Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIII, 1982 г.

УДК 622.24.082

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Ю.М.ПАРИЙСКИЙ, Н.А.ГАВРИЛОВ

В общем комплексе геологоразведочных работ по освоению геотермальных ресурсов бурение скважин является наиболее сложным, трудоемким и дорогостоящим видом работ.

Основным фактором, определяющим особенности геолого-технических условий бурения скважин на геотермальных месторождениях, является температурный режим (характер распределения и значения температур по площади и разрезу). С этой позиции геотермальные месторождения можно разделить на две группы: низкотемпературные и высокотемпературные. Критерием при этом служит температура подземного флюида на устье скважины. Если она превышает значения температуры насыщения для атмосферного давления в районе месторождения, то последнее относится к высокотемпературным. Условно за критический уровень температуры принимается 100 ^{0}С.

Если бурение скважин на низкотемпературных геотермальных месторождениях по геолого-техническим условиям во многом сходно с бурением скважин на подземные воды (особенно промышленные), то условия высокотемпературных месторождений отличаются целым рядом особенностей, основная из которых заключается в отрицательном влиянии высоких температур практически на все технологические процессы бурения скважин.

Смысл изучения температурного режима скважин сводится к обоснованию методики его прогнозирования и отысканию таких определяющих его факторов, изменение которых позволит регулировать температурный режим в желаемом направлении и в необходимых пределах.

Вопросам исследования температурного режима бурящихся скважин посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ [I-3, 5-7 и др.]. Во всех этих работах использована гипотеза линейного возрастания температуры горных пород с глубиной, что характерно для областей, геотемпературное поле которых формируется в основном за счет кондуктивного теплового потока

$$t_{п} = t_{0} + \sigma h , \qquad (I)$$

где t_0 – температура нейтрального слоя пород, °С; σ – геотермический градиент, °С/100 м; h – глубина, м.

В районах современной гидротермальной активности источником высоких температур служат прогретые горные породы и подземные флюиды в жидкой и паровой фазе, а распределение температуры в массиве пород обусловлено преобладающим действием конвективного, а не кондуктивного переноса тепла и не может быть охарактеризовано единым геотермическим градиентом. Поэтому при исследовании температурного режима скважин на геотермальных месторождениях таких районов за основу принимаются данные термометрических исследований скважин, которые аппроксимируются в первом приближении кривой насыщения для воды в диаграмме $P-T$, как предельной характеристикой термодинамических условий в недрах. Кривая насыщения, с учетом влияния температуры на гидростатическое давление, может быть приближенно описана уравнением вида

$$t_{\text{п}} = t_{\text{нас}} + 274\left(1 - e^{-\varphi h}\right), \qquad (2)$$

где $t_{\text{нас}}$ – начальная температура, равная температуре кипения воды при атмосферном давлении, $t_{\text{нас}} = 100$ °С; φ – показатель степени, $\varphi = 0{,}0014$.

Исследование температурного режима в процессе непосредственного бурения скважин, когда в ней циркулирует промывочная жидкость, сводится к решению задачи, которая может быть сформулирована следующим образом: в массиве горных пород, нагретом циркулирующими в нем по трещинам и порам высокотемпературными флюидами, бурится скважина диаметром D. Через бурильные трубы в скважину подается промывочная жидкость с заданным массовым расходом G и начальной температурой $t_{\text{н}}$. Двигаясь по внутреннему каналу бурильных труб к забою скважины, промывочная жидкость непрерывно нагревается за счет теплообмена через стенку бурильных труб с восходящим потоком, имеющим более высокую температуру в результате теплообмена с разогретыми нижележащими породами.

