

УДК 551.23:536.7

К.И.Луданов¹, канд.техн.наук, В.Г.Олейниченко² (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Натурный метод оценки проницаемости скелета водоносного коллектора и оптимизация дебита фонтанирующих скважин

В статье разработан натурный метод оценки проницаемости пористого скелета водоносного коллектора на принципиально новой основе, т.е. на базе стационарного решения, полученного с использованием трехмерной теплогидравлической аналогии для фильтрации воды в прискважинной зоне. Кроме того, в работе проведена оптимизация дебита фонтанирующих скважин по максимальной полезной работе фонтана. Библ. 9, табл. 2, рис. 1.

Ключевые слова: фонтанирующая скважина, геотермальная вода, пористый скелет, водоносный коллектор, гидравлическая проницаемость, уравнение Дюпюи, оптимальный дебит.

Orcid: ¹0000-0002-9651-641X; ²0000-0003-4651-9628

Введение. При оценке перспективности гидротермальных месторождений кроме температуры воды очень важным параметром является гидравлическая проницаемость пористого скелета водоносного коллектора, которая наряду с пластовым давлением и эффективной толщиной пласта формирует дебит фонтанирующей из скважины воды. Процесс определения проницаемости пористого скелета по керну породы в лабораторных условиях – это длительная и кропотливая процедура, требующая специального экспериментального оборудования. Поэтому весьма актуальной является разработка простого способа натурной оценки проницаемости скелета. Это важно и для оптимизации величины дебита скважины по критерию полезной работы фонтана и последующей организации оптимального режима ее эксплуатации.

Обзор. Для оценки потенциальной продуктивности (дебита) фонтанирующих скважин обычно используется формула французского гидроинженера Дюпюи (Dupuit A.J., 1854), которая получена в рамках решения "плоской задачи" фильтрации [1] и записывается так:

$$Q = \frac{kh}{\mu} \cdot \frac{2\pi}{\ln(R_k/r_c)} \cdot (P_k - P_c), \quad (1)$$

где Q – дебит фонтанирующей скважины, м³/с; P_k – пластовое давление на границе контура пи-

тания, МПа; P_c – забойное давление в стволе скважины, МПа; k – проницаемость пористого скелета пласта, м²; μ – динамическая вязкость геотермальной воды, Па·с; h – эффективная толщина водоносного горизонта, м; R_k – радиус контура питания (воронки депрессии), м; r_c – радиус скважины по долоту, м.

Иногда эту формулу Дюпюи записывают в обратном виде [2]:

$$\Delta P_{KC}/Q = R_h = [(\mu/k) \cdot \ln(R_k/r_c)]/(2\pi h), \quad (2)$$

где R_h – гидравлическое сопротивление фильтрации в прискважинной зоне; ΔP_{KC} – разность давлений на границе контура питания и в скважине, МПа.

На рис. 1 представлена графическая схема плоской задачи фильтрации воды из пласта в скважину в цилиндрической системе координат.

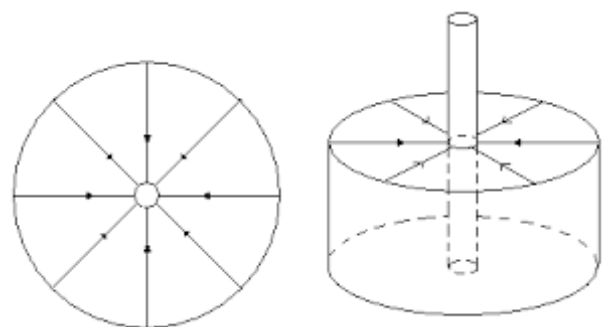


Рис. 1. Схема радиальной фильтрации воды из пласта к скважине.

