

УДК 620.91

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОПРИТОКОВ К ГЕОТЕРМАЛЬНЫМ ТЕПЛООБМЕННИКАМ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Половников Вячеслав Юрьевич¹,
polovnikov@tpu.ru

Шелемехова Софья Дмитриевна¹,
shelemehovaaa@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена колоссальным энергетическим потенциалом геотермальной и петротермальной энергетики. Он призван стимулировать проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области геотермальных технологий. Развитие технологий использования геотермальной и петротермальной энергии в РФ тормозится рядом обстоятельств. Основными сдерживающими факторами являются: конкуренция со стороны традиционной энергетики, проблемы с законодательной базой и отсутствие актуальных направлений исследований и разработок. В настоящее время имеет место отставание России в области освоения геотермальных ресурсов от соответствующего мирового уровня развития.

Цель: оценка влияния конденсации в конструкции геотермального теплообменника на изменение теплопритоков к нему.

Объект: типичная конструкция геотермального теплообменника, состоящего из металлического трубопровода и обсадной цементной колонны. Полость между трубопроводом и обсадной колонной заполнена засыпкой из увлажненного песка.

Методы. Численный анализ процессов переноса тепла выполнен с применением обоснованной разностной сетки и шагов интегрирования по времени. Обоснованность и достоверность результатов численного анализа температурных полей в зонах размещения геотермальных теплообменников следует из проведенных проверок используемого метода на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается сравнением результатов с данными других авторов. Использовался метод конечных разностей и неявная разностная схема. Особенности решения задачи являлись разрыв значений теплофизических свойств на границах разделов и наличие нелинейного члена в граничном условии.

Результаты. Проведено численное исследование влияния конденсации пара в конструкции геотермального теплообменника на снижение теплопритоков в рассматриваемой системе. Выявлено, что конденсация пара приводит к снижению теплопритоков на 4,55–31,19 %. Показано, что применение даже сравнительно простых моделей теплопереноса позволяет прогнозировать изменение теплопритоков к геотермальному теплообменнику в условиях конденсации пара в его конструкции при длительной эксплуатации.

Ключевые слова:

геотермальная энергия, геотермальный теплообменник, математическое моделирование, теплопритоки, конденсация.

Введение

Использование геотермальной энергии в России сдерживается по ряду причин, одной из которых является отсутствие актуальных направлений исследований и разработок [1].

Ежегодно более 1,5 тысяч публикаций индексируется в международных базах данных по всем аспектам геотермальных технологий (от бальнеологии до извлечения из термальных вод ценных химикатов).

Наиболее перспективными направлениями исследований в мировой науке в настоящее время (относительно энергетического использования геотермальных ресурсов) являются следующие:

1. Развитие технологий тепловых насосов.
2. Развитие технологий бинарных циклов.
3. Развитие технологий использования глубинной энергии недр.

Общее представление о современном состоянии исследований в России и мире по рассматриваемой проблематике можно получить из многочисленных обзорных работ, например [1–5].

По исследованиям, связанным с моделированием процессов теплопереноса в геотермальных си-

стемах, каждый год индексируется ведущими базами данных 25–30 статей. Анализ этих публикаций за последний год позволил выделить следующие основные направления работ:

1. Исследования режимов работы и повышения эффективности скважных теплообменников различных конфигураций [6–10].
2. Исследования процессов теплопереноса в зонах размещения геотермальных теплообменников [11–15].

По указанным направлениям проводятся экспериментальные [16, 17] и теоретические [18–21] работы. При этом в последнем блоке исследований традиционно можно выделить аналитические [18, 19] и численные [20, 21] подходы к анализу режимов работы рассматриваемых систем.

Наиболее распространенными конфигурациями грунтовых теплообменников являются [9, 10] коаксиальное и U-образное исполнения. Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между теплообменником и окружающей его горячей породой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы, в том числе и увлажненный песок.

Неоднократно показаны экономическая (например, для труднодоступных или отдаленных районов) и экологическая целесообразность эксплуатации геотермальных ресурсов [1–3]. Однако известны исследования, например [22], указывающие на более ранний (чем проектный) вывод из эксплуатации геотермальных систем, связанный с обратной закачкой теплоносителя. Еще одним наиболее вероятным фактором, который может привести к негативным следствиям при эксплуатации геотермальных теплообменников, является наличие фазовых переходов и процессов переноса массы в конструкциях и зонах их размещения.

