

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: CZATZA

УДК 620.91

Intensification of Heat Gain to Geothermal Heat Exchangers

Viacheslav Yu. Polovnikov*,
Sofia D. Shelemehova and Egor V. Lyubiviyj
*Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russian Federation*

Received 25.09.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 22.01.2024

Abstract. The need to ensure reliable thermal contact between the elements of geothermal heat exchangers and the environment leads to the use of a variety of backfills. Various materials are used as backfills. This could be ordinary cement or even materials with phase transitions. The use of advanced construction materials and materials with phase transitions significantly increases the high capital costs when constructing wells with geothermal heat exchangers. It is proposed to use a common and inexpensive material as backfill. This is moistened sand. The solution to the problem was obtained using the finite difference method. An implicit difference scheme and a special algorithm were used. The coordinate step was no more than 10 mm. The volumetric moisture content of the sand backfill varied from initial (5 %) to 25 %. It was limited by open porosity. The initial temperature, in the considered solution region, was taken to be equal to the temperature of the heated rocks 298.15–373.15 K. The temperature of the pumped energy carrier was 278.15 K. The work established that an increase in the humidity of the sand backfill leads to an increase in heat inflows by 4–12.5 %. The significant influence of the non-stationary processes of transfer and temperatures of hot rocks on the intensification of heat transfer in the system under consideration is shown.

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

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23–29–00464).

Citation: Polovnikov V. Yu., Shelemehova S. D., Lyubiviyj E. V. Intensification of heat gain to geothermal heat exchangers. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.*, 2024, 17(1), 14–22. EDN: CZATZA



Интенсификация теплоподвода к геотермальным теплообменникам

В. Ю. Половников, С. Д. Шелемехова, Е. В. Любивый
*Томский политехнический университет
Российская Федерация, Томск*

Аннотация. Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между элементами геотермальных теплообменников и окружающей средой приводит к использованию разнообразных засыпок. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента до материалов с фазовыми переходами. Применение перспективных строительных материалов и материалов с фазовыми переходами заметно повышает и без того существенные капитальные затраты при строительстве скважин с геотермальными теплообменниками. Предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Решение задачи получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял не более 10 мм. Объемная влажность песчаной засыпки варьировалась от начальной (5 %) до 25 % и была ограничена открытой пористостью. Начальная температура в рассматриваемой области решения принималась равной температуре разогретых пород 298,15–373,15 К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла 278,15 К. В работе установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки приводит к росту теплопритоков на 4–12,5 %. Показано существенное влияние нестационарности процессов переноса и температур горячих пород на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе.

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

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23–29–00464).

Цитирование: Половников В. Ю. Интенсификация теплоподвода к геотермальным теплообменникам / В. Ю. Половников, С. Д. Шелемехова, Е. В. Любивый // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(1). С. 14–22. EDN: CZATZA

Введение

Существует два базовых варианта извлечения геотермальной энергии для целей теплоснабжения. Первый заключается в непосредственном использовании геотермальных флюидов (горячая вода, водяной пар или их смесь) с последующей обратной закачкой охлажденного энергоносителя в пласт. Эта технология успешно реализована в ряде проектов и известна как геотермальная циркуляционная система [1]. Второй – это использование тепла горячих пород. В этом случае тепло отводится из недр земли через скважину, в которой установлено теплообменное оборудование [2].

Типичным теплообменным оборудованием, устанавливаемым в скважины, являются коаксиальные и U-образные геотермальные теплообменники [3], однако наиболее распространены первые. Конструктивно коаксиальный геотермальный теплообменник (КГТ) представляет собой традиционный теплообменник типа «труба в трубе», у которого внешний трубопровод изготовлен из металла, а внутренний – из полиэтилена высокой плотности. При этом обычно по кольцевому каналу энергоноситель течет вниз, а поднимается, соответственно, по внутренней трубе.

