

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ТЕПЛОВОМУ ТЕСТУ СКВАЖИН

Г.Я.Волов, к.т.н., директор ОДО “Энергогент”

**В статье “Моделирование работы вертикальных грунтовых теплообменников в тёплый и холодный периоды (основы методики)” в “ЭиМ” №4 за 2010 год автором был предложен подход к проектированию вертикальных грунтовых теплообменников (ВГТ) теплососных установок (ТНУ) с применением методов математического моделирования [1]. Там же сообщалось о необходимых свойствах грунта, которые требуются для построения математической модели. В Европе и США широко внедряется метод проектирования, основанный не на знании этих свойств, а на анализе результатов теплового теста скважины [2]. В настоящей статье рассматривается применение результатов теста при моделировании работы ВГТ.**

В последнее время автору довелось участвовать в нескольких проектах, связанных с применением грунтовых тепловых насосов (ТН, которые предназначены для отбора теплоты грунта) с ВГТ. В связи с отсутствием вспомогательных материалов по проектированию таких систем возникла необходимость в анализе опыта, накопленного за рубежом. Наибольшую трудность при проектировании ТНУ с ВГТ представляют как определение

свойств грунта (плотность, теплопроводность и теплоёмкость), так и учёт влияния на теплообмен между грунтом и трубками ВГТ мигрирующей влаги. Её расход, как и параметры грунта, на стадии проектирования определять достаточно сложно и дорого. В странах с широким распространением ТНУ с ВГТ специально для проектировщиков составлены карты геологического строения Земли по районам на глубину до 150 м, которые позволяют довольно быстро находить требуемые параметры грунта. Вопросы теплообмена при миграции влаги недостаточно изучены не только у нас в стране, но и за рубежом, что значительно осложняет процесс проектирования. Для комплексного решения поставленной задачи начиная с 1995 года [3] стали проводиться тепловые тесты скважины (thermal response test — TRT) с помощью мобильных лабораторий, которые позволяют определять комплексные характеристики грунта, включающие в себя как его теплофизические параметры, так и учёт влияния теплообмена за счёт миграции влаги. Такой тест даёт возможность установить эффективную теплопроводность грунта  $\lambda_{eff}$ , учитывающую как собственную теплопроводность, так и конвективный теплообмен между грунтом и влагой.

На рис. 1 [3] приведена схема мобильной установки по проведению теста ВГТ (обсадные трубы условно не показаны). Установка состоит из циркуляционного насоса, электрического нагревателя