Целью данной работы является оценка снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации. Анализ современных публикаций, например [6–22], показал, что подобных исследований не проводилось.

Постановка задачи

При постановке задачи рассматривалась типичная конструкция теплообменника (рис. 1), используемого при эксплуатации геотермальных систем различного назначения. Рассматриваемая система состояла из трубопровода и обсадной цементной колонны. В полости – 2 (между трубопроводом и обсадной колонной) находится засыпка из увлажненного песка [23]. Подобные конструкции скважин используются для обеспечения надежного теплового контакта между элементами рассматриваемой системы, а также для возможности организации быстрого ремонта или демонтажа оборудования.

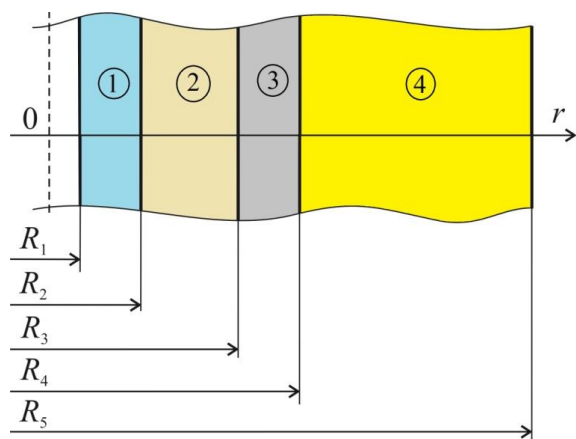


Рис. 1. Схема области решения: 1 – трубопровод; 2 – засыпка; 3 – обсадная колонна; 4 – разогретые породы

Fig. 1. Solution area: 1 – pipeline; 2 – backfill; 3 – casing string; 4 – heated rocks

Предполагается, что до начала работы скважного теплообменника вода, содержащаяся в засыпке, при контакте с разогретыми элементами рассматриваемой системы переходит в парообразное состояние. Низкотемпературный энергоноситель охлаждает рассматриваемую систему (рис. 1), а пар, находящийся в засыпке, конденсируется на «холодном» трубопроводе. Предполагается, что на протяжении всего периода

эксплуатации реализуется вышеописанный процесс конденсации. Следствием конденсации пара является увеличение температуры стенки трубы и снижение теплопритоков к энергоносителю.

Анализ снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам сводится к решению нестационарной нелинейной задачи теплопроводности для области решения, показанной на рис. 1, с учетом конденсации пара на поверхности R_2 «стенка трубы – засыпка».

Основные допущения, принятые при постановке задачи, состоят в следующем:

1. Теплофизические свойства, использовавшиеся при проведении численного моделирования, имеют постоянные значения.
2. На существенном расстоянии от скважины (50 м) температура разогретых пород имеет постоянное значение.
3. Для рассматриваемой задачи реализуются условия идеального теплового контакта.
4. Процессы переноса пара в засыпке (рис. 1) не рассматриваются.

Математическая модель

Уравнения теплопроводности и соответствующие им краевые условия имели следующий вид:

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

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right); \quad i = 1-4; \quad (1)$$

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

$$\tau \geq 0, r = R_1; -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha (T_1 - T_m); \quad (3)$$

$$\tau \geq 0, r = R_2; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - jq; T_1 = T_2; \quad (4)$$

$$\tau \geq 0, r = R_3; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}; T_3 = T_4; \quad (5)$$

$$\tau \geq 0, r = R_4; \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r}; T_4 = T_5; \quad (6)$$

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

Скорость конденсации, коэффициент аккомодации и теплота фазового перехода вычислялись из соотношений [24]:

$$j = \frac{a(P_s - P_p)}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} T|_{r=R_2}}},$$

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

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

Выражение для расчета коэффициента аккомодации a выбрано исходя из минимума определяющих его величин для упрощения постановки задачи. Такой подход широко распространен и используется, например, в [25].

Теплопритоки к геотермальному теплообменнику рассчитывались по формуле:

$$Q = \frac{\alpha(T_1 - T_{in})F}{l} - \frac{jqF}{l}.$$

Обозначения: α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\pi = 3,14$; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с; M – молекулярная масса паров, кг/моль; P – давление, Па; Q – теплопритоки, Вт/м; R – граница области расчета, м; R_g – газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); T – температура, К; a – коэффициент аккомодации; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); j – скорость конденсации, кг/(м²·с); q – теплота фазового перехода, Дж/кг; r – координата, м; l – единичная длина, м; F – площадь поверхности, м².