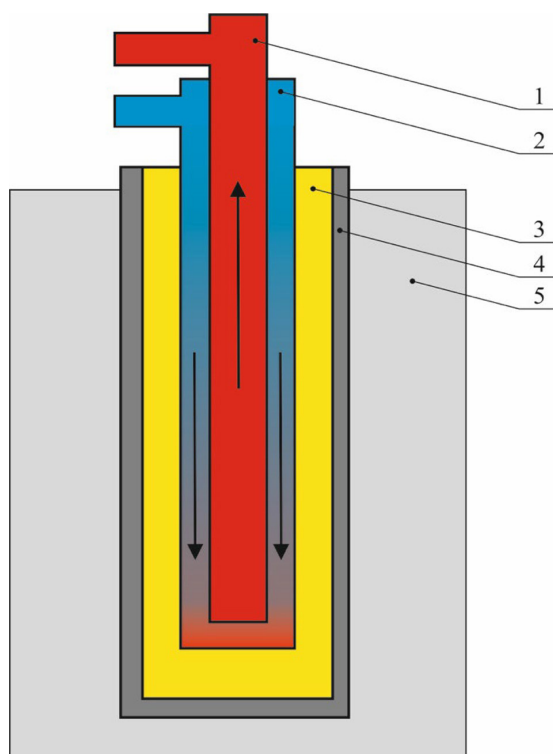


Рис. 1. Схема скважины с КГТ: 1 – внутренняя труба; 2 – наружная труба; 3 – засыпка; 4 – обсадная колонна; 5 – горячие породы

Fig. 1. Well diagram with a coaxial geothermal heat exchanger: 1 – inner pipe; 2 – outer pipe; 3 – backfill; 4 – casing; 5 – hot rock

На рис. 1 показано схематичное изображение скважины с установленным в нее коаксиальным геотермальным теплообменником.

В исследованиях [4–9], посвященных тепловым режимам скважин с КГТ, в рассматриваемых системах фиксируется достаточно широкий диапазон линейных плотностей теплового потока (60–300 Вт/м при глубине скважин 2000–3000 м). Такой разброс теплопритоков к КГТ объясняется в первую очередь различными температурами горячих пород и теплофизическими характеристиками исследуемых объектов.

Необходимость обеспечения надежного теплового контакта между КГТ и окружающей его средой приводит к использованию разнообразных засыпок (рис. 1). В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента [10] до материалов с фазовыми переходами [11].

Применение перспективных строительных материалов и материалов с фазовыми переходами заметно повышает и без того существенные капитальные затраты при строительстве скважин с геотермальными теплообменниками. В [12] было предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Также в [12] приведены данные по расчету теплофизических свойств увлажненного песка с учетом его плотности и объемной влажности.

Анализ научной литературы по исследуемой проблематике, например [4–12], показал, что влияние теплофизических свойств увлажненного песка, используемого в качестве засыпки

для скважин с геотермальными теплообменниками, на теплопритоки в настоящее время еще не оценено. Целью данной работы является исследование интенсификации теплоподвода к геотермальным теплообменникам и влияния влажности песчаной засыпки на теплопритоки в рассматриваемой системе.

Постановка задачи

Прототипом рассматриваемой конструкции геотермального теплообменника, установленного в скважине, является реальный КГТ, геометрические и физические параметры которого подробно описаны в [11]. Обсадная колонна, выполняющая в [11] роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а наружная труба КГТ из стали. На рис. 2 приведена схема области решения рассматриваемой задачи.

Предполагается, что до начала эксплуатации КГТ в рассматриваемой области решения (рис. 2) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени, отличный от нуля, через КГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. При этом предполагается, что на внутренней поверхности трубы устанавливается постоянная температура, равная температуре энергоносителя.

С учетом рассматриваемых факторов исследование влияния влажности песчаной засыпки на теплопритоки в конструкции КГТ сводится к решению нестационарной одномерной задачи теплопроводности в рассматриваемой области решения (рис. 2).

На границах R_1 и R_5 выставлялись граничные условия первого рода (температура равна температуре энергоносителя и горячих пород соответственно). Особенность постановки задачи состоит в учете зависимости теплофизических характеристик песчаной засыпки от объемного содержания влаги.

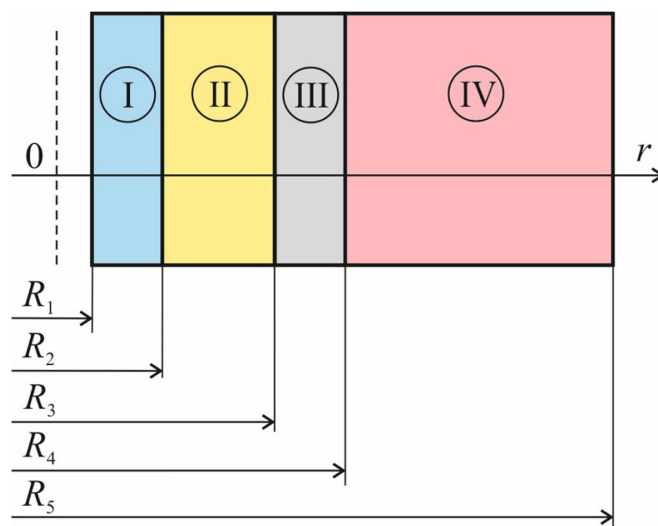


Рис. 2. Схема области решения: I – наружная труба КГТ; II – засыпка; III – обсадная колонна; IV – горячие породы