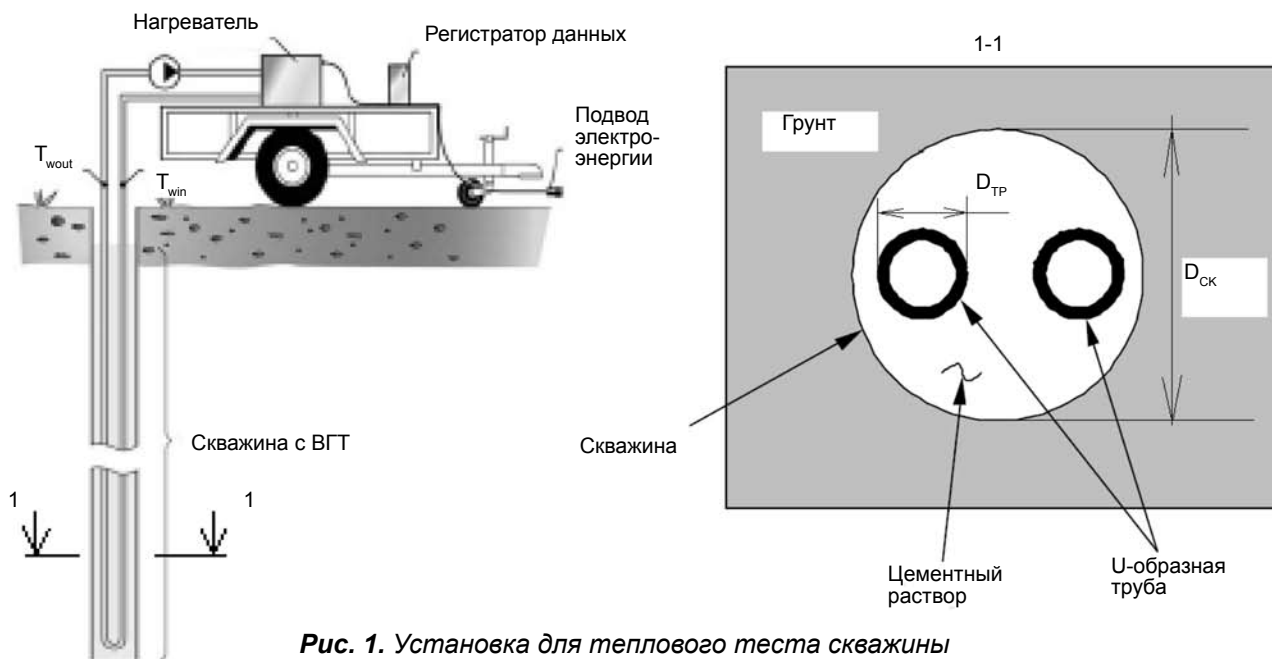


Рис. 1. Установка для теплового теста скважины

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3												
4										Средняя разница температур		
5		Наклон		Мощ	длина	W/m	Теплопроводность	Температ	Температура обратки	Температура породы		
6		k		W	m			[°C]	[°C]	[°C]		
7			1,8394	4995	100	49,9	2,161261	17,6	13,1	11,6		
13	0	12 10 2010 20:00	0			0,8004	0,0448	9,1	9,1	0		
14	0,25	12 10 2010 20:15	15			0,8178	-0,0685	9,1	9,2	0,1		
15	0,5	12 10 2010 20:30	30			0,8454	4,8799	10	15,1	5,2		
16	0,75	12 10 2010 20:45	45			0,8244	4,8235	11	16,1	5,1		
17	1	12 10 2010 21:00	60			0,8434	4,9765	11,6	16,8	5,2		
18	1,25	12 10 2010 21:15	75			0,8339	5,0143	12,2	17,2	5		
19	1,5	12 10 2010 21:30	90			0,8335	5,0359	12,5	17,6	5,1		
20	1,75	12 10 2010 21:45	105			0,8089	4,9868	12,8	18	5,2		
21	2	12 10 2010 22:00	120			0,818	5,0782	13,1	18,3	5,2		
22	2,25	12 10 2010 22:15	135			0,8263	5,0693	13,2	18,7	5,5		
23	2,5	12 10 2010 22:30	150			0,8506	5,044	13,5	18,8	5,3		
24	2,75	12 10 2010 22:45	165			0,8984	5,1852	13,8	18,8	5		
25	3	12 10 2010 23:00	180			0,9024	5,1343	14	19	5		
26	3,25	12 10 2010 23:15	195			0,9415	5,2044	14,3	19	4,7		

Рис. 2. Пример распечатки результатов теплового теста скважины

и регистратора динамически меняющихся данных (расход, температуры входного и выходного потоков, наружного воздуха и невозмущённого грунта, а также мощность электронагревателя). Во время теста через ВГТ циркулирует вода, к которой подаётся в нагревателе постоянное количество энергии. Такой тест длится не менее 50 часов.

Впервые в Беларуси при проектировании ТНУ с ВГТ в областной больнице в Несвиже выполнен тепловой тест скважины, который проводился параллельно с процессом проектирования. Результаты теста представлены в таблице Excel (рис. 2) и на графике (рис. 3). Тест длился 140 часов (8400 минут) и осуществлялся с помощью передвижной установки немецкого производства. При анализе графиков хорошо видно: начиная с 6000 минут после начала теста температура воды, подаваемой в ВГТ, практически перестаёт расти, хотя при чистой теплопроводности такого быть не может [3]. Это указывает на то, что имеется значительная фильтрация воды через грунт, и теплообмен в нём обусловлен не одной его теплопроводностью.

