$ м/с.

Теплофизические характеристики, использованные при проведении моделирования, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Table 1. Thermophysical characteristics

Характеристика Characteristic	λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ kg/m ³
Кольцевой канал Ring channel	57,5	466	7860
Засыпка/Backfill	Расчет по (8) Calculation by (8)	Расчет по (9) Calculation by (9)	1900
Цемент/Cement [22]	1,78	800	2490
Горячие породы Hot rocks [22]	1,3	775	1990

Результаты численного моделирования

Результаты исследования тепловых режимов ГТ приведены в табл. 2–4 и на рис. 3. Исследования выполнены для шести месяцев непрерывной работы ГТ. При анализе тепловых режимов рассматриваемой системы основное внимание уделялось исследованию интенсификации теплоподвода к ГТ с учетом влияния испарения влаги в его засыпке, ее характеристик и условий эксплуатации рассматриваемых систем.

Рис. 3 в качестве примера иллюстрирует типичную картину снижения теплопритоков Q к ГТ во время эксплуатации при фиксированной скорости движения энергоносителя по кольцевому каналу ($V=1,0$ м/с), различных значениях объемной влажности песчаной засыпки W и учете испарения влаги в засыпке.

Изменение величин теплопритоков к ГТ свидетельствует об их ожидаемом снижении с увеличением длительности эксплуатации из-за охлаждения горячих пород в непосредственной близости от скважины (рис. 1) и закономерном увеличении при росте W , сопровождающемся изменением теплофизических характеристик засыпки в соответствии с формулами (8) и (9). Время эксплуатации ГТ (6 месяцев) выбрано исходя из соответствия типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

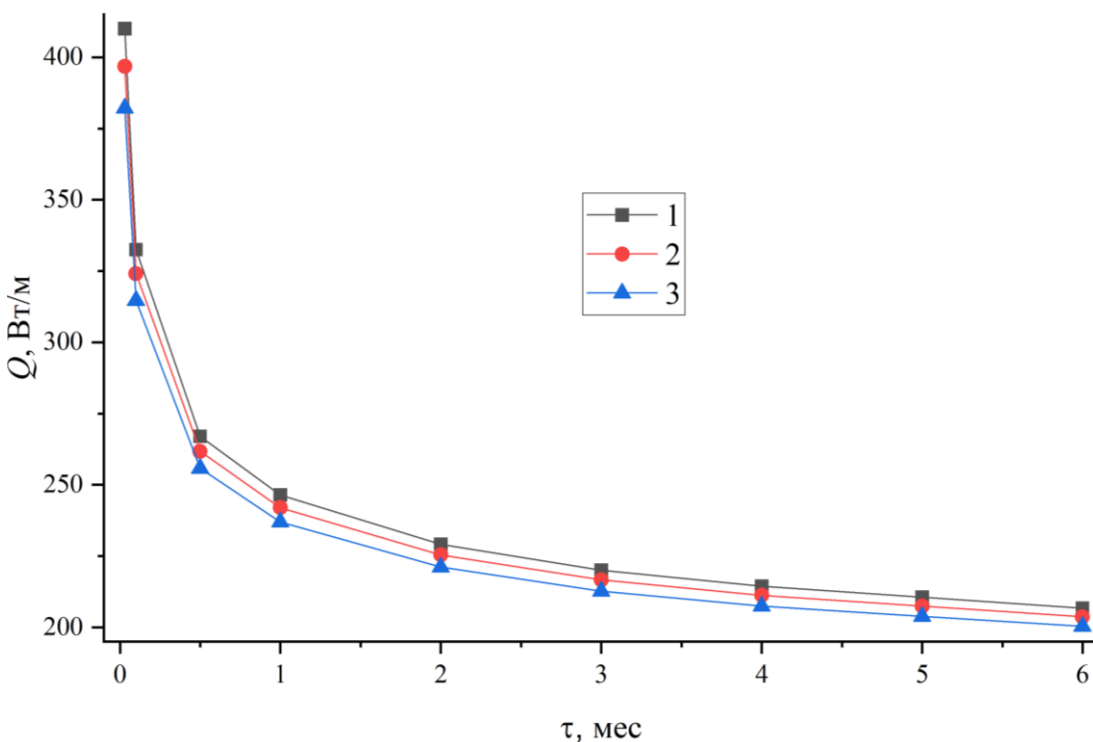


Рис. 3. Снижение теплопритоков к ГТ: 1 – $W=25\%$; 2 – $W=15\%$; 3 – $W=5\%$

Fig. 3. Reducing heat gain to geothermal heat exchanger: 1 – $W=25\%$; 2 – $W=15\%$; 3 – $W=5\%$