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2, 3, 4, 5 – номера границ областей расчета (рис. 1); in – внутренний; ex – наружный; p – парциальный; s – насыщение.

Метод решения и исходные данные

При решении задачи (1)–(7) использовались метод конечных разностей и метод простых итераций. Задача (1)–(7) решена на неравномерной разностной сетке (координатный шаг: от 0,1 до 10 мм). Геометрические параметры ($R_1=0,05$ м; $R_2=0,055$ м; $R_3=0,1$ м; $R_4=0,15$ м; $R_5=50$ м) соответствовали типичной конструкции геотермального теплообменника (рис. 1).

Начальная температура T_0 в рассматриваемой области решения принималась равной температуре разогретых пород T_{ex} (298,15–373,15 К). Температура прокачиваемого энергоносителя составляла $T_{in}=278,15$ К при $\alpha=200$ Вт/(м²·К).

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

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Table 1. Thermophysical properties

Материал Material	λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ kg/m ³
Труба/Pipe	46,1	310	5240
Засыпка Backfill	2,3	1486	2000
Цемент Cement	0,99	1900	1830
Порода/Rock	1,6	870	3050

Результаты численного моделирования

Результаты исследования снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Исследования выполнены для 20 лет непрерывной работы геотермального теплообменника. При анализе снижения теплопритоков к геотермальным теплооб-

менникам исследовалось влияние нестационарности процессов теплопереноса и конденсации пара в рассматриваемой системе.

Адекватность результатов численного моделирования следует из их сопоставления с известными данными о работе приповерхностных геотермальных установок [23]. Следует отметить хорошее качественное согласование результатов моделирования и данных из [23]. При этом в [23], как и в настоящем исследовании, отмечается, что охлаждение рассматриваемой системы наиболее быстро происходит на начальном этапе прокачки теплоносителя.

На рис. 2 показано изменение во времени теплопритоков к геотермальному теплообменнику с учетом конденсации пара в его конструкции в зависимости от температуры разогретых пород T_{ex} .

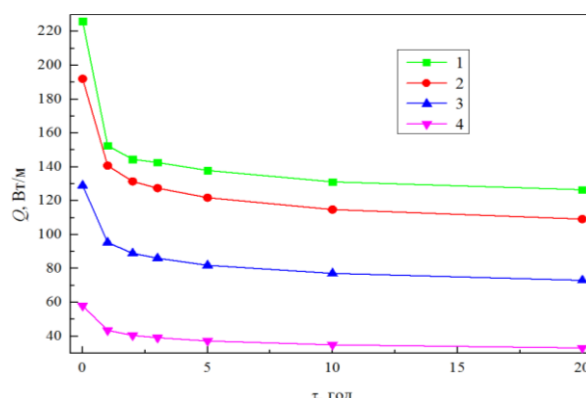


Рис. 2. Изменение теплопритоков к геотермальному теплообменнику: 1 – $T_{ex}=373,15$ К; 2 – $T_{ex}=348,15$ К; 3 – $T_{ex}=323,15$ К; 4 – $T_{ex}=298,15$ К

Fig. 2. Change in heat gains to geothermal heat exchanger: 1 – $T_{ex}= 73,15$ K; 2 – $T_{ex}=348,15$ K; 3 – $T_{ex}=323,15$ K; 4 – $T_{ex}=298,15$ K

В табл. 2 приведены обобщенные результаты исследования по снижению теплопритоков к геотермальному теплообменнику в условиях длительной эксплуатации.

Таблица 2. Снижение теплопритоков к геотермальному теплообменнику, %

Table 2. Reduction of heat gains to geothermal heat exchangers, %

T_{ex}	Длительность эксплуатации геотермального теплообменника, год Duration of operation of the geothermal heat exchanger, year					
	1	2	3	5	10	20
25	6,26	5,88	5,47	5,16	5,02	4,55
50	8,62	8,09	7,56	7,15	6,84	6,31
75	13,35	12,81	11,99	11,33	10,88	10,04
100	31,19	29,32	27,44	25,97	24,94	23,09

Результаты численного моделирования (рис. 2) свидетельствуют о том, что приток тепла к геотермальному теплообменнику с увеличением времени работы ожидаемо уменьшается. Связано это со снижением градиента температур в окружающей разогретой породе.