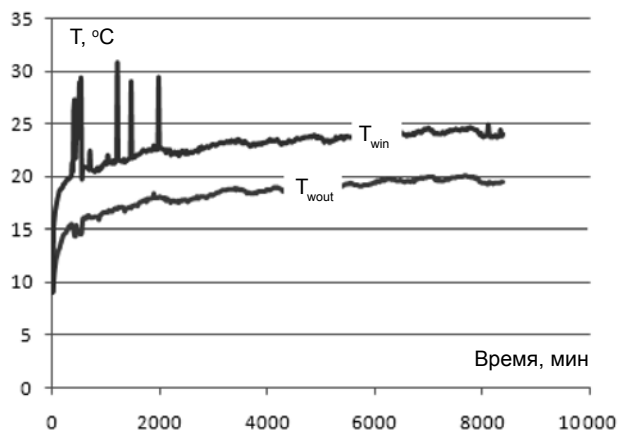


Рис. 3. График изменения температур входа и выхода ВГТ во время теплового теста

Скорость фильтрации воды в грунте невелика — 0–10<sup>-5</sup> м/с (0–63 м/год), однако, несмотря на это, такая фильтрация значительно влияет на теплообмен и, соответственно, на результаты теста. На рис. 4 [3] приведены температуры воды на выходе из скважины (результаты получены на численных моделях) в условиях нулевой фильтрации (чистая теплопроводность) и фильтрации со скоростью 10<sup>-6</sup> м/с. Из графика следует, что после начала теста температура циркулирующей воды из скважины (или в скважину) очень быстро стала постоянной. Чем меньше скорость фильтрации, тем позже температура становится постоянной.

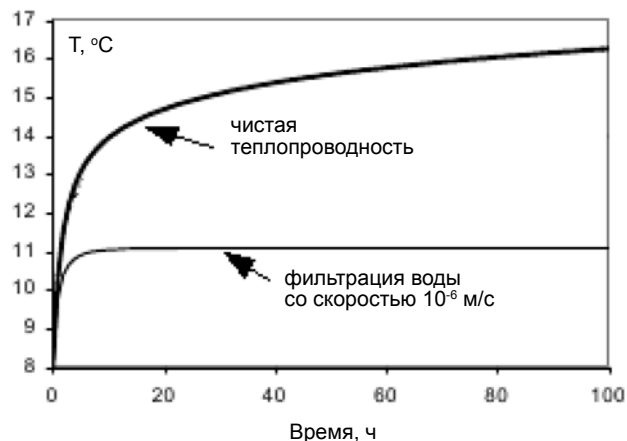


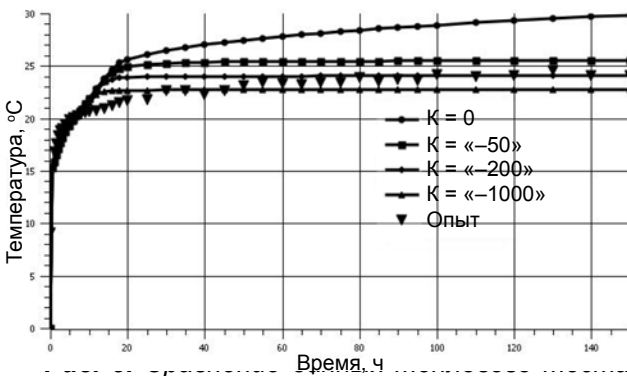
Рис. 4. Графики температуры теплоносителя на выходе из ВГТ [3]

Переход от теста к прогнозированию в удалённом будущем работы скважины ВГТ представляет тему настоящей статьи. Описанная в [1] модель была скорректирована с учётом дополнительных теплоступлений от мигрирующей воды:

$$\Sigma Q = \Sigma Q_t + K \cdot (T - T_s) \cdot \Delta V,$$

Отметим, что наличие обсадных труб учитывалось в математической модели лишь как непроницаемая для мигрирующей воды поверхность.

Понятно, что случай, когда  $K = 0$ , может быть только в условиях чистой теплопроводности. Определить же действительное значение  $K$  возможно выполнив моделирование теплового теста ВГТ с различными значениями  $K$  и наложив значения из экспериментального теста на полученные теоретические. Обратим внимание, что мы ещё не знаем теплопроводность грунта, поэтому нам придётся довериться его параметрам, полученным из справочников, либо экспериментально получить их, исследовав породу, поднятую при бурении. В настоящем конкретном случае физические характеристики грунта приняты исходя из справочных данных: влажный песок  $C_p = 2000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ ;  $\lambda_{\text{гс}} = 2,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ . На рис. 5 представлены графики изменения температуры воды на входе в скважину в модельных тестах (в программе “МОДЭН”) при значениях  $K = 0$ ;  $-50$ ;  $-200$  и  $-1000$  в сравнении с экспериментом. Видно, что результаты натурных исследований лучше всего совпадают с результатом модельного теста при  $K = -200$  спустя 80 часов с его начала. Именно это значение  $K$  и легло в основу последующих расчётов на модели. Температура грунта  $T_g = 10,5^\circ\text{C}$ . Она определялась экспериментально на той же тестовой установке путём замера температуры циркулирующего теплоносителя при выключенном нагревателе.