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе в период установления стационарного температурного поля в горячих породах свидетельствует о её существенном влиянии на уровень теплопритоков к ГТ. За рассматриваемый период эксплуатации (6 месяцев) теплопритоки к ГТ снижаются практически в 2 раза по сравнению с первоначальным уровнем. Здесь следует отметить, что результаты моделирования указывают на резкое снижение тепловых потоков в первые дни работы ГТ (аналогичные выводы сделаны в [22] при исследовании материалов с фазовыми переходами). Это объясняется интенсивным охлаждением металлического корпуса ГТ (рис. 1) из-за его сравнительно высокой теплопроводности (табл. 1). Этот результат имеет конкретное практическое применение, поскольку позволяет обоснованно выбирать пути регулировки расхода энергоносителя для выравнивания теплосъема от ГТ во времени.

В табл. 2, 3 приведены результаты численного исследования интенсификации теплоподвода к ГТ с учетом испарения влаги и взаимосвязи характеристик засыпок и режимов работы рассматриваемых систем.

Таблица 2. Изменение теплопритоков к ГТ с учетом испарения при увеличении W от 5 до 25 %, %

Table 2. Change of heat gain to the geothermal heat exchanger taking into account evaporation with increasing W from 5 to 25%, %

τ, мес. month	V, м/с/м/с			
	0,10	0,25	0,50	1,00
0,03	7,12	7,21	7,49	7,79
0,1	5,58	5,64	5,67	5,69
0,5	4,32	4,36	4,38	4,39
1	3,93	3,97	4,00	4,09
2	3,59	3,60	3,61	3,64
3	3,42	3,44	3,46	3,49
4	3,31	3,33	3,35	3,37
5	3,23	3,25	3,26	3,27
6	3,16	3,18	3,19	3,20

Исследование влияния влажности песчаной засыпки ($W=5-25\%$) на теплопритоки в конструкции ГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков до 7,8 % в начальный период эксплуатации ГТ и до 3,2 % к концу этого периода (табл. 2). Более высокий рост теплопритоков в начальный промежуток времени объясняется теми же обстоятельствами, что и при анализе нестационарности процессов переноса в рассматриваемой системе. Несмотря на достаточно скромное увеличение тепловых потоков в системе геотермальной скважины с ГТ из-за изменения объемной влажности засыпки, суммарный рост теплопритоков в рассматриваемой

системе при глубине скважины 25 м за весь период эксплуатации (6 месяцев) может приводить к дополнительной аккумуляции в 15 Гкал и более.

Таблица 3. Изменение теплопритоков к ГТ с учетом испарения при увеличении V от 0,1 до 1,0 м/с

Table 3. Change of heat gain to the geothermal heat exchanger taking into account evaporation with increasing V from 0,1 to 1,0 m/s

τ, мес. month	W, %		
	25	15	5
0,03	2,47	2,40	2,31
0,1	1,65	1,61	1,57
0,5	1,47	1,43	1,40
1	1,34	1,31	1,27
2	1,22	1,19	1,17
3	1,05	1,03	1,01
4	1,12	1,11	1,08
5	1,14	1,13	1,10
6	0,96	0,94	0,93

Анализ влияние интенсивности теплоотдачи в кольцевом канале на изменение теплопритоков к ГТ (табл. 3) позволяет сделать вывод о незначительном росте тепловых потоков в рассматриваемой системе (около 1–2,5 %). Это объясняется достаточно быстрым установлением постоянной температуры на внешней трубе кольцевого канала ГТ (рис. 2). Следовательно, при решении задач, подобных задаче (1)–(7), для исследования тепловых режимов ГТ можно обоснованно вместо выражения (3) использовать граничные условия первого рода.

Таким образом, при выборе варианта регулирования тепловых режимов ГТ следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки W .

В табл. обобщены результаты численного анализа влияния наличия испарения влаги в конструкции ГТ на рост теплопритоков к нему в зависимости от W и V в конце срока эксплуатации (6 мес.). Анализ содержания табл. 4 свидетельствует о существенном вкладе процесса испарения влаги в засыпке ГТ на интенсификацию теплопритоков к нему. Рост теплопритоков к ГТ с учетом наличия испарения составляет около 22 % по сравнению с аналогичным исследованием без учета этого эффекта.

