

Аналитические и экспериментальные исследования по определению эффективной разницы температур теплообменных скважин с коаксиальным коллектором

И.А. Страупник

Введение

Среди возобновляемых естественных источников тепловой энергии низко потенциальная тепловая энергия различного происхождения (атмосферный воздух, поверхностные водоемы, верхние толщи горных пород и подземные воды, а также приуроченные к ним коллекторы тепло- и водоснабжения, сточные воды и пр.) в настоящее время, благодаря технологии использования тепловых насосов (далее ТН), находит все более широкое применение в отоплении и кондиционирования объектов гражданского и промышленного назначения. Наиболее универсальным, экологически чистым и повсеместно доступным источником низко потенциальной энергии является тепло горных пород и подземных вод верхней части земной коры [1].

Тепло Земли, имеющее генетическую и пространственную связь добываемой полезной энергии с недрами и возможность извлечения лишь с использованием горных выработок, в частности буровыми скважинами, является своеобразным полезным ископаемым, которое требует особого подхода в его разведке и разработке.

Для доставки низко потенциальной энергии горного массива к тепловым насосам сооружаются специальные теплообменные скважины (далее ТС), которые оборудуются циркуляционными системами (теплообменными коллекторами) различной конструкции, наиболее же эффективной является коаксиальный коллектор [2]. В общем объеме тепловой энергии, производимой по технологии ТН, затраты электроэнергии на работу циркуляционных теплообменных систем и тепловых насосов не превышают 25-30%, все остальное – трансформированное низко потенциальное тепло горного массива.

Основными характеристиками эксплуатируемой и проектируемой ТС являются ее геометрические параметры (диаметр и глубина, размеры коллектора), а также эффективная разница температур. Эффективной разницей температур называется разность между температурами теплоносителя на выходе из теплообменного коллектора и на его входе. На практике эта величина варьирует от 2 до 8°C, чем она выше, тем эффективнее работает ТН. В связи со всем выше сказанным, исследования направленные на определение эффективной разницы температур являются актуальными.

Аналитические исследования

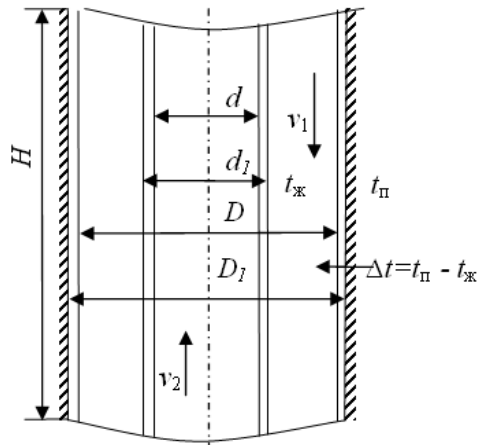
Рассмотрим участок ТС длиной H , оснащенной коаксиальным коллектором, на котором происходит активный теплообмен (рис.1). В качестве теплоносителя будет использоваться техническая вода. Двигаясь вниз по кольцевому сечению со скоростью v_1 , теплоноситель будет нагреваться за счет тепловой энергии, передаваемой от массива горных пород. В центральном круглом канале теплоноситель будет двигаться вверх со скоростью v_2 , получая небольшую долю тепла от потока в кольцевом канале. Таким образом, при условии, что температура теплоносителя $t_{ж}$ ниже, чем температура пород $t_{п}$ на всей глубине, в коаксиальном коллекторе не будут происходить потери тепловой энергии.

Удельная мощность теплового потока к теплоносителю в кольцевом канале коллектора на 1 м длины рассчитывается следующим образом [3]:

$$q = k_{\tau} \pi D (t_{п} - t_{ж}), \quad (1)$$

где q – удельная мощность теплового потока, Вт/м; k_{τ} – коэффициент нестационарности теплового потока, Вт/(м²·К); D – диаметр ТС, м; $t_{ж}$ – температура теплоносителя на

рассматриваемой глубине, К; t_{Π} – температура горных пород на рассматриваемой глубине, К.



H – длина участка скважины,
 D_1 и D – наружный и внутренний диаметры внешней трубы,
 d_1 и d – наружный и внутренний диаметры полиэтиленовой трубки,
 v_1 и v_2 – скорости нисходящего и восходящего потоков,
 t_{Π} и $t_{ж}$ – температура пород и теплоносителя в кольцевом канале;
 Δt – температурный напор между стенкой скважины и потоком теплоносителя.