ВГТ, полученных экспериментально и на компьютерной модели

Для определения максимальной мощности, которую может выдать скважина, был проведён компьютерный эксперимент в программе “МОДЭН” (версия 3.22). В основе модельных экспериментов концептуально лежит тезис о том, что тепловые ресурсы грунта должны быть возобновляемыми [1]. Исходные данные соответствовали описанным выше, отличие состояло в том, что теплоносителем в контуре ВГТ являлся 20-процентный раствор пропиленгликоля, а не вода, как в тесте. Температуру

после испарителя ТН разрешено опускать не ниже  $-5^\circ\text{C}$ , максимальный расход через скважину —  $0,46 \text{ кг/с}$ . Период проведения компьютерного эксперимента равен трём отопительным сезонам по 6 месяцев каждый. Температура наружного воздуха меняется в соответствии с графиком, заложенным в базу программы “МОДЭН” для данной местности.

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 6 и 7. На рис. 6 — график максимальной удельной тепловой мощности скважины. Видно, что она падает с начала отопительного сезона (с 70 до 50 Вт/м). В межотопительный сезон происходит восстановление тепловых свойств грунта, причём чем больше скорость фильтрации воды — тем быстрее это восстановление. На рис. 7 — график показаний тепловой энергии по теплосчётчику, установленному на ВГТ. За три отопительных сезона со скважины можно получить 63,7 Гкал тепловой энергии (соответственно по сезонам 22,5; 21; 20).

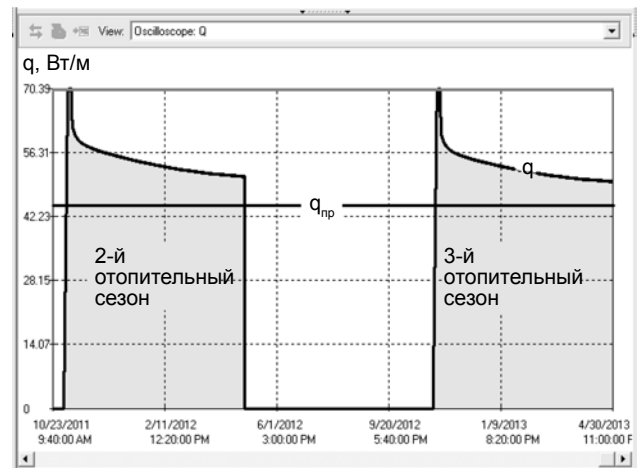
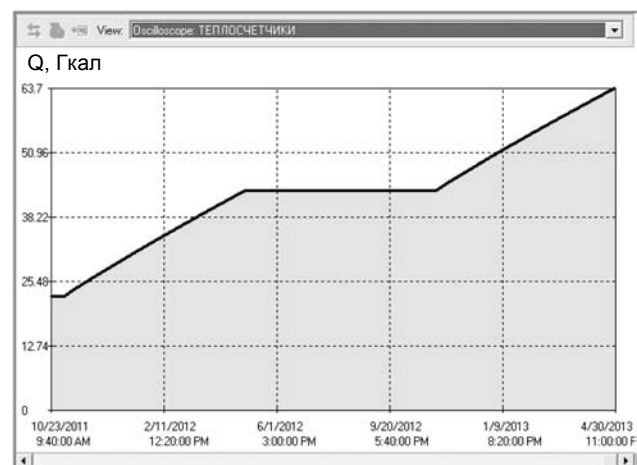


Рис. 6. График изменения максимальной удельной тепловой мощности скважины во 2-м и 3-м отопительных сезонах



от одиночной скважины по результатам моделирования

Исходя из изложенного и принимая во внимание,

что процесс проектирования обычно предшествует началу работ на строительной площадке, можно сформировать последовательность действий при проектировании теплонасосных систем с ВГТ.

