УДК 536.1

Учет неравномерности температурного поля в геотермальной скважине теплового насоса

В. А. КРЫЛОВ¹, В. А. ЧЕРНООЗЕРСКИЙ², канд. техн. наук А. А. НИКИТИН³ д-р техн. наук И. В. БАРАНОВ⁴

¹supa_hero@mail.ru, ²darth1vader6@gmail.com, ³andyquest@mail.ru, ⁴barigor@mail.ru Университет ИТМО 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В данной статье рассматриваются температурные поля геотермальной скважины теплового насоса. При проектирование теплонасосных систем используются методики расчета геотермальных скважин с равномерным по всей длине скважины температурным полем. Общепринятые физические представления о распределении температурных полей в технических системах позволяют предположить, что распределение температуры в геотермальной скважине теплового насоса не будет являться равномерным. Для проверки данного предположения была разработана трехмерная параметрическая модель экспериментального стенда при помощи модуля Flow Simulation программного комплекса SolidWorks. Использование модуля Flow Simulation позволило на базе созданной модели экспериментального стенда и на основе метода конечных элементов осуществить расчет распределения температурных полей в модулируемой скважине. Построенная численная модель показала, что температурное поле не является равномерным. Результаты проведенных исследований позволяют судить о том, что существующие методики расчета имеют недостатки, в связи с этим существует необходимость разработки новой методики расчета геотермальных теплообменников, позволяющую учитывать неравномерность температурного поля и тем самым повышать эффективность работы теплового насоса.

Ключевые слова: тепловой насос, температурное поле, экспериментальный стенд, теплопроводность.

Non-uniformity of geothermal well heat pump temperature field

V. A. KRYLOV¹, V. A. CHERNOOZERSKY², *Ph. D.* A. A. NIKITIN³, *D. Sc.* I. V. BARANOV⁴ ¹supa_hero@mail.ru, ²darth1vader6@gmail.com, ³andyquest@mail.ru, ⁴barigor@mail.ru *ITMO University 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

The article deals with temperature field of heat pump geothermal well. In designing heat pump systems calculation methods of geothermal wells with temperature filed uniform along the well length are used. Common physical notions about thermal field distribution in technical systems allow assuming temperature distribution in heat pump geothermal well to be of non-uniform character. To verify it three dimensional parametric model of test stand was developed by Flow Simulation module of the SolidWorks software. It allows calculating temperature field distribution in a simulated well on the basis of the model and finite element method. The numerical model obtained shows the non-uniformity of the temperature field. The research shows some disadvantages of the exiting calculation methods. Then, new calculation method for geothermal heat exchangers taking into account temperature filed non-uniformity and, therefore, increasing heat pump efficiency should be developed.

Keywords: heat pump, temperature field, test stand, thermal conductivity.

Введение

На сегодняшний день постоянное истощение ископаемого топлива, а также рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из глобальных мировых проблем. Одним из решений данной проблемы является использование низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли.

В качестве устройства переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю с более высокой температурой) используется тепловой насос.

Рассмотрим один из основных элементов теплонасосной системы — систему сбора низкопотенциального тепла (систему теплосбора). В качестве такой системы используется геотермальный теплообменник.

Геотермальные теплообменники, применяемые в тепловых насосах, бывают двух видов:

- горизонтальные;
- вертикальные.

Горизонтальные теплообменники наиболее подвержены влиянию сезонных и суточных изменений интенсивности солнечной радиации, температуры наружного воздуха и выпадающих осадков, так как глубина их залегания 1,2– 1,5 м. Вертикальные теплообменники располагаются на глубине порядка 10–100 м, что существенно ниже «нейтральной зоны», и практически не зависят от сезонных, а тем более суточных изменений параметров наружного климата [1].

В дальнейшем речь будет идти о вертикальных *U*-образных грунтовых теплообменниках, схематический вид которых показан на рис. 1.