Таблица 4. Рост теплопритоков к ГТ за счет испарения, %

Table 4. Increase of heat gain to the geothermal heat exchanger due to evaporation, %

W, %	V, м/с/м/с			
	0,10	0,25	0,50	1,00
5	22,02	21,89	21,91	21,84
15	21,69	21,57	21,58	21,52
25	21,41	21,29	21,30	21,24

Адекватность результатов численного моделирования следует из проверок используемых методов решения задачи (1)–(7) на сходимость и устойчивость, а также подтверждается численным сопоставлением с известными данными о работе геотермальных скважин с ГТ [21, 22]. В [21, 22] линейные плотности теплового потока составляют 60–300 Вт/м, что хорошо согласуется с результатами данной работы (рис. 3).

Заключение

Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки ГТ приводит к росту теплопритоков на 3,2–7,8 %.

Выявлено существенное влияние нестационарности процессов переноса на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе в начальном периоде формирования стационарного температурного поля горячих пород.

Показано, что вклад эффекта испарения в теплопритоки к геотермальному теплообменнику составляет около 22 %.

Сделан вывод о том, что при выборе варианта регулирования тепловых режимов ГТ следует преимущественно изменять объемную влажность песчаной засыпки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – Vol. 39 (5). – P. 585–606. DOI: 10.1002/er.3329.
2. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 748–764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
3. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38 (2). – P. 803–813. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.025.
4. Stober I., Bucher K. *Geothermal energy*. – Cham: Springer International Publ., 2021. – 390 p.
5. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems / M. Soltani, M.F. Kashkooli, A. Dehghani-Sanij, A. Kazemi, N. Bordbar, M. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, B.M. Dusseault // *Sustainable Cities and Society*. – 2019. – Vol. 44. – P. 793–818. DOI: S2210670718306838.
6. Hutterer G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report, review // *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. – 2021. – Article 01017.
7. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger / R.A. Beier, J. Acuña, P. Mogensen, B. Palm // *Geothermics*. – 2014. – Vol. 51. – P. 470–482. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.02.006.
8. Fang L., Diao N.R., Shao Z.K. Thermal analysis models of deep borehole heat exchangers // *International Ground Source Heat Pump Association*. – 2018. – P. 18–20. DOI: 10.22488/okstate.18.000018.
9. Beier R.A., Fossa M., Morchio S. Models of thermal response tests on deep coaxial borehole heat exchangers through multiple ground layers // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 184. – Article 116241. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116241.
10. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis / Y. Luo, H. Guo, F. Meggers, L. Zhang // *Energy*. – 2019. – Vol. 185. – P. 1298–1313. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.228.
11. Luo Y.Q., Xu G.Z., Cheng N. Proposing stratified segmented finite line source (SS-FLS) method for dynamic simulation of medium-deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 604–624. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.086.
12. Bär K., Rühaak W., Welsch B. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 76. – P. 351–360. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.841.
13. Welsch B., Rühaak W., Schulte D. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage // *International Journal of Energy Research*. – 2016. – Vol. 40 (13). – P. 1855–1868. DOI: 10.1002/er.3570.
14. Huang Y.B., Zhang Y.J., Xie Y.Y. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating // *Energy and Buildings*. – 2020. – Vol. 221. – Article 110019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110019.
15. Li C., Guan Y.L., Jiang C. Numerical study on the heat transfer, extraction, and storage in a deep-buried pipe // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 152. – P. 1055–1066. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.124.
16. Renaud T., Verdin P., Falcone G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2019. – Vol. 143. – Article 118496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118496.
17. Zhang H.Z., Han Z.W., Li X.M. Study on the influence of borehole spacing considering groundwater flow and freezing factors on the annual performance of the ground source heat pump // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 182. – Article 116042. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116042.
18. Cai W.L., Wang F.H., Chen S. Analysis of heat extraction performance and long-term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: a project-based study // *Applied Energy*. – 2021. – Vol. 289. – Article 116590. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116590.
19. Zhang F.F., Yu M.Z., Sorensen B.R. Heat extraction capacity and its attenuation of deep borehole heat exchanger array // *Energy*. – 2022. – Vol. 254. – Article 124430. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124430.
20. Zhang F.F., Fang L., Jia L.R. A dimension reduction algorithm for numerical simulation of multi-borehole heat exchangers // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 2235–2245. DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.028.
21. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: field experiments and numerical simulation / H. Park, S-R. Lee, S. Yoon, J-C. Choi // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 103. – P. 12–24. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.012.

22. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile / Z. Cao, G. Zhang, Y. Liu, X. Zhao, C. Li // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 184. – P. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.
23. Журмилова И.А., Штым А.С. Теплофизические свойства увлажненного песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2017. – Т. 2. – С. 100–109. DOI: org/10.5281/zenodo.808872.
24. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: АРИС, 2014. – 417 с.
25. Половников В.Ю., Губина Е.В. Тепломассоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.

