

Klassifikation pripo- verkhnostnykh geotermal- nykh resursov

Приповерхностные геотермальные ресурсы по генезису, температурным и гидрогеологическим характеристикам отличаются от геотермальных ресурсов более глубоких горизонтов (> 500 м). Самый верхний слой – до глубины нейтрального слоя, находится в пределах области интенсивного влияния солнечной радиации и поэтому его теплосодержание почти полностью зависит от климатических условий региона, а следовательно, динамично меняется. Эта часть приповерхностных ресурсов складывается из тепловых ресурсов горных пород (в меньшей мере) и тепловых ресурсов инсолиации (за счет летнего солнечного нагрева почвы).

Породы от нейтрального слоя до глубин 200-300 м по температурным параметрам связаны с формами переноса теплоты из внутренних источников и почти в полной мере определяются геологическим, геотермическим и гидрогеологическим свойствам недр. В условиях слабопроницаемых пород или малых скоростей фильтрации базовой составляющей извлечения геотермальных ресурсов является кондуктивный теплоперенос. При высокой обводненности пород и достаточных скоростях фильтрации – конвективный теплоперенос. Определен-

ную добавку к теплосодержанию приповерхностного слоя пород дает активность гидротермальной деятельности и проявления повышенного теплового потока, как функции вулканической деятельности.

Тепловые насосы применяются для использования низкотемпературного потенциала поверхностных водоемов и водопотоков. Главная составляющая их теплосодержания несомненно солнечная энергия. Однако, тепловой поток из глубины недр поддерживает температуру дна водоемов и позволяет сохранять аккумулированную водой энергию. Поэтому, в предложенной классификации приповерхностных геотермальных ресурсов (рис. 1) включена группа тепловых ресурсов поверхностных вод.

Под геолого-экономической оценкой ресурсов геотермальной энергии приповерхностных низкотемпературных пород следует понимать *определение их количественной и экономической характеристики*. Количественная оценка этих ресурсов осуществляется для трех категорий: потенциальных - Р, прогнозных - D₂ и перспективных - D₁ (рис. 2).

Потенциальные ресурсы представляют собой количество теплоты, содержащееся в литосфере или ее участках, до глубины 200 м. Динамичность этой категории приповерхностных ресурсов придают: инсолиация поверхности грунта и сезонно



Рис. 1. Классификация приповерхностных геотермальных ресурсов

переменная температура воздуха, определяющая нижнюю границу охлаждения массива пород.

Прогнозные ресурсы (технически доступные приповерхностные геотермальные ресурсы) D_2 - оцениваются как теплосодержание толщи пород до глубины 300 м, с учетом коэффициента извлечения, кроме того, они ограничены температурами потребляемого и сбрасываемого теплоносителя в зависимости от типа и режима ТНУ (теплонаносной установки), т.е. характеризуются не только количественно, но и качественно. Оценка прогнозных ресурсов позволяет определить максимальную обеспеченность рассматриваемой территории приповерхностными геотер-

мальными ресурсами при разработке горизонта конкретной мощности, без расчета затрат на получение геотермального теплоносителя и выработку тепловой энергии.

Перспективные геотермальные ресурсы представляют собой ту часть теплосодержания горизонта, которая может быть эффективно добыта и освоена при современной технологии добычи, термотрансформации и энергетического использования в условиях рыночной конкурентоспособности.

Кроме количества теплоты, показателем количественной оценки геотермальных ресурсов является плотность их распределения или ресурсообеспеченность единицы площади в $\text{Дж}/\text{м}^2$ или $\text{т у.т.}/\text{м}^2$, что позволяет



характеризовать геотермальную ресурсную базу отдельных площадей, регионов и всей России.

Исследование конвективного теплообмена при обтекании скважины флюидом в проницаемых горных породах

Физическая модель задачи

Полый вертикальный цилиндр с толстой стенкой, находящийся в неограниченном проницаемом массиве горных пород. Стенка многослойная, состоит из трех слоев: стенка трубы, слой засыпки, стенка обсадной колонны.