На сегодняшний день производители теплонасосных систем рекомендуют принимать величину удельного теплового потока с одного погонного метра скважины в диапазоне от 20 до 150 Вт/пм. [2–4]

Такой большой разброс опубликованных данных различных исследователей говорит о сложности моделирования процессов, связанных с отбором тепла из грунта, отсутствии моделей, адекватно описывающих физические процессы, протекающие в системах теплосбора, и, соответственно, об отсутствии корректных методик проектирования геотермальных теплонасосных систем и определения рациональных параметров систем сбора низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоев Земли.

Получение более точных величин удельного теплового поката является весьма актуальной на сегодняшний день проблемой, так как этот параметр напрямую влияет на технико-экономические показатели теплообменника.

Для решения данной задачи была разработана трехмерная параметрическая модель экспериментального стенда при помощи модуля *Flow Simulation* программного комплекса *SolidWorks*.

Использование модуля Flow Simulation позволило на базе созданной модели экспериментального стенда и на основе метода конечных элементов осуществить расчет распределения температурных полей в модулируемой скважине.

Моделирование температурных полей в системах с грунтовым теплообменником

Для решения задач, связанных с нахождением температурного поля, необходимо иметь дифференциальное уравнение теплопроводности. Это уравнение теплопроводности дает зависимость между температурой временем и координатами элементарного объема. В общем случае уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c\rho} w(r, z, \theta, \tau),$$
(1)

где $T = T(x, y, z, \tau)$ — температура, °C; $c\rho$ — объемная теплоемкость, Дж/(°C·м³); λ — теплопроводность, Вт/(м·°C); τ — время, с; w — объемная плотность мощности внутреннего теплового источника, Вт/м³; r — радиус-вектор в цилиндрической системе координат; θ — полярный угол [5].

Грунтовый теплообменник представляет собой осе-

симметричный цилиндр, поэтому оператор $\frac{\partial}{\partial \theta}$ тождественно равен нулю и уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial} = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c\rho} w(r, z, \tau).$$
(2)

На сегодняшний день, при моделировании и расчете температурных полей в системах с грунтовым теплообменником, используется уравнение теплопроводности,

в котором оператор $\frac{\partial}{\partial z}$ тождественно равен нулю. [6, 7] Такое уравнение имеет вид (3)

$$\frac{\partial T}{\partial} = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{c\rho} w(r, z, \tau).$$
(3)

Графическое распределение теплового потока при расчетах с использование уравнения (3) показано на рис. 2.



Рис. 1. Вертикальный U-образный грунтовый теплообменник: D — диаметр скважины; L — глубина скважины



Рис. 2. Распределение теплового потока, используемое при расчетах геотермальных теплообменников

76

77

В действительности температурное поле в грун-

те не будет однородным, следовательно, оператор $\frac{\partial}{\partial z}$ не равен нулю и расчетным уравнением будет являться уравнение (2).

Графическое распределение теплового потока при расчете с использованием уравнения (2) показано на рис. 3.

Для проверки распределения температурных полей в грунте была разработана экспериментальная лабораторная модель, которая представляет собой *U*-образный теплообменник, помещенный в цилиндрический резервуар, засыпанный грунтом (рис. 4) [8].

Осесимметричный

цилиндр 📉



$$A - A$$



Рис. 3. Распределение теплового потока, используемое при расчетах геотермальных теплообменников



Рис. 4. Экспериментальная модель скважины

В дальнейшем данная модель численно моделировалась, и был произведен расчет распределения температурных полей в системе грунтовый теплообменник–грунт.

Численное моделирование распределения температурных полей в системах с геотермальными теплообменниками

На основании разработанной экспериментальной лабораторной модели построена трехмерная параметрическая модель. Моделирование осуществлялось при помощи модуля *Flow Simulation* программного комплекса *SolidWorks* [9].

Внешний вид трехмерной модели показан на рис. 5.

В качестве материала теплообменника была выбрана медная труба. Корпус резервуара выполнен из стали. В качестве наполнителя использовался песок, а теплоноситель представляет собой 36% раствор этиленгликоля. Теплофизические свойства песка и этиленгликоля представлены в табл. 1, 2.



