

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ziganshin A., Solodova E., Logachev K. Numerical simulation of a z-shaped ventilation elbow and reduction of its resistance // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 890. – P. 012146. – DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012146.
2. Зиганшин А.М., Озеров А.О., Солодова Е.Э. Численное исследование течения в П-образном отводе и снижение его сопротивления // Известия вузов. Строительство. – 2019. – Т. 721, № 1. – С. 82–93. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-721-1-82-93.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
4. CFD-based fluid device resistance calculation method. 李京浩, 闫大强, 陈纲, 丁炜堃, 陈义学 (Li Tszinkhao, Yan Datsyan, Chen Gan, Din Veykun', Chen Isyue). Patent China CN107808021B. 2021-06-15 Publication

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРИТОКОВ К ГЕОТЕРМАЛЬНОМУ ТЕПЛООБМЕННИКУ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ИСПАРЕНИЯ В ЕГО ЗАСЫПКЕ

С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый, Д.Д. Смоляков

Томский политехнический университет,
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова

Научный руководитель: В.Ю. Половников, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В исследованиях [1–3], посвященных тепловым режимам скважин с коаксиальными геотермальными теплообменниками (КГТ), фиксируется достаточно широкий диапазон линейных плотностей теплового потока (60–300 Вт/м при глубине скважин 2000–3000 м). Такой разброс теплопритоков к КГТ объясняется 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. В качестве засыпок используются различные материалы: от обычного цемента [4] до материалов с фазовыми переходами [5]. В [6] было предложено использовать в качестве засыпки распространенный и недорогой материал – увлажненный песок. Целью данной работы является исследование интенсификации теплоподвода к геотермальным теплообменникам.

Прототипом рассматриваемой конструкции КГТ установленного в скважине является реальный объект, геометрические и физические параметры которого подробно описаны в [5]. Обсадная колонна, выполняющая в [5] роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а наружная труба КГТ из стали. На рис. 1 приведена схема области решения рассматриваемой задачи.

Предполагается, что до начала эксплуатации КГТ в рассматриваемой области решения (рис. 1) поддерживается постоянная температура, равная температуре горячих пород. В момент времени

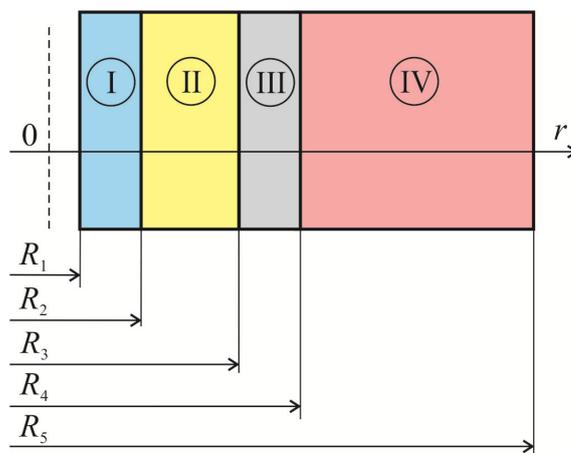


Рис. 1. Схема области решения:
I – наружная труба КГТ; II – засыпка;
III – обсадная колонна; IV – горячие породы

отличный от нуля через КГТ начинает прокачиваться энергоноситель, температура которого ниже, чем начальная температура в области решения. При этом предполагается, что на внутренней наружной трубы КГТ устанавливается постоянная температура, равная температуре энергоносителя, а на границе контакта между увлажненной засыпкой и обсадной колонной реализуется процесс испарения влаги.

Постановка задачи и метод решения аналогичны описанным в [7]. Теплопроводность (λ) и теплоемкость (c) песчаной засыпки, при известной плотности (ρ) и объемной влажности (W), вычислялись из следующих соотношений [6]:

$$\lambda = -1.337 + 0.00125\rho + 0.01 W; \quad (1)$$

$$c = -0.018 + 0.0009\rho + 0.031 W. \quad (2)$$

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 [5]. Начальная температура, в рассматриваемой области решения, принималась равной температуре разогретых пород 373,15 К. Температура прокачиваемого энергоносителя составляла 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.