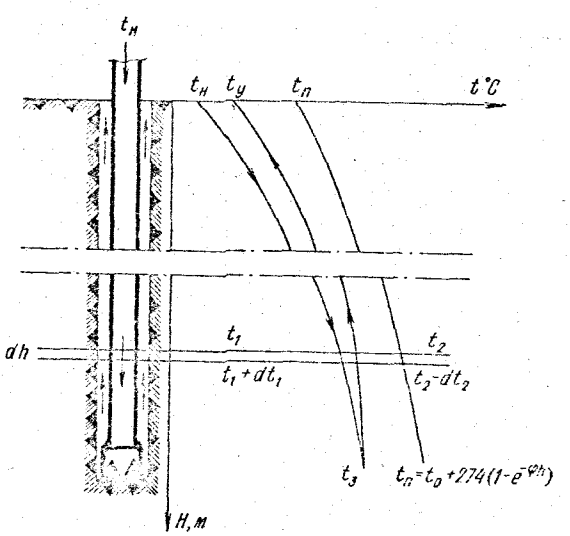


Рис.1. К расчету температурного режима геотермальных скважин

У забоя промывочная жидкость нагревается за счет тепла, выделяемого при разрушении долотом горных пород. Поднимаясь от забоя по кольцевому пространству, промывочная жидкость продолжает нагреваться за счет теплообмена с породами, имеющими более высокую температуру, а затем охлаждается, отдавая тепло нисходящему по трубам потоку и породам, имеющим в верхних горизонтах меньшую температуру. Теплообмен сопровождается генерацией тепла за счет внутреннего трения промывочной жидкости при ее движении. Интенсивность происходящих теплообменных процессов непрерывно изменяется во времени за счет изменения температурного состояния окружающих скважину пород. Для составления дифференциальных уравнений принимаем допущение - физические и теплофизические свойства промывочной среды постоянны, а характеризующие их параметры равны значениям при средней температуре в скважине.

При проведении расчетного анализа температурного режима скважины использована схема Б.Б.Кудряшова [1, 2].

Выделим элементарный участок dh (рис.I) в части скважины, где промывочная жидкость при своем движении только нагревается. Тогда количество тепла, полученное в единицу времени нисходящим потоком на участке dh,

$$dQ_1 = k\pi(t_2 - t_1)dh + gGi_1dh. \qquad (3)$$

Количество тепла, полученное восходящим потоком на том же участке,

$$dQ_2 = k_\tau \pi D\left[t_{нас} + 274\left(1 - e^{-\varphi h}\right) - t_2\right]dh - k\pi(t_2 - t_1) + gGi_2dh. \qquad (4)$$

При этом с глубиной температура жидкости в нисходящем потоке возрастает, а в восходящем понижается. Следовательно, $dQ_1 = Gcdt_1$ и $dQ_2 = -Gcdt_2$. Подставив эти выражения в (3) и (4), получим два уравнения с двумя неизвестными:

$$Gcdt_1 = k\pi(t_2 - t_1)dh + gGi_1dh; \qquad (5)$$

$$-Gcdt_2 = k_\tau \pi D\left[t_{нас} + 274\left(1 - e^{-\varphi h}\right) - t_2\right]dh - k\pi(t_2 - t_1)dh + gGi_2dh, \qquad (6)$$

где t_1 и t_2 - температура промывочной жидкости внутри бурильных труб и в кольцевом пространстве соответственно, ^{0}C; G - массовый расход промывочной жидкости, кг/с; c - удельная теплоемкость промывочной жидкоти, Дж/(кг·^{0}C); D - диаметр скважины, м; k - коэффициент теплопередачи через стенку бурильной трубы, отнесенный к I м длины трубы, Вт/(м·^{0}C); k_τ - коэффициент нестационарного (зависящего от времени) теплообмена между промывочной жидкостью и массивом горных пород, Вт/(м·^{0}C); i - гидравлический уклон (безразмерная величина); g - ускорение силы тяжести, м/с^2.

