

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

В.Ю. Половников

*Томский политехнический университет, Томск, Россия
polovnikov@tpu.ru*

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 теплопритоке 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

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

Viacheslav Yu. Polovnikov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

It has been established that an increase in the humidity of the sand backfill of a geothermal heat exchanger leads to an increase in heat inflows by 3.2–7.8%. A significant influence of the unsteadiness of transfer processes on the intensification of heat transfer in the system under consideration was revealed. It has been 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

Введение

Отдельной областью в сфере моделирования геотермальных технологий является исследование 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 до материалов с фазовыми переходами. Однако использование этих материалов 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. Использование увлажненного песка в качестве засыпки для ГТ неизбежно будет связано с наличием фазовых переходов и изменением механизмов теплопереноса в конструкции геотермального теплообменника.

Постановка задачи

Прототипом рассматриваемой конструкции ГТ является реальный объект, геометрические и физические параметры которого описаны в (Сао *et. al.*, 2022). Обсадная колонна, выполняющая роль несущей конструкции, выполнена из высокопрочного бетона, а кольцевой канал ГТ из стали. На рис. 2 приведена схема области решения.

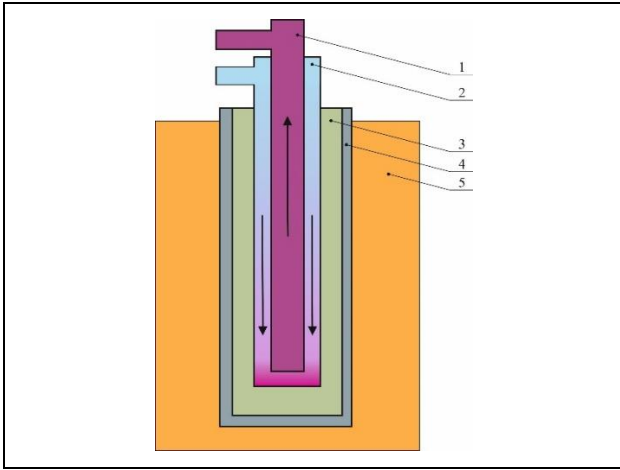


Рисунок 1 – Схема скважины с ГТ:
 1 – внутренняя труба; 2 – кольцевой канал;
 3 – засыпка; 4 – обсадная колонна;
 5 – горячие породы

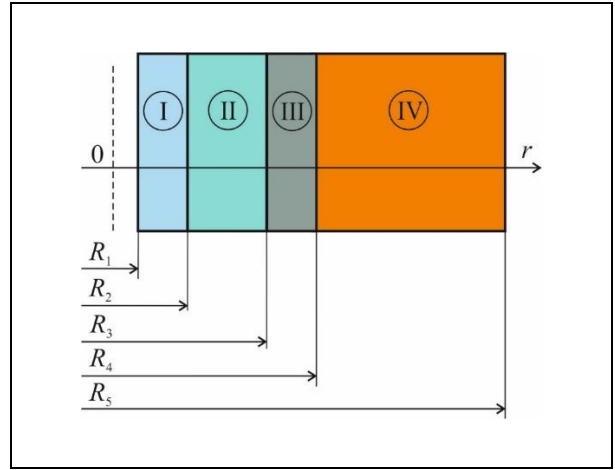


Рисунок 2 – Схема области решения:
 I – внешняя труба кольцевого канала ГТ;
 II – засыпка; III – обсадная колонна;
 IV – горячие породы

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).

Математическая модель

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

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

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

$$\tau > 0, r = R_1; \alpha(T_{r=R_1} - T_{in}) = -\lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial r}; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \lambda_I \frac{\partial T_I}{\partial r} = \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial r} + Jq; T_I = T_{II}; \quad (4)$$

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

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

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

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

$$\lambda_{II} = -1.337 + 0.00125\rho + 0.01 W; \quad (8)$$

$$c_{II} = -0.018 + 0.0009\rho + 0.031 W. \quad (9)$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи в канале кольцевого поперечного сечения использовалось уравнение:

$$Nu = 0,017 Re^{0.8} Pr_e^{0.4} \left(\frac{Pr_e}{Pr_w}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0.18}, \quad (10)$$

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

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

$$a = \frac{0.059}{P_s^{0.5}}; \quad J = \frac{a(P_s - P_p)}{\left(\frac{2\pi R_g T}{M}\right)^{0.5}}; \quad q = 2500.64 - 2.369T|_{r=R_2}. \quad (11)$$

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; Nu, Re, 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; 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. 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 (Cao et al., 2022), а $R_5=10$ м. Внешний и внутренний диаметры кольцевого канала составляли: $d_2=2 \cdot R_1$; $d_1=0.06$ м. Начальная температура T_0 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%. Расход энергоносителя задавался от 0.004 до 0.04 м³/с. Теплофизические характеристики, использовавшиеся при проведении моделирования, приведены в табл.

Таблица. Теплофизические характеристики

Характеристика	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Кольцевой канал	57.5	466	7860
Засыпка	Расчет по (8)	Расчет по (9)	1900
Цемент	1.78	800	2490
Горячие породы	1.3	775	1990

Результаты численного моделирования

Рис. 3 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 свидетельствуют 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 , сопровождающимся 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.

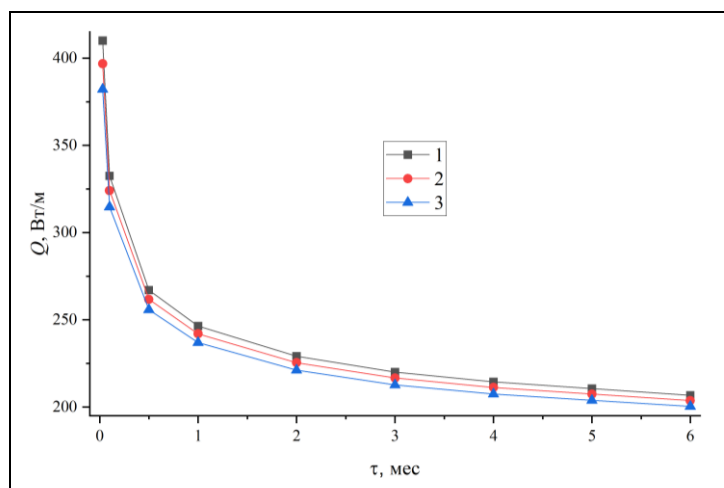


Рисунок 3 – Снижение теплопритоков к ГТ:
1 – $W = 25\%$; 2 – $W = 15\%$; 3 – $W = 5\%$

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. 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. Анализ влияния интенсивности теплоотдачи в кольцевом канале на изменение теплопритоков к ГТ позволяет сделать вывод о незначительном росте тепловых потерь в рассматриваемой системе (около 1–2.5%). Это объясняется достаточно быстрым установлением постоянной температуры на внешней трубе кольцевого канала ГТ. 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 . Анализ 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.

Работа выполнена при поддержке РНФ по проекту 23-29-00464

Список литературы

1. Cao Z. 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. V. 184. P. 374–390. DOI: 10.1016/j.renene.2021.11.100.