Рис. 1. – Схема участка скважинной коаксиальной циркуляционной системы

Перейдем к дифференциальному уравнению, используя следующие замены:

$$q = \frac{dQ}{dh} = Gc \frac{dt_{ж}}{dh}; \quad (2)$$

$$t_{\Pi} = T_0 + \gamma h, \quad (3)$$

где Q – мощность теплового потока, Вт; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); h – текущая глубина скважины, м; T_0 – температура пород «нейтрального» слоя, К; γ – геотермический градиент, К/м. В дальнейшем толщиной стенки наружной стенки будем пренебрегать и считать, что $D \approx D_1$. После преобразований с учетом (2) и (3) уравнение (1) преобразуется в следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dt_{ж}}{dh} + \frac{k_{\tau} \pi D}{Gc} t_{ж} = \frac{k_{\tau} \pi D}{Gc} (T_0 + \gamma h). \quad (4)$$

Решением (4) является следующий интеграл:

$$t_{ж} = T_0 + \frac{\gamma Gc}{k_{\tau} \pi D} \left(\frac{k_{\tau} \pi D}{Gc} h - 1 \right) + C e^{-\frac{k_{\tau} \pi D}{Gc} h}. \quad (5)$$

Постоянную интегрирования C определим из начального условия, полагая, что на устье скважины, т.е. на глубине $h=0$, температура теплоносителя равна начальной температуре – t_{Π} , определяемой режимом работы ТН. Тогда постоянная интегрирования определяется следующим выражением:

$$C = t_{\Pi} - T_0 + \frac{\gamma Gc}{k_{\tau} \pi D}. \quad (6)$$

С учетом интеграла (5) и значения постоянной интегрирования (6), определим разницу температур теплоносителя в конце и начале кольцевого канала:

$$\Delta T = T_0 + \gamma H - \frac{\gamma Gc}{k_{\tau} \pi D} + t_{\Pi} \left(e^{-\frac{k_{\tau} \pi D H}{Gc}} - 1 \right) + \left(\frac{\gamma Gc}{k_{\tau} \pi D} - T_0 \right) e^{-\frac{k_{\tau} \pi D H}{Gc}}, \quad (7)$$

где ΔT – разница температур теплоносителя в конце и начале кольцевого канала коаксиального коллектора, К; H – глубина ТС, м

В работе [4] проводилось исследование влияния теплофизических свойств материала внутренней трубки на эффективность отбора тепловой энергии. Рассматривались несколько вариантов: два массива горных пород с теплопроводностью ($\lambda_{\text{П}}$) 1,4 Вт/(м·К) и 2,8 Вт/(м·К), соответственно. Также рассматривались три вида материалов со следующими теплопроводностями ($\lambda_{\text{Т}}$): 0,35 Вт/(м·К), 0,24 Вт/(м·К) и 0. После моделирования всех рассматриваемых вариантов в скважине глубиной 20 м были получены следующие результаты (см. табл. 1).

Таблица № 1

Тепловая энергия, полученная от теплообменной скважины за различные промежутки времени, МДж

Время	$\lambda_{\text{П}}=1,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$			$\lambda_{\text{П}}=2,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$		
	$\lambda_{\text{Т}}=0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{Т}}=0,24 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{Т}}=0$	$\lambda_{\text{Т}}=0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{Т}}=0,24 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{Т}}=0$
	вариант 1	вариант 2		вариант 3	вариант 4	
300 с	0,50	0,51	0,52	0,62	0,63	0,64
900 с	1,40	1,41	1,42	1,80	1,81	1,83
3600 с	4,28	4,29	4,31	5,94	5,95	6,00
6 ч	17,50	17,50	17,60	25,00	26,50	26,70
24 ч	54,20	54,30	54,50	86,10	86,30	86,90

Поделим значения тепловой энергии для случаев с первыми двумя трубками (варианты 1...4) на значения для случаев абсолютно теплоизолированной трубки ($\lambda_{\text{Т}}=0$) и представим результаты в графическом виде (рис.2).