Рис. 5. Трехмерная модель

Таблица 1

Теплофизические свойства песка, плотность 2976 кг/м³, начальная температура 20 °C [1]

Температура раствора <i>t</i> , °С	Теплоемкость, <i>Ср</i> , Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	
-17,5	760	1,75	
-10	1065	1,49	
-5	1512	1	
-2,5	3300	4	
0	6890	1,25	
5	1685	1	
15	1190	1	

Таблииа 2

Температура раствора <i>t</i> , °С	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, C_p , Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Динамическая вязкость, ×10 ⁻³ H·c /м ²	Кинематическая вязкость, ×10 ⁻⁶ м ² /c
-20	1069	3510	0,462	11,76	11
0	1063	3560	0,466	4,89	4,6
20	1055	3620	0,47	2,32	2,2

Теплофизические свойства 36% водного раствора этиленгликоля, температура кристаллизации –20 °С [5]

Также были заданы следующие начальные условия:

- температура теплоносителя на входе -13 °C,
- скорость потока $\omega = 0.5 \,\mathrm{m/c}$;
- режим течения ламинарный;
- давления потока на выходе 0,5 кгс/см²;
- температура грунта 20 °C;
- теплообмена с внешней средой нет.

Далее, с использованием дополнительного модуля *Flow Simulation*, был произведен расчет экспериментальной модели скважины.

Условием завершение опыта служило снижение средней температуры стенки бочки с 20 °С до –13 °С.

Время опыта составило 71500 с, данные сохранялись каждые 60 с.

Результаты опыта представлены на рис. 7.

На рис. 8 показана расстановка датчиков для измерения температуры грунта, расстояние между датчиками по оси *X* — 2 см, по оси *Y* — 10 см. Так же два датчика установлены в трубе на входе и выходе соответственно.

Также были получены результаты в виде зависимости температуры от времени, которые представлены на рис. 9. каждая кривая описывает изменение температуры соответствующей точки рис. 8.

Из рис. 9 видно, что температурное поле имеет нелинейную и неравномерную по высоте численной модели зависимость.



Рис. 7. Результаты опыта: а — время опыта 60 с; б — время опыта 36000 с; в — время опыта 71500 с



Рис. 8. Расстановка датчиков для измерения температуры грунта и теплоносителя



Рис. 9. График изменения температуры с течением времени

Результаты численного эксперимента

Использование модуля *Flow Simulation* позволило на базе созданной экспериментальной лабораторной модели и на основе метода конечных элементов осуществить расчет распределения температурных полей в грунте.

По результатам расчета было установлено, что температурное поле в грунте по высоте распределятся неравномерно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в расчетах геотермальных теплообменников следует учитывать неравномерное распределение температурного поля по глубине скважины.

Для учета неравномерности температурного поля и влияния этой неравномерности на эффективность работы теплового насоса на основании экспериментальной модели был изготовлен лабораторный стенд, показанный на рис. 10.

Для определения теплофизических характеристик грунтов, используемых в лабораторном стенде, в межфакультетской учебной лаборатории был разработан автоматизированный прибор ИТ-*с*λ*а* [11]. Основу работы прибора составляет динамический метод нагрева охлаждения образцов, хорошо зарекомендовавший себя при изучении тепловых свойств влагосодержащих материалов [12, 13].

В дальнейшем планируется разработка методики, учитывающей неравномерность распределения температурного поля в грунте и его теплофизические характеристики, и апробация ее на созданном лабораторном стенде. Полученную методику целесообразно будет использовать при проектировании геотермального теплообменника. Учет распределения температурных полей и теплофизических характеристик грунтов позволит оптимизировать как конструктивный, так и техникоэкономический расчет геотермальных теплообменников для тепловых насосов.