Поделив левые и правые части уравнений (5) и (6) на Gc и разделив переменные, получим

$$\frac{dt_1}{dh} = \frac{k\pi}{Gc}(t_2 - t_1) + \frac{g}{c}i_1; \qquad (7)$$

$$-\frac{dt_2}{dh}=\frac{k_\tau \pi D}{Gc}\left[t_0+274\left(1-e^{-\varphi h}\right)-t_2\right]-\frac{k\pi}{Gc}\left(t_2-t_1\right)+\frac{g}{c}i_2. \qquad (8)$$

С помощью уравнения (7) выразим t_2 и $\frac{dt_2}{dh}$ через t_1:

$$t_2=t_1+\frac{Gc}{k\pi}\frac{dt_1}{dh}-\frac{gG}{k\pi}i_1; \qquad (9)$$

$$\frac{dt_2}{dh}=\frac{dt_1}{dh}+\frac{Gc}{k\pi}\frac{d^2t_1}{dh^2}. \qquad (10)$$

Для установления связи между переменными t_1 и h подставим выражения (9) и (10) в (7) и (8) и после преобразования будем иметь

$$\frac{d^2t_1}{dh^2}-\frac{k_\tau \pi D}{Gc}\frac{dt_1}{dh}-\frac{k_\tau k\pi^2 D}{G^2c^2}t_1=-\frac{k_\tau k\pi^2 D}{G^2c^2}\times$$
$$\times\left[t_{нас}+274\left(1-e^{-\varphi h}\right)\right]-\frac{g\pi}{Gc^2}\left[k_\tau D i+k\left(i_1+i_2\right)\right]. \qquad (11)$$

Получили неоднородное, с правой частью, линейное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Общее решение неоднородного уравнения (11) имеет вид

$$t_1=C_1e^{r_1h}+C_2e^{r_2h}+Me^{-\varphi h}+t_0+274+\frac{N}{E}, \qquad (12)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные интегрирования; r_1 и r_2 – корни характеристического уравнения,

$$r_1=\frac{\pi}{Gc}\left(\frac{k_\tau D}{2}+\sqrt{\frac{k_\tau^2D^2}{4}+k_\tau kD}\right);\quad r_2=\frac{\pi}{Gc}\left(\frac{k_\tau D}{2}-\sqrt{\frac{k_\tau^2D^2}{4}-k_\tau kD}\right);$$

$$M=\frac{274E}{\varphi^2+P\varphi-E};$$

$$E=\frac{k_\tau k\pi^2 D}{G^2c^2};$$

$$P=\frac{k_\tau \pi D}{Gc};$$

$$N=\frac{g\pi}{Gc^2}\left[k_\tau D i_1+k\left(i_1+i_2\right)\right].$$

Постоянные интегрирования определяем из граничных условий. Первое граничное условие: при $h=0$ $t_1=t_{1н}$, т.е. на уровне поверхности температура жидкости в бурильных трубах равна ее начальной температуре.

Второе граничное условие при $h = H$ (где H – конечная в данный момент глубина бурящейся скважины) находим из следующих соображений. В условиях бурящейся скважины генерируемое у забоя тепло влияет на температуру циркулирующей жидкости, повышая ее на величину $\Delta t_з$. Если рассматривать призабойный источник тепла как точечный, для условий на забое справедливо равенство

$$t_2 = t_1 + \Delta t_з . \qquad (13)$$

Одновременно на забое, как и на любой глубине h, должно соблюдаться условие, выраженное соотношением (9). Подставим выражение (13) в формулу (9) и после преобразования получим выражение

$$\frac{dt_1}{dh} = \frac{k\pi}{Gc}\Delta t_з + \frac{g}{c} i_1 , \qquad (14)$$

которое и будет вторым граничным условием для нисходящего потока.

На основании граничных условий из общего решения (12) получим

$$t_{1н} = C_1 + C_2 + M + \frac{N}{E} + t_0 + 274 ; \qquad (15)$$

$$\frac{k\pi}{Gc}\Delta t_з + \frac{g}{c} i_1 = r_1 e^{r_1 H}\left(t_{1н} - C_2 - M - \frac{N}{E} - t_0 - 274\right) + r_2 C_2 e^{r_2 H} - \varphi M e^{-\varphi H} . \qquad (16)$$

Решая совместно (15) и (16), находим постоянные интегрирования C_1 и C_2. Подставив их в общее решение (12), для температуры внутри бурильных труб на любой глубине h при конечной в данный момент глубине бурящейся скважины H получим

$$t_1 = Q_1 e^{r_1 h} + Q_2 e^{r_2 h} + M e^{-\varphi h} + \frac{N}{E} + t_0 + 274 , \qquad (17)$$