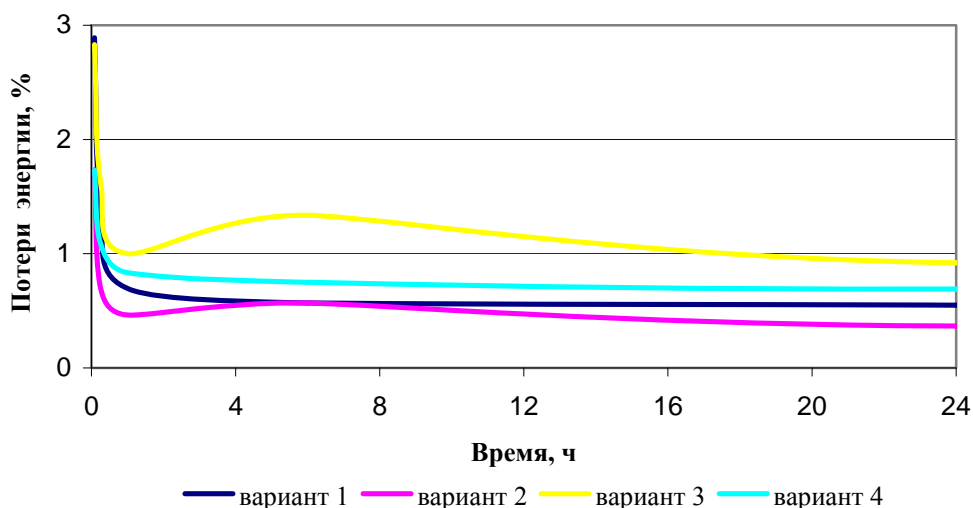


Рис. 2. – Потери тепловой энергии во внутренней трубке коаксиального коллектора

Согласно данным представленным на графике выше, в течение суток эксплуатации теплообменной скважины, что на практике бывает редко, потери тепловой энергии во внутренней трубке коаксиального теплообменника не превысят 1,5% большую часть времени. Если предположить, что потери тепловой энергии будут увеличиваться прямо пропорционально глубине скважины, то на каждые 10 м глубины скважины они будут составлять не более 0,75%. Таким образом, для расчета эффективной разницы температур на выходе и входе в коаксиальный теплообменный коллектор можно пользоваться

формулой (7), внося следующую поправку на потери во внутренней трубке, при условии, что она выполнена из пластика:

$$k_{II} = 1 - 0,75 \cdot 10^{-3} H, \quad (8)$$

где k_{II} – безразмерный поправочный коэффициент, учитывающий потери тепла во внутренней трубке.

Окончательная формула для расчета эффективной разницы температур для коаксиального теплообменного коллектора выглядит следующим образом:

$$\Delta T_{эф} = k_{II} \left[T_0 + \gamma H - \frac{\gamma Gc}{k_r \pi D} + t_H \left(e^{\frac{k_r \pi D H}{Gc}} - 1 \right) + \left(\frac{\gamma Gc}{k_r \pi D} - T_0 \right) e^{-\frac{k_r \pi D H}{Gc}} \right]. \quad (9)$$

Экспериментальные исследования

Целью эксперимента является уточнение полученной теоретической зависимости (9), с помощью стенда оборудованного в лаборатории кафедры Бурения скважин НМСУ «Горный» [3]. Основой экспериментального стенда (рис. 3) является скважина глубиной 9,5 м, №4, закрепленная колонной обсадных труб диаметром 127/118 мм. Скважина является моделью интервала коаксиальной циркуляционной теплообменной системы с погружным забойным насосом вибрационного типа БВ-0,12-40-У5 – №5б, опущенным в призабойную зону на гибком полиэтиленовом шланге диаметром 20/14 мм – №3б и нагнетающим теплоноситель в емкость – №1б. В качестве циркуляционной среды – теплоносителя использовалась техническая вода с температурой от 2,2 до 3,2°C. Вода подавалась к устью скважины по входящей ветви полиэтиленового шланга из емкости – №1а погружным насосом – №5а. Мощность и максимальный развиваемый напор насосов, одинаковые и составляли 245 Вт и 40 м, соответственно.