В зависимости от длительности эксплуатации и температуры разогретой породы конденсация пара приводит к снижению теплопритоков на 4,55–31,19 % в (табл. 2).

Из-за роста температуры стенки трубы (рис. 1) эффект от конденсации пара в конструкции геотермального теплообменника с течением времени уменьшается. Резкое снижение теплопритоков в начальный период времени объясняется сравнительно быстрым охлаждением внутренних слоев рассматриваемой системы (рис. 1) из-за взаимодействия с прокачиваемым энергоносителем.

Необходимо отметить следующее важное положение. Приведенные в данной работе результаты по исследованию снижения теплопритоков к геотермальному теплообменнику в условиях длительной эксплуатации являются оценочными, поскольку не учитывают некоторых факторов, способных оказать существенное влияние на тепловое состояние рассматриваемой системы. К этим факторам в первую очередь стоит отнести испарение влаги и массоперенос в конструкции геотермальной теплообменной системы (рис. 1). С одной стороны, учет наличия этих факторов усложнит математическое описание анализируемых процессов, а с другой – позволит провести более детализированный анализ тепловых режимов работы геотермального теплообменника. Возможно, эти процессы нивелируют друг друга или их влияние

будет пренебрежимо мало из-за сравнительно невысоких перепадов температур в рассматриваемой системе. Установление возможных условий реализации этих и других возможных факторов и процессов, способных оказать влияние на интенсификацию процессов теплопереноса в зонах размещения геотермальных теплообменников, является тематикой дальнейших исследований по данной проблеме.

Однако, несмотря на вышеописанные обстоятельства, применение математической модели (1)–(7) для анализа теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях наличия фазовых переходов позволяет прогнозировать их тепловые режимы.

Заключение

Проведена оценка снижения теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации.

Выявлено, что конденсация пара приводит к снижению теплопритоков на 4,55–31,19 %.

Показано, что решением сравнительно задач можно прогнозировать изменение теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 113–122.
2. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергетики (обзор) / С.В. Алексеенко, В.Ю. Бородулин, Н.А. Гнатусь, М.И. Низовцев, Н.Н. Смирнова // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – № 1. – С. 1–16.
3. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электро-энергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бутузов, Г.В. Томазов, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // Теплоэнергетика. – 2022. – № 1. – С. 3–17.
4. Franco A., Vaccaro M. Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 30. – P. 987–1002.
5. Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review // Geothermics. – 2016. – № 60. – P. 66–93.
6. Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature // Journal of Building Engineering. – 2022. – № 48. – Article № 103932.
7. Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers // Geothermics. – 2022. – № 100. – Article № 102325.
8. Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group // Applied Thermal Engineering. – 2022. – № 200. – Article № 117673.
9. Morchio S., Fossa M., Beier R.A. Study on the best heat transfer rate in thermal response test experiments with coaxial and U-pipe borehole heat exchangers // Applied Thermal Engineering. – 2022. – № 200. – Article № 117621.
10. Comparative analysis of heat transfer performance of coaxial pipe and U-type deep borehole heat exchangers / W. Zhang, W. Li, B.R. Sørensen, P. Cui, Y. Man, M. Yu, Z. Fang // Geothermics. – 2021. – № 96. – Article № 102220.
11. Heat extraction study of a novel hydrothermal open-loop geothermal system in a multi-lateral horizontal well / G. Wang, X. Song, C. Yu, Y. Shi, G. Song, F. Xu, J. Ji, Z. Song // Energy. – 2022. – № 242. – Article № 122527.
12. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model for an enhanced geothermal system and numerical analysis of its heat mining performance / L. Zhou, Z. Zhu, X. Xie, Y. Hu // Renewable Energy. – 2022. – № 181. – P. 1440–1458.
13. Computational study of two-phase flashing flow in a calcite scaled geothermal wellbore / V. Chauhan, G. Saevarsdottir, Y.A. Tesfahunegn, E. Asbjornsson, M. Gudjonsdottir // Geothermics. – 2021. – № 97. – Article № 102239.
14. Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow / Y. Lou, P.-F. Fang, X.-Y. Xie, C.S.A. Chong, F.-Y. Li, C.-Y. Liu, Z.-J. Wang, D.-Y. Zhu // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2021. – № 28. – Article № 100257.
15. Heinze T. Constraining the heat transfer coefficient of rock fractures // Renewable Energy. – 2021. – № 177. – P. 433–447.
16. Experimental study of horizontal ground heat exchangers embedded in the backfilled mine stopes / Y. Zhao, L. Liu, D. Wen, B. Zhang, X. Zhang, C. Huan, M. Wang, X. Wang // Geothermics. – 2022. – № 100. – Article № 102344.
17. Field-scale experimental and numerical analysis of a downhole coaxial heat exchanger for geothermal energy production / S. Pokhrel, A.P. Sasmito, A. Sainoki, T. Toshi, T. Tanaka, C. Nagai, S.A. Ghoreishi-Madiseh // Renewable Energy. – 2022. – № 182. – P. 521–535.
18. Zhou Y., Zheng Z.-X., Zhao G.-S. Analytical models for heat transfer around a single ground heat exchanger in the presence of both horizontal and vertical groundwater flow considering a convective boundary condition // Energy. – 2022. – № 245. – Article № 123159.
19. Study on analytical solution model of heat transfer of ground heat exchanger in the protection engineering structure / J. Wang, J. Mao, X. Han, Y. Li // Renewable Energy. – 2021. – № 179. – C. 998–1008.
20. Study on heat transfer characteristics of the deep-buried ground heat exchanger under different multi-pipe layouts / C. Li, Y. Guan,