Уже давно известно и точное нестационарное решение для плано-радиальной фильтрации в водоносном горизонте большого масштаба ($r \gg R_k$), который был вскрыт скважиной совершенно. Оно было получено американским гидрогеологом Тейсом (*Theis C.V.*, 1935) [3] и выражается через интегральную показательную функцию $Ei(-r^2/at)$ в следующем виде:

$$Q_{(t)} = \frac{km}{\mu\beta} \cdot \frac{4\pi}{-Ei(-r^2/4at)} \cdot \Delta P_{(r)}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{(r)}$ – перепад между давлением воды в скважине при $r_o = r_c$ и давлением воды в водоносном горизонте на расстоянии $r \gg R_k$, Па; m – эффективная мощность водоносного горизонта, м; β – коэффициент объемной сжимаемости водоносного горизонта; a – коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта, $a = k/\beta$ (м²/с); t – период времени от начала работы скважины, с.

Однако при интерпретации данных одиночных фонтанирующих скважин использование этих двух точных решений (формулы Дюпюи и формулы Тейса) для определения проницаемости скелета водоносного коллектора приводит к сложным вычислительным проблемам [4].

Постановка задачи. Логарифмический характер зависимости притока к скважине от соотношения двух радиусов, которая получается при интегрировании дифференциального уравнения фильтрации в цилиндрической системе координат (формула Дюпюи), не позволяет использовать бесконечные пределы интегрирования.

Анализ формулы Тейса (4) показывает, что для получения численных величин дебита Q необходимо интегрировать ее по радиусу в пределах от $r = r_o$ до $r \rightarrow \infty$. Поскольку функция $Ei(-r^2/at)$ не интегрируется в квадратурах, то эту задачу необходимо решать численно, что при отсутствии реальных параметров пласта приводит к большим ошибкам. Определять потенциальный дебит скважины таким сложным и неточным способом нецелесообразно.

Таким образом, чтобы получить возможность воспользоваться бесконечными пределами интегрирования необходимо решить задачу фильтрации в прискважинной зоне в трехмерной постановке. Это позволит определить проницае-

мость и гидравлическое сопротивление пористого скелета. Ведь отсутствие информации по гидравлическому сопротивлению прискважинной зоны водоносного коллектора затрудняет возможность оптимизации режима эксплуатации фонтанирующей скважины.

Результаты исследования.

1. Оценка проницаемости пласта водоносного горизонта. Для получения трехмерного аналитического решения данной задачи здесь можно воспользоваться теплогидравлической аналогией, то есть использовать решение, полученное для теплового потока от бесконечного массива к ограниченному цилиндру, моделирующему фильтр обсадной трубы. В этом случае можно использовать аналогию течения жидкости в пористой структуре (в соответствии с законом Дарси) с распространением теплоты в изотропной теплопроводящей среде (в соответствии с законом Фурье). Для распространения теплоты в безграничной теплопроводящей среде [5] при аналогичных граничных условиях уже имеется решение для термического сопротивления между стержнем (радиусом R и длиной L) и массивом в диапазоне параметров $100 > L/R > 20$:

$$R_{35} = [Arch(L/R) - \sqrt{1 + (R/L)^2} + R/L]/(2\pi\lambda \cdot L). \quad (4)$$

Термическое сопротивление входит в выражение теплового потока, зависящего от перепада температуры между стержнем и окружающим его массивом: $q = \Delta t/R_{35}$. В этом выражении для R_{35} необходимо выполнить замещение теплопроводности λ на отношение проницаемости к вязкости $k/\mu\beta$ и получить выражение гидравлического сопротивления течению жидкости:

$$R_h = (\mu/k) \cdot [Arch(L/R) - \sqrt{1 + (R/L)^2} + R/L]/(2\pi \cdot L). \quad (5)$$

В данном случае величины R и L равны соответственно радиусу и длине фильтра, установленного на нижнем конце обсадной трубы.

Пример 1. Стандартная длина секции фильтра $L = 3$ м [6], а диаметры обсадной трубы составляют $\varnothing 100$, $\varnothing 150$, $\varnothing 200$ мм. На этой основе можно выполнить расчет одной из составляющих гидравлического сопротивления прискважинной зоны R_h , представленной в квадрат-

ных скобках [...] $\equiv f(L/R)$ для односекционного фильтра.

Данные расчета значений $f(L/R)$ на основе [6] даются в таблице 1.