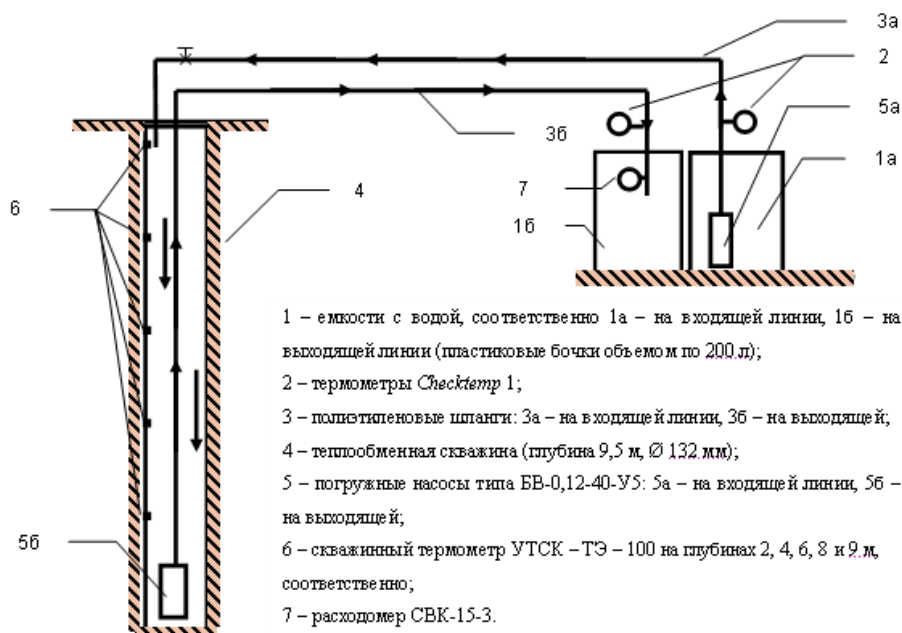


Рис. 3. – Схема экспериментального стенда

Расход теплоносителя измерялся крыльчатый расходомером СВК-15-3 №7, который в среднем составил 14 л/мин или $2,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ с незначительными колебаниями во времени.

Температура измеряется в 7 точках:

- на входе и выходе из циркуляционной системы, с помощью термометра *Checktemp 1* с погрешностью измерения $0,1^{\circ}\text{C}$ №2;
- в скважине – в наружном кольцевом канале коаксиального теплообменного контура на глубинах 2, 4, 6, 8 и 9 м, с помощью скважинного термометра – уровнемера УТСК – ТЭ – 100 с погрешностью измерения также $0,1^{\circ}\text{C}$ №6.

Естественное температурное поле в скважине измерялось с помощью уровнемера УТСК – ТЭ – 10 до и после испытаний, отмеченные колебания температуры незначительны и не превышали $0,1 \dots 0,2^{\circ}\text{C}$ (рис.4).

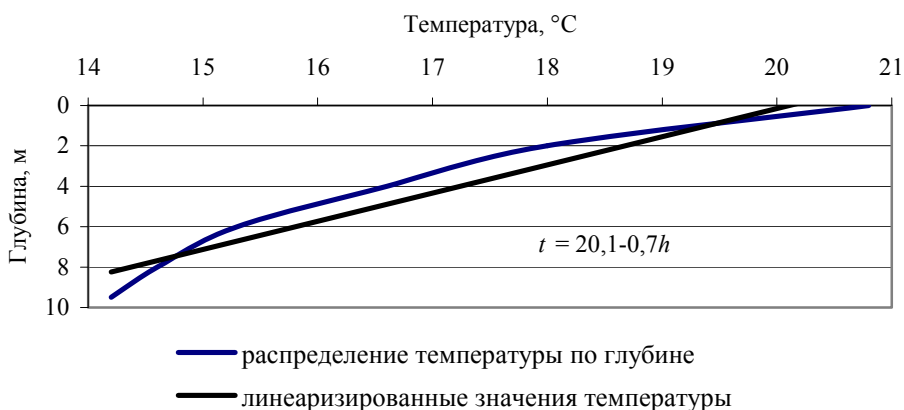


Рис. 4. – Начальное и линейаризованное температурное поле в экспериментальной скважине

Особенности распределения температуры по глубине скважины отражают характер теплового взаимодействия приповерхностной части массива горных пород, ограниченного поверхностным строением и приповерхностными тепловыми источниками. Температура в скважине уменьшается от устья к забою, эта аномалия связана с тем, что в трех метрах от скважины на глубине 2 м проложена теплотрасса. Усредненное значение геотермического градиента равно $-0,7 \text{ К/м}$.

Была проведена серия из 5 экспериментов каждый длительностью по 8 часов. Каждая последующая прокачка начиналась после полного восстановления начального температурного режима. В течение первых двух часов температура на входе и выходе из циркуляционной системы измерялась каждые 5 мин. Затем, начиная с 90 мин, температуры фиксировались каждые 30 мин. Средние значения разницы температур на входе и выходе из теплообменной системы, а также их теоретические значения согласно (9) приведены на графике (рис. 5). На графике также приведены границы погрешности измерений экспериментальных данных.

Значения температур, полученные в первый час испытаний, исключены из обработки, ввиду неустановившегося режима теплообмена.