- C. Jiang, J. Wang, J. Shi, H. Cao // *Geothermics*. –2022. – № 100. – Article № 102343.
21. Numerical assessment on the thermal imbalance of multiple ground heat exchangers connected in parallel / F. Chen, J. Mao, G. Zhu, B. Zhang, Y. Tian, D. Liao, Y. Liu // *Geothermics*. – 2021. – № 96. – Article № 102191.
22. Висянович Ю.А., Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Оценка предельного пластового давления для парлифтной добычи флюида на Мутновском геотермальном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – S30. – С. 25–32.
23. Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. – 435 с.
24. 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.
25. Санду С.Ф. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в испарительно-конденсационных системах теплопередачи энергетических установок // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 60–63.

Поступила: 19.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 17.05.2023 г.

Информация об авторах

Половников В.Ю., доктор технических наук, профессор Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шелемехова С.Д., аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.91

REDUCTION OF HEAT GAINS TO GEOTHERMAL HEAT EXCHANGERS IN LONG-TERM OPERATION

Viacheslav Yu. Polovnikov¹,
polovnikov@tpu.ru

Sofia D. Shelemekhova¹,
shelemehovaaa@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the colossal energy potential of geothermal and petrothermal energy. It is designed to stimulate research and development in the field of geothermal technologies. The development of technologies for the use of geothermal and petrothermal energy in the Russian Federation is reduced by some circumstances. These main reducing factors are competition from traditional energy, problems with the legal framework and the lack of relevant areas of research and development. Currently, there is a backlog of Russia in the field of development of geothermal resources from the world level.

The main aim of the study is to evaluate the effect of condensation in the design of a geothermal heat exchanger on the change in heat inflows to it.

The object of the research is a typical design of a geothermal heat exchanger consisting of a metal pipeline and a cement casing.

Methods. Numerical analysis of heat and mass transfer was executed with rational values of the grid parameters and the time integration step. The assessment of the reliability of the results of the work was carried out by testing on the example of heat transfer problems, the numerical methods used and elements of the developed algorithms for solving boundary value problems of heat and mass transfer, checking the conservatism of difference schemes, and comparing with known data. The finite difference method and the implicit difference scheme were used. The peculiarity of problem solving was the discontinuity of the thermophysical characteristics at the contact boundaries between the layers and the presence of nonlinearity in the boundary condition.

Results. The authors have carried out the numerical study of the effect of steam condensation in the design of a geothermal heat exchanger on the reduction of heat inflows in the system under consideration. It was found that steam condensation leads to a decrease in heat gain by 4,55–31,19 %. It is shown that the use of relatively simple heat transfer models makes it possible to predict the change in heat inflows to a geothermal heat exchanger under conditions of steam condensation in its structure during long-term operation.

Key words:

geothermal energy, geothermal heat exchanger, mathematical modeling, heat gains, condensation.

The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-29-00464).