Информация об авторах

Вячеслав Юрьевич Половников, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Софья Дмитриевна Шелемехова, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Егор Вадимович Любивый, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Поступила в редакцию: 15.02.2024

Поступила после рецензирования: 04.03.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39 (5), pp. 585–606. DOI: 10.1002/er.3329.
2. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
3. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States. *Energy Policy*, 2010, vol. 38 (2), pp. 803–813. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.10.025.
4. Stober I., Bucher K. *Geothermal energy*. Cham, Springer International Publ., 2021. 390 p.
5. Soltani M., Kashkooli M.F., Dehghani-Sani A., Kazemi A., Bordbar N., Farshchi M., Elmi M., Gharali K., Dusseault B.M. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 793–818. DOI: S2210670718306838.
6. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report, review. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*, 2021, Article 01017.
7. Beier R.A., Acuña J., Mogensen P., Palm B. Transient heat transfer in a coaxial borehole heat exchanger. *Geothermics*, 2014, vol. 51, pp. 470–482. DOI: 10.1016/j.geothermics.2014.02.006.
8. Fang L., Diao N.R., Shao Z.K. Thermal analysis models of deep borehole heat exchangers. *International Ground Source Heat Pump Association*, 2018, pp. 18–20. DOI: 10.22488/okstate.18.000018.
9. Beier R.A., Fossa M., Morchio S. Models of thermal response tests on deep coaxial borehole heat exchangers through multiple ground layers. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 184, Article 116241. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2020.116241.
10. Luo Y., Guo H., Meggers F., Zhang L. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis. *Energy*, 2019, vol. 185, pp. 1298–1313. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.228.
11. Luo Y.Q., Xu G.Z., Cheng N. Proposing stratified segmented finite line source (SS-FLS) method for dynamic simulation of medium-deep coaxial borehole heat exchanger in multiple ground layers. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, pp. 604–624. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.086.
12. Bär K., Rühaak W., Welsch B. Seasonal high temperature heat storage with medium deep borehole heat exchangers. *Energy Procedia*, 2015, vol. 76, pp. 351–360. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.841.
13. Welsch B., Rühaak W., Schulte D. Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 2016, vol. 40 (13), pp. 1855–1868. DOI: 10.1002/er.3570.
14. Huang Y.B., Zhang Y.J., Xie Y.Y. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 221, Article 110019. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110019.
15. Li C., Guan Y.L., Jiang C. Numerical study on the heat transfer, extraction, and storage in a deep-buried pipe. *Renewable Energy*, 2020, vol. 152, pp. 1055–1066. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.124.
16. Renaud T., Verdin P., Falcone G. Numerical simulation of a deep borehole heat exchanger in the Krafla geothermal system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 143, Article 118496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118496.
17. Zhang H.Z., Han Z.W., Li X.M. Study on the influence of borehole spacing considering groundwater flow and freezing factors on the annual performance of the ground source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 182, Article 116042. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116042.

18. Cai W.L., Wang F.H., Chen S. Analysis of heat extraction performance and long-term sustainability for multiple deep borehole heat exchanger array: a project-based study. *Applied Energy*, 2021, vol. 289, Article 116590. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116590.
19. Zhang F.F., Yu M.Z., Sorensen B.R. Heat extraction capacity and its attenuation of deep borehole heat exchanger array. *Energy*, 2022, vol. 254, Article 124430. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124430.
20. Zhang F.F., Fang L., Jia L.R. A dimension reduction algorithm for numerical simulation of multi-borehole heat exchangers. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, pp. 2235–2245. DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.028.
21. Park H., Lee S-R., Yoon S., Choi J-C. Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation. *Applied Energy*, 2013, vol. 103, pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.012.
22. Cao Z., Zhang G., Liu Y., Zhao X., Li C. Influence of backfilling phase change material on thermal performance of precast high-strength concrete energy pile. *Renewable Energy*, 2022, vol. 184, pp. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.
23. Zhurmilova I.A., Shtym A.S. Thermophysical properties of the moistened sand used as filler for boreholes with ground heat exchangers. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU*, 2017, vol. 2, pp. 100–109. (In Russ.) DOI: org/10.5281/zenodo.808872.
24. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat transfer*. Moscow, ARIS Publ., 2014. 417 p. (In Russ.)
25. Polovnikov V.Y., Gubina E.V. Heat and mass transfer in a wetted thermal insulation of hot water pipes operating under flooding conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87 (5), pp. 1106–1112. (In Russ.)

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Sofia D. Shelemekhova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Egor V. Lyubiviy, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Received: 15.02.2024

Revised: 04.03.2024

Accepted: 26.04.2024