Внутри цилиндра движется теплоноситель. В поперечном направлении происходит обтекание цилиндра фильтрационным потоком жидкости (рис. 3).

Условные обозначения.

T – температура теплоносителя в скважине; u – скорость движения теплоносителя в скважине; v – скорость фильтрации в слое; x – координата по направлению движения теплоносителя; r – текущий радиус скважины; t – среднее значение температуры теплоносителя в скважине; t_0 – температура теплоносителя на входе; t_R – тем-

Рис. 2. Классификация приповерхностных геотермальных ресурсов по принципу промышленного освоения

пература на внутренней стенке скважины; T_p – температура пород; ρ_1 – плотность жидкости; λ_l , λ_t , λ_ϕ – теплопроводность теплоносителя, материала трубы и окружающих фильтрующих пород; C_1 , C_ϕ – удельные теплоемкости жидкости в скважине и в окружающих породах; d_1 , R_1 – внутренний диаметр и радиус трубы; d_2 , R_2 – внутренний диаметр и радиус контура отбора тепла (скважины); q – удельный тепловой поток из массива; δ_ϕ – толщина зазора между трубой и скважиной; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; k_T – коэффициент теплопередачи на единицу длины трубы; α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы; α_2 – коэффициент теплоотдачи между внешней стенкой скважины и набегающим потоком в проницаемой среде; v – коэффициент кинематической вязкости; a_1 – коэффициент температуропроводности теплоносителя; a_2 – коэффициент температуропроводности породы; $\theta = \frac{t - t_0}{T_p - t_0}$ – безразмерная

температура теплоносителя.

Постановка задачи с условием постоянной температуры на стенке скважины

Цилиндр помещен в среду с постоянной температурой $T_p = const$. На внутренней границе с радиусом R_1 происходит теплообмен при течении жидкости в круглом канале. Так как среда (массив горных пород, или пористый

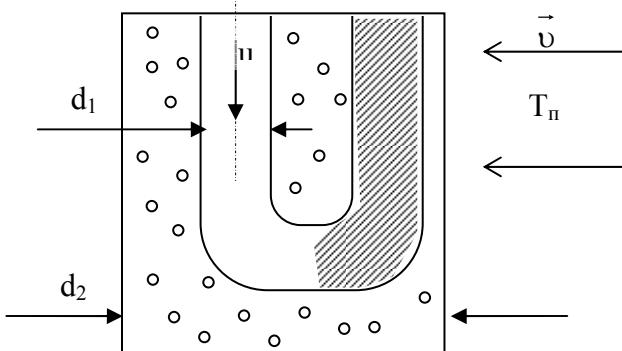
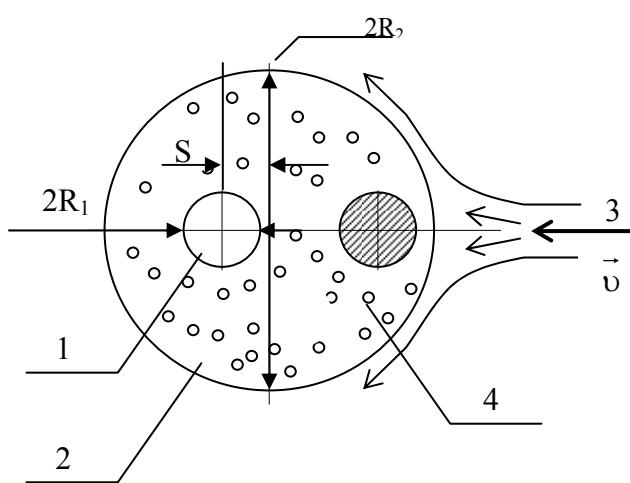


Рис. 3. Схема физической модели конвективного теплообмена при обтекании скважины флюидом в проницаемых горных породах: 1 – нагнетательная труба, 2 – скважина, 3 – фильтрационный поток в проницаемом пласте горных пород, 4 – засыпка между трубой и скважиной (песок - вода), d_1 , R_1 – диаметр и радиус трубы, d_2 , R_2 – диаметр и радиус скважины, S – смещение центров



пласт) проницаема, то на внешней границе цилиндра с радиусом R_2 осуществляется теплообмен при его по-перечном обтекании фильтрующейся со скоростью \bar{v} жидкостью постоянной температуре, равной температуре пород T_p .