Таблица 1

Ø трубы, мм	Ø 100 мм	Ø 150 мм	Ø 200 мм
Отношение L/R	60	40	30
Значение $f(L/R)$	3,79	3,41	3,06

Поскольку отношение размеров односекционного фильтра L/R с Ø100 мм совпадает с отношением L/R для фильтра из двух секций с Ø200 мм, то для расчета этого случая можно воспользоваться значением в $f(L/R)$, равным 3,79.

В случае, если $L/R \geq 100$, выражение в скобках $f(L/R)$ в формуле (5) вырождается [7]:

$$\lim[\text{Arch}(L/R) - \sqrt{1 + (R/L)^2} + R/L] \rightarrow \ln(2L/R) - 1. \quad (6)$$

Обычно натурным испытаниям подвергается реальная фонтанирующая скважина не для того, чтобы вычислить ее "потенциальную продуктивность", а для того, чтобы оценить гидравлическое сопротивление прискважинной зоны водоносного коллектора. А на этой основе, с учетом размеров обсадной трубы, фильтра и толщины водоносного пласта определить проницаемость скелета и оптимизировать режим эксплуатации скважины: определить оптимальный дебит и температуру закачиваемой обратно геотермальной воды.

Из формул (3) и (6) можно легко выразить проницаемость скелета k на основе выражения гидравлического сопротивления прискважинной зоны ($R_h = \Delta P_{KC}/Q$) и соотношения размеров фильтра обсадной трубы:

$$k = \mu \cdot (Q/\Delta P_{KC}) \cdot [\text{Arch}(L/R) - \sqrt{1 + (R/L)^2} + R/L] / (2\pi \cdot L). \quad (7)$$

Предварительно вычислив значение μ , можно по формуле оценить гидравлическую проницаемость пористого скелета пласта k .

2. Определение пластового и забойного давления в скважине. Пластовое давление можно определить манометром на дне скважины (в фильтре) или оценить его значение при нулевом дебите сразу после вскрытия: в этом случае оно равно сумме давления столба жидкости ρgh в

нижней секции фильтра плюс давление по манометру на ее закрытом устье $(p_{\text{уст}})_{\text{max}}$:

$$P_K = \rho gh + (p_{\text{уст}})_{\text{max}}. \quad (8)$$

Забойное давление можно определить косвенно, поскольку оно равно разности между давлением в фильтре ρgh и потерями напора на вязкое трение при течении воды в обсадной трубе $\Delta H_{\text{тр}}$, Па:

$$P_C = \rho gh + p_{\text{уст}}(Q) - \Delta H_{\text{тр}}(Q), \quad (9)$$

где $p_{\text{уст}}(Q)$ давление воды в устье скважины при $Q < Q_{\text{max}}$, $p_{\text{уст}}(Q) = (p_{\text{уст}})_{\text{max}} \cdot (1 - Q/Q_{\text{max}})$.

Пример 2. Оценим потери напора в обсадной трубе фонтанирующей скважины пос. Новоалексеевка (АР Крым), которая характеризуется следующими параметрами: максимальный дебит $Q_{\text{max}} = 205 \text{ м}^3/\text{час}$, диаметр и длина обсадной трубы Ø100 мм и $h = 1100 \text{ м}$, давление воды в закрытом устье $P_{\text{уст}} = 8 \text{ атм.}$, температура фонтанирующей воды $t = 53^\circ\text{C}$.

Расчет гидравлических потерь напора на вязкое трение в обсадной трубе показал, что $\Delta H_{\text{тр}} \ll \rho gh$, поэтому ими можно пренебречь. В таком случае можно записать:

$$P_C = \rho gh + p_{\text{уст}}(Q), \text{ а } \Delta P_{KC} = Q \cdot (p_{\text{уст}})_{\text{max}} / Q_{\text{max}} \quad (10)$$

Откуда, разделив обе части второго равенства на Q , можно найти выражение для гидравлического сопротивления пористого скелета пласта прискважинной зоны R_h и оценить его величину:

$$R_h = (p_{\text{уст}})_{\text{max}} / Q_{\text{max}} = 8(\text{атм}) / 205(\text{м}^3/\text{ч}) = 14,05 (\text{МПа} \cdot \text{с} / \text{м}^3).$$