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

Задача решалась с учетом следующих основных допущений:

1. Теплофизические характеристики материалов, веществ и их компонентов являются постоянными и известными величинами.
2. Теплота в рассматриваемой системе передается только теплопроводностью.
3. В местах соприкосновения слоев (рис. 2) выполняются условия идеального теплового контакта.
4. Не рассматривается перенос тепла в энергоносителе, циркулирующем в КГТ, а также процессы массопереноса и фазовые переходы в засыпке и горячей породе (рис. 2).
5. Температура горячих пород имеет постоянное значение.

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы скважины с КГТ.

Математическая модель

С учетом принятых допущений система уравнений теплопроводности и соответствующие им краевые условия для рассматриваемой области решения (рис. 2) имеют следующий вид:

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r \leq R_5; c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} \right); i = I - IV; \quad (1)$$

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

$$\tau \geq 0, r = R_1; T_1 = T_{\text{in}} = \text{const}; \quad (3)$$

$$\tau \geq 0, r = R_{i,j}; \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial r}; T_i = T_j; i, j = 2 - 4; i \neq j; \quad (4)$$

$$\tau \geq 0, r = R_5; T_5 = T_{\text{ex}} = \text{const}. \quad (5)$$

Теплофизические свойства песчаной засыпки при известных плотности ρ и объемной влажности W вычислялись из следующих соотношений [12]:

$$\lambda_{\text{II}} = -1.337 + 0.00125\rho + 0.01W; \quad (6)$$

$$c_{\text{II}} = -0.018 + 0.0009\rho + 0.031W. \quad (7)$$

Обозначения: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; τ – время, с; R – граница области расчета, м; T – температура, К; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); r – координата, м; W – объемная влажность, %.

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2, 3, 4, 5 – номера границ областей расчета (рис. 2); in – внутренний; ex – наружный; I, II, III, IV – номера областей расчета (рис. 2).

Метод решения и исходные данные

Решение задачи (1)–(5) получено методом конечных разностей. Использовалась неявная разностная схема и алгоритм прогонки. Шаг по координате составлял не более 10 мм. Геометрические параметры ($R_1=0,05$ м; $R_2=0,055$ м; $R_3=0,14$ м; $R_4=0,25$ м; $R_5=10$ м) соответствовали конструкции скважины, описанной в [11]. Начальная температура T_0 в рассматриваемой области решения принималась равной температуре разогретых пород T_{ex} (298,15–373,15 К).

Табл. 1. Теплофизические характеристики

Table 1. Thermophysical characteristics

Свойство	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Труба	57,5	466	7860
Засыпка	Расчет по (6)	Расчет по (7)	1900
Цемент [11]	1,78	800	2490
Горячие породы [11]	1,3	775	1990

Температура прокачиваемого энергоносителя составляла $T_{in}=278,15$ К. Объемная влажность песчаной засыпки варьировалась от начальной ($W = 5\%$) до 25 % и была ограничена открытой пористостью.

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

Результаты численного моделирования

Результаты исследования тепловых режимов КГТ приведены в табл. 2–5 и на рис. 3. Исследования выполнены для 6 месяцев непрерывной работы КГТ. При анализе тепловых режимов рассматриваемой системы основное внимание уделялось влиянию объемной влажности песчаной засыпки W , нестационарности процессов теплопереноса и температуры разогретых пород T_{ex} на изменение теплопритоков к КГТ.

В табл. 2–5 в зависимости от T_{ex} , W и времени эксплуатации КГТ представлены результаты расчета теплопритоков в рассматриваемой системе. Изменение величин теплопритоков к КГТ свидетельствует об их ожидаемом росте с увеличением температуры разогретых пород T_{ex} и объемной влажности песчаной засыпки W и закономерном снижении с увеличением времени работы КГТ. Время эксплуатации КГТ (6 месяцев) выбрано исходя из соответствия типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

Анализ результатов (табл. 2–5) численного моделирования теплопритоков к КГТ позволяет сделать вывод об увеличении тепловых потоков в рассматриваемой системе в зависимости от температуры разогретых пород T_{ex} в 2,25 раза при увеличении T_{ex} с 298,15 К до 323,15