Таблица 1. Теплофизические характеристики

Свойство	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Труба	57,5	466	7860
Засыпка	Расчет по (1)	Расчет по (2)	1900
Цемент [5]	1,78	800	2490
Горячие породы [5]	1,3	775	1990

В табл. 2 и 3 в зависимости от W и времени эксплуатации КГТ представлены результаты расчета теплопритоков в рассматриваемой системе с учетом и без учета эффекта испарения влаги в засыпке КГТ. Изменение величин теплопритоков к КГТ свидетельствуют об их ожидаемом росте с увеличением объемной влажности песчаной засыпки W и закономерном снижении с увеличением времени работы КГТ. Время эксплуатации КГТ (6 месяцев) выбрано исходя из типичной для РФ продолжительности отопительного периода.

Таблица 2. Теплопритоки к КГТ с учетом испарения

Время, мес.	$W = 5$ %	$W = 10$ %	$W = 15$ %	$W = 20$ %	$W = 25$ %
0,03	541,77	558,59	575,05	591,00	606,47
1	237,67	240,28	242,73	245,02	247,19
3	213,55	215,26	217,16	218,95	220,63
6	200,73	202,50	204,16	205,71	207,17

Таблица 3. Теплопритоки к КГТ без учета испарения

Время, мес.	$W = 5$ %	$W = 10$ %	$W = 15$ %	$W = 20$ %	$W = 25$ %
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

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 около 200 % от первоначального уровня. Здесь следует отметить, что результаты моделиро-

вания указывают на резкое снижение тепловых потоков в первые дни работы КГТ (аналогичные выводы сделаны в [5] 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 выравнивания теплосъема от КГТ во времени.

Исследование влияния влажности песчаной засыпки ($W = 5\text{--}25\%$) на теплопритоки в конструкции КГТ позволило сделать вывод об увеличении теплопритоков на 12,0 % в начальный период эксплуатации КГТ и до 3,5 % к концу этого периода. Более высокий рост теплопритоков в начальный промежуток времени объясняется тем же обстоятельствами что и при анализе нестационарности процессов переноса в рассматриваемой системе. Учет наличия испарения влаги в засыпке КГТ приводит к заметному увеличению тепловых потоков в рассматриваемой системе. Сопоставление результатов численного моделирования (табл. 2 и 3) свидетельствует о том, что испарение влаги приводит к росту теплоподвода к КГТ на 21,2–21,8 %. Адекватность результатов численного моделирования подтверждается численным сопоставлением с известными данными о работе геотермальных скважин с КГТ [1–5]. В [1–5] линейные плотности теплового потока составляют 60–300 Вт/м, что хорошо согласуется с результатами данной работы (табл. 2 и 3).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 / Z.H. Wang, F.H. Wang, J. Liu // *Energy Convers. Manag.* – 2017. – Vol. 153. – P. 603–615.
2. Field test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs) / J.W. Deng, Q.P. Wei, M. Liang // *Energy Build.* – 2019. – Vol. 184. – P. 289–299.
3. Experimental and simulation studies of geothermal single well for building heating / X.B. Bu, Y.M. Ran, D.D. Zhang // *Renew. Energy.* – 2019. – Vol. 143. – P. 1902–1909.
4. Evaluation of thermal response and performance of PHE energy pile: Field experiments and numerical simulation / H. Park, S. Lee, S. Yoon, J. Choi // *Applied Energy.* – 2013. – Vol. 103. – P. 12–24.
5. 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 // *Renew. Energy.* – 2022. – Vol. 184. – P. 374–390.
6. Теплофизические свойства увлажненного песка – наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками / И.А. Журмилова, А.С. Штым // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета.* – 2017. – No. 2 (31). – С. 100–109.
7. Снижение теплопритоков к геотермальным теплообменникам в условиях длительной эксплуатации / В.Ю. Половников, С.Д. Шелемехова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2023. – Т. 334. – No 9. – С. 18–24.