Шаг 1. Предварительно на основании прошлого опыта, справочных данных или исследований соседних скважин принимаем состав, свойства и параметры грунта той местности, где будут размещены скважины ВГТ.

Шаг 2. Проводим компьютерное моделирование работы одной скважины за выбранный период (обычно от 3 до 5 лет). Определяем её расчётную удельную тепловую мощность.

Шаг 3. Исходя из требуемой тепловой мощности теплоисточника определяем количество скважин под ВГТ и с его учётом разрабатываем проектную документацию.

Шаг 4. Во время реализации проекта монтажная организация выполняет тепловой тест скважины и отбирает образцы грунта для анализа его свойств. С учётом полученных результатов проводим тепловой тест грунта на модели и определяем как эффективную теплопроводность грунта, так и коэффициент  $K$  при наличии миграционной влаги.

Шаг 5. Производим повторный компьютерный расчёт модели, уточняя расчётную удельную тепловую мощность скважины и, соответственно, количество скважин. При необходимости корректируем проектную документацию.

Избежать корректировки проекта и повторного моделирования можно, если проводить тепловой тест скважины на этапе проектирования, что, естественно, приведёт к удорожанию самого этапа проектирования, но окупится на последующих стадиях реализации проекта.

### ВЫВОДЫ

1. Проведение тепловых тестов скважин меняет технологию проектирования ТНУ с ВГТ и делает возможным анализ его работы в грунтах, в которых наблюдается миграция влаги.

2. Предложен подход с использованием методов математического моделирования (в рамках программы “МОДЭН”), позволяющий провести модельный тепловой тест ВГТ, адекватный натурному, и получить при этом характеристики грунта для их дальнейшего использования при проектировании.

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $D_{тр}$  — наружный диаметр трубопровода ВГТ, м;  
 $D_{ск}$  — внутренний диаметр скважины для ВГТ, м;  
 $K$  — коэффициент, зависящий от скорости фильтрации воды, Вт/(м<sup>3</sup> · °С);  
 $\Sigma Q$  — поступление тепловой энергии в объём грунта  $\Delta V$ , Вт;  
 $\Sigma Q_T$  — поступление тепловой энергии в объём  $\Delta V$  за счёт теплопроводности, Вт;  
 $q$  — удельная тепловая мощность ВГТ, Вт/м;  
 $q_{np}$  — удельная тепловая мощность скважины, принятая при проектировании, Вт;  
 $T_{win}$  — температура воды на входе в ВГТ при тепловом тесте, °С;  
 $T_{wout}$  — температура воды на выходе из ВГТ при тепловом тесте, °С;  
 $T$  — температура объёма  $\Delta V$ , °С;  
 $T_s$  — температура невозмущённого грунта, °С;  
 $\Delta V$  — объём грунта конечного элемента в математической модели, м<sup>3</sup>;  
 $\lambda_{es}$  — теплопроводность невозмущённого грунта, Вт/(м · °С);  
 $\lambda_{eff}$  — эффективная теплопроводность невозмущённого грунта, Вт/(м · °С);  
 $Cp = 2000$  — теплоёмкость грунта в компьютерном эксперименте, Дж/(кг · °С);  
 $\rho = 1200$  — плотность грунта в компьютерном эксперименте, кг/м<sup>3</sup>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Волон Г.Я. Моделирование работы вертикальных грунтовых теплообменников в теплый и холодный периоды (основы методики) // Энергия и Менеджмент. — 2010. — №4. — С. 21–23.
2. Sanner B., Hellstrom G., Spitler J., Gehlin S. Thermal Response Test — Current Status and World-Wide Application. — Proceedings World Geothermal Congress, 2005, Antalya, Turkey, 24–29, April, 2005.
3. Gehlin G. Thermal response test. Method development and Evaluation — Doctoral thesis, 2002.

**P.S.** В статье [1] сообщалось о развенчании мифа о том, что если закачивать тепловую энергию в грунт в теплый период, то в холодный период из грунта можно получить больше тепловой энергии. Увы, миф оказался живее, чем представлялось автору. В расчёты вкралась ошибка, за которую автор приносит свои извинения.