где

$$Q_1 = \frac{\varphi M e^{-\varphi H} - r_2 e^{r_2 H}\left(t_{1н} - M - \frac{N}{E} - t_{нас} - 274\right) + \frac{k\pi}{Gc}\Delta t_з + \frac{g}{c} i_1}{A} ;$$

$$Q_2 = \frac{-\varphi M e^{-\varphi H} + r_1 e^{r_1 H}\left(t_{1н} - M - \frac{N}{E} - t_{нас} - 274\right) - \frac{k\pi}{Gc}\Delta t_з - \frac{g}{c} i_1}{A} ;$$

$$A = r_1 e^{r_1 H} - r_2 e^{r_2 H} .$$

Имея зависимость t_1 от h и H, с помощью формулы (9) можно получить соответствующее выражение для температуры в кольцевом пространстве:

$$t_2 = Q_1 e^{\eta_1 h}\left(1+\eta_1\frac{Gc}{k\pi}\right)+Q_2 e^{\eta_2 h}\left(1+\eta_2\frac{Gc}{k\pi}\right)+Me^{-\varphi h}\left(1-\varphi\frac{Gc}{k\pi}\right)+\frac{N}{E}+t_{нас}+274-\frac{gG}{k\pi}i_1 . \quad (18)$$

Если конечную глубину скважины H в момент τ от начала циркуляции рассматривать как результат бурения в течение данного рейса, то

$$H = H_0 + s\tau , \quad (19)$$

где H_0 – глубина скважины перед началом очередного рейса, м; s – механическая скорость бурения, м/ч; τ – продолжительность бурения, равная продолжительности циркуляции промывочной жидкости, ч.

Подставив выражение (19) в формулы (17) и (18), можно в первом приближении учесть влияние скорости бурения на температуру промывочной жидкости.

Гидравлический уклон в бурильных трубах i_1 и в кольцевом пространстве i_2 определяется из выражения

$$i = \frac{\Delta P}{\rho g H} , \quad (20)$$

где ΔP – гидравлические потери давления в соответствующем канале при средней температуре в скважине, Па; ρ – плотность промывочной жидкости, кг/м^3.

Прирост температуры промывочной среды за счет местного нагрева у забоя скважины

$$\Delta t_э = \frac{N}{Gc_p} , \quad (21)$$

где N – мощность, затрачиваемая на забое на разрушение породы, кВт; c_p – удельная теплоемкость промывочной жидкости, КДж/(кг·°С).

Коэффициент теплопередачи через стенку бурильной трубы, отнесенный к 1 м длины трубы,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1}+\frac{1}{2\lambda_{ст}}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2 d_2}} , \quad (22)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно во внутреннем канале бурильных труб и в кольцевом пространстве скважины, Вт/(м·°С); d_1, d_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры бурильной трубы, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности стали труб, Вт/(м·°С).

Значения коэффициентов теплоотдачи α в случае бурения с промывкой водой могут быть определены по формуле [7]

$$\alpha = 0{,}021\,Re^{0{,}8}\,Pr^{0{,}43}\frac{\lambda}{d} , \quad (23)$$

где λ – коэффициент теплопроводности промывочной жидкости при средней температуре в скважине, Вт/(м·°С); d – диаметр канала (для кольцевого

канала эквивалентный диаметр $d_э = D - d_2$), м; Re – безразмерный критерий Рейнольдса; Pr – безразмерный критерий Прандтля.

В случае применения для промывки глинистых растворов можно пользоваться формулой акад. Л.С.Лейбензона [4]

$$\alpha = 0{,}12 Re^{0{,}75} \frac{\lambda}{d} . \qquad (24)$$

Коэффициент нестационарного обмена

$$k_\tau = \frac{\alpha}{1 + Bi \sqrt[4]{Fo}}, \qquad (25)$$

где Bi – критерий граничных условий Био, $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$; Fo – безразмерное время – критерий Фурье, $Fo = a_п \tau / R^2$; R – радиус скважины, м; $a_п$ – коэффициент температуропроводности пород, $a_п = \frac{\lambda_п}{c_п \rho_п}$, $м^2/с$; $\lambda_п$ – коэффициент теплопроводности пород, Вт/(м·°С); $c_п$ – удельная теплоемкость породы, Дж/(кг·°С); $\rho_п$ – плотность породы, $кг/м^3$.