Теплообмен на внутренней и внешней границе цилиндра подчиняется закону Ньютона (граничные условия III рода). Теплопередача от массива к теплоносителю осуществляется через многослойную стенку пе-

ременной толщины (в зависимости от размещения труб в скважине).

Температура на входе в канал при $x = 0$ задается постоянной $t(0, r, \tau) = t_0 = \text{const}$. В начальный момент времени температура теплоносителя в канале равна температуре окружающего массива $t(x, r, 0) = T_p$.

Внутри канала осуществляется конвективный и кондуктивный перенос тепла в жидкости. То есть имеется распределение температуры по радиусу r и по длине x канала $t = t(x, r, \tau)$, которое под-

лежит определению.

Математическая формулировка задачи

Дифференциальное уравнение теплопроводности для теплоносителя:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad \begin{cases} \tau > \frac{x}{u}, & x > 0, \\ 0 < r < R_1 \end{cases} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = T_p, \text{ при } \tau \leq \frac{x}{u}$$

$$\begin{aligned} t &= T_{II} \text{ и } t = t_0, \text{ при } x = 0 \\ t &\neq \infty, \text{ при } r = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$t \neq \infty, -\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda_1} (T_{II} - t) = 0, \text{ при } r = R_1$$

Условие симметрии:

$$\frac{\partial t}{\partial r} = 0, \text{ при } r = 0$$

где α – коэффициент теплоотдачи от пород к теплоносителю на единицу площади поверхности канала, a_1 – коэффициент температуропроводности теплоносителя, который определяется следующим образом:

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_1}$$

где λ_1 , c_1 , ρ_1 – коэффициент теплопроводности, теплоёмкости и плотность теплоносителя,

Так как теплообмен между теплоносителем и массивом начинается с момента прихода гидродинамической волны в данную точку x , перейдем в

систему отсчета x , $\tau^* = \tau - \frac{x}{u}$

В новой системе

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial \tau^*} \frac{\partial \tau^*}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau^*},$$

$$u \frac{\partial t}{\partial x} = u \left[\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial \tau^*} \frac{\partial \tau^*}{\partial x} \right] = u \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\partial t}{\partial \tau^*}$$

Уравнение (1) и граничные условия (2) в системе отсчета x , τ^* примут следующий вид:

$$u \frac{\partial t}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad \begin{cases} \tau^* > 0, & x > 0, \\ 0 < r < R_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$t = T_{II}, \text{ при } \tau^* \leq 0$$

$$t = T_{II}, t = t_0, \text{ при } x = 0 \quad (4)$$

$$t \neq \infty, \text{ при } r = 0$$

$$t \neq \infty, -\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda_1} (T_{II} - t) = 0, \text{ при } r = R_1$$

Условие симметрии:

$$\frac{\partial t}{\partial r} = 0, \text{ при } r = 0 \quad (5)$$

Введем новые обозначения (безразмерные переменные):

$$\begin{aligned} X &= \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1 u} \cdot \frac{x}{R_1^2}, & R &= \frac{r}{R_1}, & Bi &= \frac{\alpha \cdot R_1}{\lambda_1}, \\ \theta &= \frac{t - t_0}{T_{II} - t_0}, & F_0^* &= \frac{a_1 \tau^*}{R_1^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение и граничные условия в безразмерных переменных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \quad (7)$$

$$\theta = 1, \text{ при } F_0^* \leq 0$$

$$\theta = 1, \theta = 0, \text{ при } X = 0 \quad (8)$$

$$\theta \neq \infty, \text{ при } R = 0$$

$$\theta \neq \infty, -\frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{\alpha}{\lambda_1} (1 - \theta) = 0, \text{ при } R = 1$$