Табл. 2. Теплопритоки к КГТ при $T_{ex} = 298,15$ КTable 2. Heat inflow to the geothermal heat exchanger at $T_{ex} = 298.15$ K

Время, мес.	$W, \%$				
	5	10	15	20	25
0,03	107,47	110,99	114,43	117,77	121,03
1	42,58	43,11	43,60	44,07	44,51
3	37,35	37,76	38,14	38,50	38,84
6	34,68	35,04	35,37	35,68	35,97

Табл. 3. Теплопритоки к КГТ при $T_{ex} = 323,15$ КTable 3. Heat inflow to the geothermal heat exchanger at $T_{ex} = 323.15$ K

Время, мес.	$W, \%$				
	5	10	15	20	25
0,03	241,70	249,62	257,33	264,84	272,23
1	95,78	96,97	98,09	99,14	100,12
3	84,02	84,94	85,80	86,61	87,37
6	78,02	78,82	79,57	80,27	80,92

Табл. 4. Теплопритоки к КГТ при $T_{ex} = 348,15$ КTable 4. Heat inflow to the geothermal heat exchanger at $T_{ex} = 348.15$ K

Время, мес.	$W, \%$				
	5	10	15	20	25
0,03	376,34	388,71	400,72	412,45	424,85
1	148,79	150,59	152,37	154,00	155,53
3	130,94	132,38	133,73	135,00	136,18
6	121,58	122,83	124,00	125,09	126,11

Табл. 5. Теплопритоки к КГТ при $T_{ex} = 373,15$ КTable 5. Heat inflow to the geothermal heat exchanger at $T_{ex} = 373.15$ K

Время, мес.	$W, \%$				
	5	10	15	20	25
0,03	510,46	527,20	543,58	559,46	574,85
1	202,27	204,79	207,15	209,36	211,45
3	177,79	179,42	181,24	182,95	184,56
6	164,79	166,48	168,06	169,54	170,93

К. Дальнейший рост T_{ex} на 25 градусов приводит к повышению теплопритоков в 3,5 раза, а при максимальном, рассматриваемом в данной работе, значении температуры разогретых пород ($T_{ex} = 373,15$ К) превышение составляет около 4,8 раза.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса в рассматриваемой системе свидетельствует о её существенном влиянии на уровень теплопритоков к КГТ. За рассматриваемый период эксплуатации КГТ (6 месяцев) снижение теплопритоков во времени составляет более 300 % от первоначального уровня. Здесь следует отметить, что результаты моделирования указывают на резкое снижение тепловых потоков в первые дни работы КГТ (аналогичные выводы сделаны в [11] при исследовании материалов с фазовыми переходами). Это объясняется интенсивным охлаждением металлического корпуса КГТ (рис. 2) из-за его сравнительно высокой теплопроводности (табл. 1). Этот результат имеет конкретное практическое применение, поскольку позволяет обоснованно выбирать пути регулировки расхода энергоносителя для вы-

равнивания теплосъема от КГТ во времени. Для анализа этого фактора достаточно заменить граничное условие первого рода (3) на условие, описывающее интенсивность теплообмена между энергоносителем и корпусом КГТ (граничное условие третьего рода).

Исследование влияния влажности песчаной засыпки ($W = 5\text{--}25\%$) на теплопритоки в конструкции КГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков на $12,5\%$ в начальный период эксплуатации КГТ и до 4% к концу этого периода. 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 КГТ, 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.

Адекватность результатов численного моделирования следует из проверок используемых методов решения задачи (1)–(5) на сходимость и устойчивость, а также подтверждается численным сопоставлением с известными данными о работе геотермальных скважин с КГТ [4–9, 11]. В [4–9, 11] линейные плотности теплового потока составляют $60\text{--}300\text{ Вт/м}$, что хорошо согласуется с результатами данной работы (табл. 2–5).

На рис. 3 в качестве примера показаны распределения температур в рассматриваемой области решения (рис. 2) в различные моменты времени при температуре разогретых пород $T_{\text{ex}} = 373,15\text{ К}$ и объемной влажности песчаной засыпки $W = 25\%$.

Характер распределений температур в рассматриваемой области решения (рис. 2) позволяет говорить о том, что они соответствуют представлениям о процессах теплопереноса в твердых телах и отлично согласуются с исследованиями других авторов, например [11].