При практических расчетах достаточно точно коэффициент нестационарного теплообмена можно вычислить по формуле Б.Б.Кудряшова [I]

$$k_\tau = \frac{\lambda_п^{3/4}}{R^{1/2}} \left(\frac{c_п \rho_п}{\tau} \right)^{1/4} . \qquad (26)$$

Формулы (I7) и (I8) применимы к расчету распределения температуры по стволу скважины в любой момент времени τ от начала непрерывной циркуляции после длительного простоя, когда температурное состояние окружающих скважину пород можно считать восстановившимся. С практической точки зрения этот случай наиболее важен.

Как показывают результаты расчетов, температурный режим скважины, бурящейся в зоне действия гидротермальной системы, существенно отличается от режима, характерного для районов с преобладающим кондуктивным переносом тепла.

На рис.2, а приведены в безразмерных координатах $\bar{L}$ и $\bar{T}$ графики распределения температур в скважинах для месторождений с кондуктивным и конвективным переносом тепла. Из их сравнения видно, что температурный режим скважины, бурящейся в зоне современной гидротермальной активности, отличается от режима, характерного для скважины, проходимой в условиях преобладания кондуктивного теплового потока, следующими особенностями:

а) значительно более высокими относительными температурами восходящего и нисходящего потоков промывочной жидкости;

б) более существенным изменением температуры потоков промывочной жидкости по длине ствола скважины;

в) значительным увеличением опасности фазовых переходов промывочной жидкости, особенно в приустьевом интервале скважины.

Эти отличия обуславливают более напряженный характер температурного режима бурящейся скважины, что увеличивает вероятность различных осложнений.

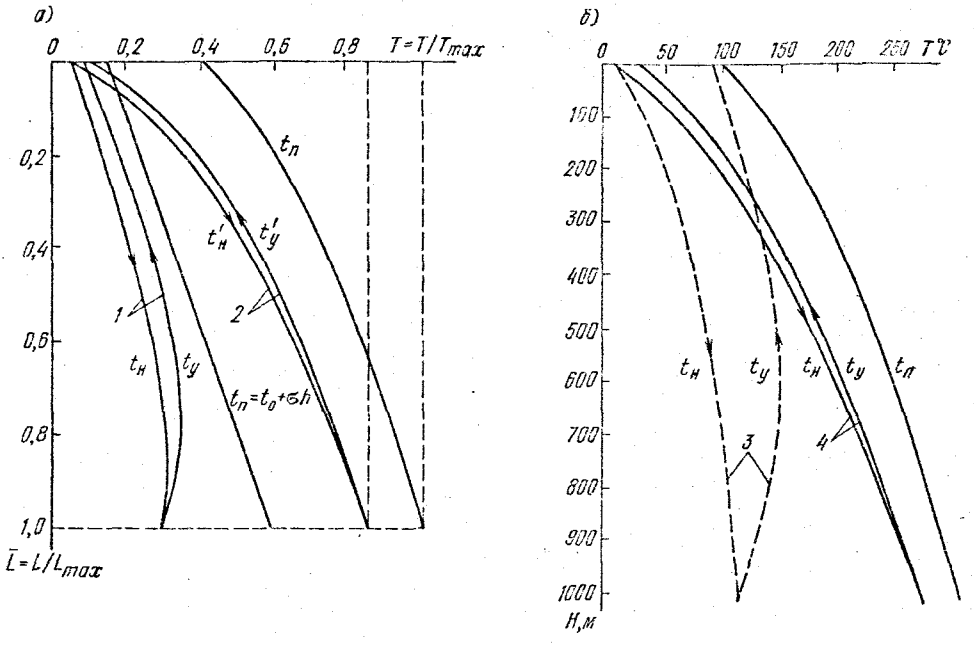


Рис.2. Распределение температуры в нисходящем и восходящем потоках промывочной жидкости: а – влияние механизма переноса тепла; б – влияние теплоизоляции бурильной колонны 1 – преобладает кондуктивный перенос тепла; 2 – преобладает конвективный перенос тепла; 3 – колонна теплоизолированная; 4 – колонна нетеплоизолированная