Решение

Решение системы уравнений (7) – (8) получено операционным методом Папласа и имеет вид:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{t - t_0}{T_{II} - t_0} = \\ &= 1 - \sum_{n=1}^6 A_n J_0(\mu_n \cdot R) \exp[-(\mu_n)^2 X], \\ F_0^* &> 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициенты A_n (начальные тепловые амплитуды) рассчитываются по формуле:

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{2Bi}{[(Bi+1)J_1(\mu_n) + \mu_n J'_1(\mu_n)]\mu_n} = \\ &= \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \end{aligned} \quad (10)$$

или после использования рекуррентных соотношений:

$$A_n = \frac{2Bi}{J_0(\mu_n) [\mu_n^2 + Bi^2]} \quad (11)$$

Коэффициенты μ_n являются корнями трансцендентного уравнения.

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{1}{Bi} \mu \quad (12)$$

При вычислениях использовано 6 первых корней для вычисления суммы в формуле для θ .

Здесь: $J_0(\mu)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $J_1(\mu)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка, $J'_1(\mu)$ – производная данной функции.

Средняя по сечению трубы температура теплоносителя

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= \frac{\bar{t} - t_0}{T_{in} - t_0} = \\ &= \frac{2}{R_i^2} \left[\int_0^{R_i} r \left[1 - \sum_{n=1}^6 A_n J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_i} \right) \exp \left[-(\mu_n)^2 X \right] \right] dr \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Теплообмен при поперечном обтекании цилиндрического канала жидкостью, фильтрующейся через неподвижный проницаемый слой, определяется формулой:

$$Nu_\phi = 0,45 \cdot Re_\phi^{0,7} \cdot Pr^{0,4} \quad (14)$$

Числа Нуссельта Nu_ϕ и Рейнольдса Re_ϕ рассчитываются по диаметру элемента засыпки. Формула справедлива в диапазоне чисел: для числа Прандтля $Pr=0,7 \div 2000$; для числа Рейнольдса $Re_\phi=1 \div 1000$.

$$\text{Здесь } Nu_\phi = \frac{\alpha_2 \cdot d_u}{\lambda_\phi}, \quad Re_\phi = \frac{\nu \cdot d_u}{\nu},$$

$$Pr = \frac{\nu}{a_1}$$

Коэффициент теплоотдачи при внешнем обтекании цилиндрического канала

$$\alpha_2 = \frac{Nu_\phi \cdot \lambda_\phi}{d_u} \quad (15)$$

Для расчета теплоотдачи при течении жидкости в канале круглого сечения в случае теплообмена с внутренней поверхностью можно использовать приближенные аппроксимационные формулы:

$$\text{при } x < L_{H,T} \quad Nu \approx A \left(\frac{Pe}{x} \right)^{1/3} \quad (16)$$

где \bar{x} – относительная длина, Pe – критерий Пекле.

$$\bar{x} = \frac{x}{d_1}, \quad Pe = Re \cdot Pr = \frac{ud_1}{a_1} \quad (17)$$

при $x > L_{H,T}$, $Nu = const$ и для круглого канала с $T_{cm} = const$, $Nu = 3,66$

где x – расстояние от входа в канал, L_T – длина участка тепловой стабилизации, которая определяется по формуле:

$$L_T = d_1 B_T \cdot Pe \quad (18)$$

Коэффициенты в формулах соответственно равны: $B_T = \frac{1}{12}$, $A = 1,61$.

Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \lambda_1}{d_1}. \quad (19)$$

В случае осесимметричного расположения скважины и трубы, коэффициент теплопередачи на единицу длины скважины k_T вычисляется следующим образом:

$$k_T = 2\pi \left[\frac{1}{\alpha_1 R_1} + \frac{1}{\lambda_\phi} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{R_T}{R_1} + \frac{1}{\alpha_2 R_2} \right]^{-1} \quad (20)$$

Если центры смешены на величину S , то k_T вычисляется по формулам:

$$k_T = 2\pi \left[\frac{1}{\alpha_1 R_1} + \frac{1}{\lambda_\phi} \ln \left(\frac{P_1 + P_2}{P_1 - P_2} \right) + \frac{1}{\lambda_T} \ln \frac{R_T}{R_1} + \frac{1}{\alpha_2 R_2} \right]^{-1} \quad (21)$$

$$P_1 = \sqrt{(R_1^2 + R_2^2) - S^2}, \quad P_2 = \sqrt{(R_2^2 - R_1^2) - S^2}$$

Так как λ_T достаточно велико, то термическое сопротивление металлической стенки трубы много меньше, чем сопротивления на контурах и в слое засыпки. Поэтому в формулах (20), (21) его можно не учитывать.

Результаты вычислений тепловых параметров по данной методике

w, 10 ⁻³ м ³ /ч	w, 10 ⁻³ м ³ /с	u, м/с	θ	t _{вых} , °C	Q _в , Дж/с	Q·10 ⁶ , Дж	N, кВт/м
1,6	0,45	0,057	0,6	6,4	10,181	18,33	0,051
2,7	0,746	0,095	0,403	4,627	11,333	20,4	0,057
4	1,099	0,14	0,31	3,79	12,847	23,13	0,064
6	1,67	0,2	0,257	3,31	16,164	29,1	0,081

Если $\alpha_2 \gg \alpha_1$, то внешней теплоотдаче можно пренебречь по сравнению с внутренней.

Критерий Био Bi в формулах (10) и (12) вычисляется по формуле:

$$Bi = \frac{\alpha R_i}{\lambda_i} \quad (22)$$

где α – коэффициент теплоотдачи в постановке с граничными условиями III рода, учитывающий сопротивление слоя между скважиной и трубой, теплоотдачу на внутренней и внешней поверхности.

Коэффициент α при этом включает все условности постановки задачи и должен быть определён.

В классической постановке поток тепла к теплоносителю определяется формулой

$$\lambda_i \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{R_i} = \alpha_i (t_{R_i} - \bar{t}) \quad (23)$$

где α_i – классический коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности канала, t_{R_i} – температура на внутренней стенке при $r = R_i$, \bar{t} – средняя температура теплоносителя по сечению канала.

Следовательно, в граничных условиях формулы (4),

$$\alpha (T_n - t_{R_i}) = \alpha_i (t_{R_i} - \bar{t}) \quad (24)$$

Так как тепловой поток к теплоносителю определяется теплопередачей через слой сопротивления, то

$$\begin{aligned} \alpha_i (t_{R_i} - \bar{t}) &= \frac{k_T}{2\pi R_i} (T_n - \bar{t}) = \\ &= \frac{k_T}{2\pi R_i} [(T_n - t_{R_i}) + (t_{R_i} - \bar{t})] \end{aligned} \quad (25)$$

Коэффициент теплопередачи на единицу поверхности трубы:

$$k = \frac{k_T}{2\pi R_i}.$$

Тогда

$$\alpha_i (t_{R_i} - \bar{t}) = \frac{k}{\left(1 - \frac{k}{\alpha_i}\right)} [T_n - t_{R_i}] \quad (26)$$

Сравнивая (25) и (26) получили выражения для коэффициента теплоотдачи α в постановке с граничными условиями формулы

$$\alpha = \frac{k}{\left(1 - \frac{k}{\alpha_i}\right)} \quad (27)$$

В таблице представлены результаты вычислений по данной методике при различных расходах теплоносителя. **ГЛАБ**

Коротко об авторах –

Богуславский Э.И., Смирнова Н.Н., Егоров С.В. – Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет).

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 19 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Ж. Аренс.