Рис. 10. Лабораторный стенд

Список литературы

- II Всероссийский конгресс молодых ученых. 9–12 апреля 2013, Электронный сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Вып. 4. Теплофизическое приборостроение. Теоретические основы тепло- и хладотехники. с. 10
- Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: монография. — М.: Издательский дом «Граница», 2006. 176 с.
- VIESSMAN, инструкция по проектированию. Vitocal 300/350, тепловые насосные установки.
- Karl Ochsner: Geothermal Heat Pumps. A Guide for Planning and Installing, First published by Earthscan in the UK and USA in 2007, 67 p.
- Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва: издво «Высшая школа», 1967.
- Штым А. С., Маркелова И. А. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Стр-во и архит. 2011. Вып. 23 (42). С. 126–133.
- Oppelt, T., Riehl, I., Gross, U. (2010). Modelling of the borehole filling of double U-pipe heat exchangers. Geothermics, 39 (3), p. 270–276.
- Крылов В. А., Никитин А. А., Черноозерский В. А. Экспериментальный стенд для исследования распределения теплового потока в грунте // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. Вып. 4.
- Крылов В. А., Никитин А. А., Черноозерский В. А. Численное моделирование распределения тепловых потоков в системах с геотермальными теплообменниками //Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. Вып. 4.
- 10. *Рей Д., Макмайкл Д.* Тепловые насосы: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
- Платунов Е. С., Баранов И. В., Куслиева (Тамбулатова) Е. В. Автоматизированный прибор для измерений теплофизических характеристик влагосодержащих материалов // Вестник МАХ. 2009. № 3.
- Баранов И. В., Никитин А. А. Комплексные измерения теплофизических характеристик влагосодержащих материалов при замораживании и размораживании. // Вестник Международной академии холода. 2007. № 1. С. 24–27.
- Тамбулатова Е. В., Платунов Е. С., Баранов И. В. Результаты исследований теплофизических свойств водных растворов сахарозы // Вестник Международной академии холода. 2010. № 3. С. 42–47.

References

- II All-Russian congress of young scientists. On April 9–12, 2013, Electronic collection of theses of reports of the congress of young scientists. *Warm and physical instrument making. Theoretical bases warm and hladotekhnik.* Vol. 4. P. 10. (in Russian)
- Vasilyev G. P. Heatcold supply of buildings and constructions with use of low-potential thermal energy of blankets of Earth. Monograph. Moscow, 2006. 176 p. (in Russian)
- 3. VIESSMAN, instruction on design. Vitocal 300/350, thermal pumping installations. (in Russian)
- 4. Karl Ochsner. Geothermal Heat Pumps. *A Guide for Planning and Installing*, First published by Earthscan in the UK and USA in 2007, 67 p.

- 5. Lykov A. V. Theory of heat conduction. Moscow, 1967. (in Russian)
- Shtym A. S., Markelova I. A. Systems of heatcollection for geothermal thermal pumps. *Vestnik VolgGASU. Seriya: Str-vo i arkhit.* 2011. Vol. 23 (42). p. 126–133. (in Russian)
- Oppelt, T., Riehl, I., Gross, U. (2010). Modelling of the borehole filling of double U-pipe heat exchangers. *Geothermics*, 39 (3), p. 270–276.
- Krylov V. A., Nikitin A. A., Chernoozersky V. A. The experimental bench for research of distribution of a heat flux in soil, the Collection of theses of reports of the congress of young scientists. St. Petersburg: NIU ITMO, 2014. Vol. 4. (in Russian)
- Krylov V. A., Nikitin A. A., Chernoozersky V. A. Numerical modeling of distribution of heat fluxes in systems with geothermal heat exchangers, the Collection of theses of reports of the

congress of young scientists. St. Petersburg: NIU ITMO, 2014. Vol. 4. (in Russian)

- 10. Rei D., Makmaikl D. Thermal pumps. Moscow: Energoizdat, 1982. 224 p.
- 11. Platunov E. S., Baranov I. V., Kuslieva E. V. Automatic instrument for measuring thermal physical characteristics of moisture containing materials. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2009. No 3. (in Russian)
- Baranov I. V., Nikitin A. A. Complex measurements of heatphysical characteristics of the moisture containing materials when freezing and defrosting. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2007. No 1. p. 24–27. (in Russian)
- Tambulatova E. V., Platunov E. S., Baranov I. V. Results of research of thermal physical properties of sucrose aqueous solutions. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2010. No 3. p. 42–47. (in Russian)