Анализ зависимости температурного режима скважины от различных факторов по вышеприведенным формулам проводился для случая, когда температурное состояние окружающего скважину массива, нарушенное в процессе циркуляции промывочной жидкости, полностью восстановилось и начальное распределение температуры по скважине соответствует начальному распределению температуры в массиве.

Расчет проводился при следующих исходных данных: диаметр скважины D = 0,112 м; глубина скважины H = 1000 м; бурильные трубы муфтово-замкового соединения d_2 = 0,05 м; промывочная жидкость – вода с начальной температурой $t_{1н}$ = 15 °С; температура пород с глубиной изменяется по закону $t_п = t_{нас} + 274(1 - e^{-\varphi h})$. Все значения теплофизических характеристик взяты для средней температуры в скважине, равной 150 °С.

Анализ показал, что наиболее радикальным способом нормализации температурного режима геотермальных скважин является способ, предложенный Е.Б.Кудряшовым, основанный на снижении интенсивности теплообмена между нисходящим и восходящим потоками, которое достигается за счет теплоизоляции бурильных труб.

На **рис.2, б** приведены графики распределения температуры в нисходящем и восходящем потоках промывочной жидкости при использовании обыч-

ной бурильной колонны и теплоизолированной изнутри слоем фторпласта толщиной 3 мм, имеющего коэффициент теплопроводности 0,23 Вт/(м·°С), термостойкость до 350 °С, низкий коэффициент трения, стойкого к воздействию агрессивной среды. Помимо снижения в 2,3 раза забойной температуры промывочной жидкости и почти двукратного снижения максимальной температуры в скважине применение теплоизолированной колонны меняет характер распределения температуры в скважине.

За счет резкого снижения интенсивности теплообмена между нисходящим и восходящим потоками промывочная жидкость достигает забоя, имея значительно меньшую температуру. Двигаясь по кольцевому пространству вверх, жидкость нагревается на значительно большем участке. Максимальная температура устанавливается не на забое, а значительно выше над ним. Но само значение температуры по абсолютной величине всегда ниже, чем при использовании нетеплоизолированной колонны. Раствор в верхней части ствола охлаждается главным образом за счет теплообмена с окружающими породами. Температура раствора на выходе из скважины значительно выше, чем при использовании обычной колонны.

Однако применение теплоизолированной колонны в сочетании с поверхностным охлаждением промывочной жидкости при замкнутой схеме циркуляции с учетом фактора времени позволит глубже охладить породный массив за счет интенсивного теплового дренажа и приблизить условия бурения геотермальных скважин к бурению скважин в обычных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Б.Б. Анализ, расчет и вопросы регулирования температурного режима бурящейся скважины. - Зап. ЛГИ, 1969, т. 57, вып. 2.

2. Кудряшов Б.Б. Теория и способы регулирования температурного режима сверхглубоких скважин. - Зап. ЛГИ, 1975, т. 67, вып. 1.

3. Кулиев С.М., Есьман Б.И., Габузов Г.Г. Температурный режим бурящихся скважин. М., Недра, 1968.

4. Лейбензон Л.С. Собрание трудов. М., Изд. АН СССР, 1955. Т. 3.

5. Пудовкин М.А., Чугунов В.А., Саламатин А.И. Задачи теплообмена в приложении к теории бурения скважин. Казань, изд. Казанского ун-та, 1977.

6. Череменский Г.А. Прикладная геотермия. Л., Недра, 1977.

7. Щербань А.Н., Черняк В.П. Прогноз и регулирование теплового режима при бурении глубоких скважин. М., Недра, 1974.