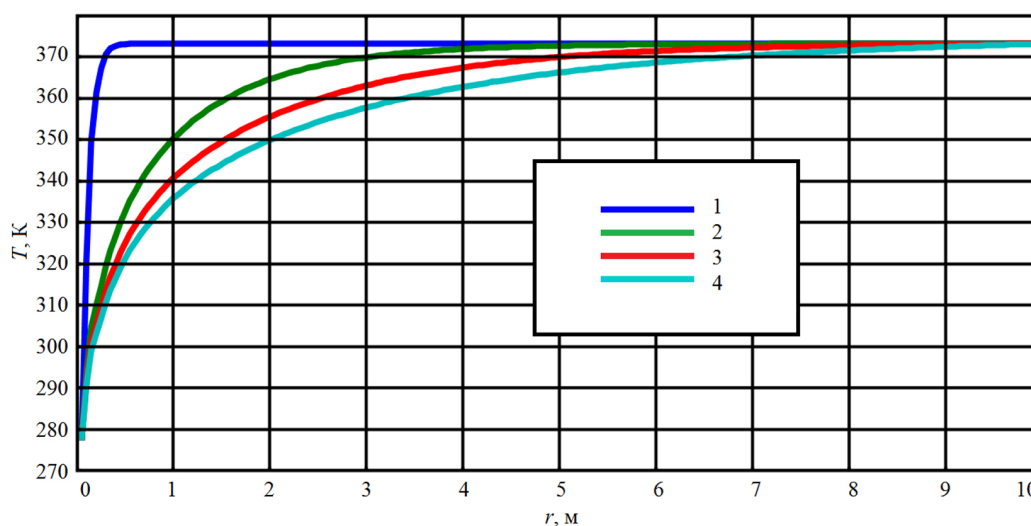


Рис. 3. Распределения температур в рассматриваемой области решения: 1–0,03 мес.; 2–1 мес.; 3–3 мес.; 4–6 мес.

Fig. 3. Temperature distributions in the considered solution region: 1–0.03 months; 2–1 month; 3–3 months; 4–6 months

Заключение

Проведено исследование влияния влажности песчаной засыпки на теплопритоки в конструкции КГТ.

Установлено, что увеличение влажности песчаной засыпки приводит к росту теплопритоков на 4–12,5 %.

Показано существенное влияние нестационарности процессов переноса и температур горячих пород на интенсификацию теплообмена в рассматриваемой системе.

Список литературы / References

[1] Черкасов С. В., Фархутдинов А. М., Шаипов А. А. Об эффекте остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы теплоотбора. *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*, 2020, 491(1), 90–92 [Cherkasov S. V., Farhutdinov A. M., Shaipov A. A. The Residual Flow Effect in a Geothermal Loop, *Doklady Physics*, 2020, 65, 128–130].

[2] Cui P., Yang W., Zhang W., Zhu K., Spittle J. D., Yu M. Advances in ground heat exchangers for space heating and cooling: Review and perspectives, *Energy and Built Environment*, 2024, 5, 255–269.

[3] 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, 96, 102220.

[4] Wang Z. H., Wang F. H., Liu J. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system, *Energy Convers. Manag.*, 2017, 153, 603–615.

[5] Deng J. W., Wei Q. P., Liang M. Field test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs), *Energy Build.*, 2019, 184, 289–299.

[6] Bu X. B., Ran Y. M., Zhang D. D. Experimental and simulation studies of geothermal single well for building heating, *Renew. Energy*, 2019, 143, 1902–1909.

[7] Nian Y. L., Cheng W. L., Yang X. Y. Simulation of a novel deep ground source heat pump system using abandoned oil wells with coaxial BHE, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2019, 137, 400–412.

[8] Zhang F. F., Yu M. Z., Sorensen B. R. Heat extraction capacity and its attenuation of deep borehole heat exchanger array, *Energy*, 2022, 254, 124430.

[9] Cai W. L., Wang F. H., Jiang J. H. Long-term performance evaluation and economic analysis for deep borehole heat exchanger heating system in weihe basin, *Front. Earth Sci.*, 2022, 10, 806416.

[10] Park H., Lee S.-R., Yoon S. Jung-Chan Choi Evaluation of thermal response and performance of PHC energy pile: Field experiments and numerical simulation, *Applied Energy*, 2013, 103, 12–24.

[11] 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 184, 374–390.

[12] Журмилова И. А., Штым А. С. Теплофизические свойства увлажненного песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками, *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*, 2017, 2, 100–109. [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: School of Engineering Bulletin*, 2017, 2, 100–109 (in Rus.)].