Корреляционное отношение экспериментальных и теоретических данных равно 84%, что указывает на то, что зависимость (9) хорошо описывает изменение эффективной разницы температур с течением времени. Ввиду невысокой точности единичного измерения ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$), погрешность измерения разницы температур составит $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. На графике (рис.5) видно, что теоретическая кривая полностью лежит в поле вероятных реальных значений. Таким образом, относительно невысокое значение корреляционного отношения говорит не о слабом описании процесса нестационарного теплообмена в ТС, а о низкой точности измерений. В будущем для более точного подтверждения предложенной теоретической зависимости для определения эффективной разницы температур, возможно проведение экспериментальных исследований в более глубокой скважине, либо при использовании более точного измерительного оборудования.

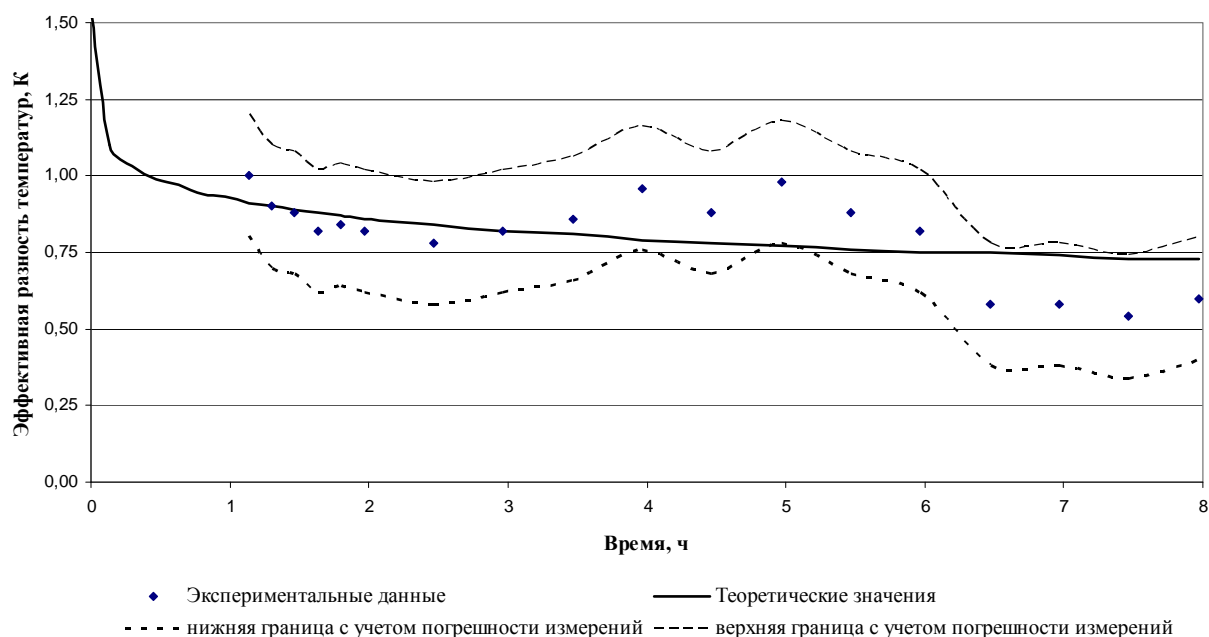


Рис. 5. – Теоретические и экспериментальные значения эффективной разности температур

Заключение

Полученное выражение для определения эффективной разности температур теплоносителя, циркулирующего в коаксиальном коллекторе ТС, может быть использовано как для непосредственного расчета рассматриваемой величины при проектировании ТС, так и для обратных расчетов конструктивных параметров, таких как глубина и диаметр скважин. Достоинством полученной методики расчета является учет всевозможных факторов, оказывающих влияние на процесс теплообмена между теплоносителем и массивом горных пород, таких как: теплофизические свойства горных пород и теплоносителя, режим циркуляции, геометрия каналов, потери тепла во внутреннем канале коллектора и нестационарность теплообмена с течением времени.

Литература:

1. Куликов В.В. Оценка эффективности отбора тепла земных недр от низкопотенциальных источников [Текст] // Недропользование – XXI век, 2009. – № 03. – С. 93-96.
2. Zeng H., Diao N., Fang Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers [Текст] // Heat and Mass Transfer, 2003. – Vol. 46. – P. 456-468.
3. Страупник И.А., Чистяков В.К. Аналитические и экспериментальные исследования скважинного коаксиального теплообменника [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования, 2012, № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/102-6069> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. Zanchini E., Lazzari S. Effects of flow direction and thermal short-circuiting on the performance of coaxial ground heat exchangers [Электронный ресурс] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2009, №7. – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/ICREPQ%2709/469-zanchini.pdf> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. англ.