REFERENCES

- Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Current trends in the development of geothermal resources. *Geosursy*, 2020, vol. 22 (4), pp. 113–122. In Rus.
- Alekseenko S.V., Borodulin V.Yu., Gnatus N.A., Nizovtsev M.I., Smirnova N.N. Problems and outlooks for petrothermal power engineering (review). *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23 (1), pp. 1–16. In Rus.
- Butuzov V. A., Tomarov G. V., Alkhasov A. B., Aliev R. M., Badavov G. B. Geothermal energy of Russia: Resources, electric power generation, and heat supply (a review). *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69 (1), pp. 3–17. In Rus.
- Franco A., Vaccaro M. Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, no. 30, pp. 987–1002.
- Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, no. 60, pp. 66–93.
- Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature. *Journal of Building Engineering*, 2022, no. 48, article number 103932.
- Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers. *Geothermics*, 2022, no. 100, article number 102325.
- Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group. *Applied Thermal Engineering*, 2022, no. 200, article number 117673.
- Morchio S., Fossa M., Beier R.A. Study on the best heat transfer rate in thermal response test experiments with coaxial and U-pipe borehole heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2022, no. 200, article number 117621.
- Zhang W., Li W., Sørensen B.R., Cui P., Man Y., Yu M., Fang Z. Comparative analysis of heat transfer performance of coaxial pipe and U-type deep borehole heat exchangers. *Geothermics*, 2021, no. 96, article number 102220.
- Wang G., Song X., Yu C., Shi Y., Song G., Xu F., Ji J., Song Z. Heat extraction study of a novel hydrothermal open-loop geothermal system in a multi-lateral horizontal well. *Energy*, 2022, no. 242, article number 122529.
- Zhou L., Zhu Z., Xie X., Hu Y. Coupled thermal-hydraulic-mechanical model for an enhanced geothermal system and numerical analysis of its heat mining performance. *Renewable Energy*, 2022, no. 181, pp. 1440–1458.
- Chauhan V., Saevarsdottir G., Tesfahunegn Y.A., Asbjornsson E., Gudjonsdottir M. Computational study of two-phase flashing flow in a calcite scaled geothermal wellbore. *Geothermics*, 2021, no. 97, article number 102239.
- Lou Y., Fang P.-F., Xie X.-Y., Chong C.S.A., Li F.-Y., Liu C.-Y., Wang Z.-J., Zhu D.-Y. Numerical research on thermal response for geothermal energy pile groups under groundwater flow. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, no. 28, article number 100257.
- Heinze T. Constraining the heat transfer coefficient of rock fractures. *Renewable Energy*, 2021, no. 177, pp. 433–447.
- Zhao Y., Liu L., Wen D., Zhang B., Zhang X., Huan C., Wang M., Wang X. Experimental study of horizontal ground heat exchangers

- embedded in the backfilled mine stopes. *Geothermics*, 2022, no. 100, article number 102344.
17. Pokhrel S., Sasmito A.P., Sainoki A., Tosha T., Tanaka T., Nagai C., Ghoreishi-Madiseh S.A. Field-scale experimental and numerical analysis of a downhole coaxial heat exchanger for geothermal energy production. *Renewable Energy*, 2022, no. 182, pp. 521–535.
 18. Zhou Y., Zheng Z.-X., Zhao G.-S. Analytical models for heat transfer around a single ground heat exchanger in the presence of both horizontal and vertical groundwater flow considering a convective boundary condition. *Energy*, 2022, no. 245, article number 123159.
 19. Wang J., Mao J., Han X., Li Y. Study on analytical solution model of heat transfer of ground heat exchanger in the protection engineering structure. *Renewable Energy*, 2021, no. 179, pp. 998–1008.
 20. Li C., Guan Y., Jiang C., Wang J., Shi J., Cao H. Study on heat transfer characteristics of the deep-buried ground heat exchanger under different multi-pipe layouts. *Geothermics*, 2022, no. 100, article number 102343.
 21. Chen F., Mao J., Zhu G., Zhang B., Tian Y., Liao D., Liu Y. Numerical assessment on the thermal imbalance of multiple ground heat exchangers connected in parallel. *Geothermics*, 2021, no. 96, article number 102191.
 22. Vasyanovich Yu.A., Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Estimation of limiting reservoir pressure for steam-lift production of fluid at Mutnovsky geothermal field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, S 30, pp. 25–32. In Rus.
 23. Boguslavskii E.I. *Osvoenie teplovoy energii nedr* [Development of the thermal energy of the subsoil], Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 435 p.
 24. 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 Rus.
 25. Sandu S.F. Mathematical simulation of the processes of heat and mass transfer in evaporation-condensation heat transfer systems of power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 4, pp. 60–63. In Rus.

Received: 19 April 2023.

Reviewed: 17 May 2023.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Sofia D. Shelemekhova, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.