А затем по формуле (7) легко вычислить гидравлическую проницаемость пористого скелета породы, так как общая длина фильтра L и μ известны. Расчет показывает, что для данного водоносного коллектора на глубине 1,1 км проницаемость пористого скелета пласта равна:

$$k = (\mu/R_h) \cdot f(L/R) / (2\pi \cdot L) = (5,15 \cdot 10^{-3} / 14,05 \cdot 10^6) \cdot 3,79 / 2\pi \cdot 3 = 73,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2.$$

3. Оптимизация дебита гидротермальной фонтанирующей скважины. Оптимальным режимом работы скважины назовем случай, когда фонтан геотермальной воды производит на поверхности земли максимальную полезную рабо-

ту, т.е. в этом случае должно быть максимальным произведение расхода Q на избыточное давление воды P на выходе из скважины.

Если пренебречь потерями напора на вязкое трение при течении воды в обсадной трубе, поскольку они значительно меньше, чем гидростатический напор, создаваемый столбом жидкости в стволе скважины глубиной 1100 м, то выражение работы скважины A запишется в следующем виде:

$$A = Q \cdot p_{\text{уст}}(Q) = Q \cdot (p_{\text{уст}})_{\text{max}} - Q^2 \cdot R_h. \quad (11)$$

Оптимальный режим работы геотермальной фонтанирующей скважины можно установить путем исследования на экстремум выражения работы A , т.е. путем приравнивания к нулю производной от функции A (полезной работы скважины) по переменной Q (дебиту): $dA/dQ = 0$. В этом случае для оптимального значения дебита получаем уравнение:

$$Q_{\text{opt}} \cdot 2R_h - (p_{\text{уст}})_{\text{max}} = 0, \quad (12)$$

откуда оптимальное значение дебита скважины составляет:

$$Q_{\text{opt}} = (p_{\text{уст}})_{\text{max}} / 2R_h = 0,5 Q_{\text{max}}. \quad (13)$$

Пример 3. Оценим гидравлическое сопротивление околоскважинной зоны скелета водоносного коллектора под фонтанирующей скважиной пос. Янтарное (АР Крым), которая характеризуется следующими параметрами: максимальный дебит $Q_{\text{max}} = 65 \text{ м}^3/\text{час}$, диаметр и длина обсадной трубы $\varnothing 200 \text{ мм}$ и $h = 2300 \text{ м}$, давление воды в закрытом устье $(p_{\text{уст}})_{\text{max}} = 12 \text{ атм.}$, температура воды $t = 85^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} R_h &= (p_{\text{уст}})_{\text{max}} / Q_{\text{max}} = \\ &= 12 \text{ (атм)} / 65 \text{ (м}^3/\text{ч)} = 66,46 \text{ (МПа} \cdot \text{с/м}^3\text{)}. \end{aligned}$$

А затем по формуле (7) легко вычислить гидравлическую проницаемость пористого скелета породы, так как общая длина фильтра L и μ известны. Расчет показывает, что для данного водоносного коллектора на глубине 2,3 км проницаемость пористого скелета пласта равна:

$$\begin{aligned} k &= (\mu/R_h) \cdot f(L/R) / (2\pi \cdot L) = \\ &= (3,3 \cdot 10^{-3} / 66,46 \cdot 10^6) \cdot 3,06 / 2\pi \cdot 3 = 8,06 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Анализ показывает, что гидравлическая проницаемость пористого скелета пласта, вскрытого скважиной в пос. Янтарное (2300 м), почти на порядок меньше, чем у пласта, вскрытого скважиной в Новоалексеевке (1100 м). Таким образом, расчет показал, что величина проницаемости пласта k обратно пропорциональна кубу глубины вскрытия скважиной водоносного коллектора: $k \sim h^{-3}$.

Просто вычисляется и оптимальный дебит скважины. Он равен:

$$Q_{\text{opt}} = 0,5 Q_{\text{max}} = 32,5 \text{ (м}^3/\text{ч)}.$$

4. Стабилизация режима работы водоносного коллектора. Известно [7], что аккумулирующая емкость водоносного коллектора зависит от нескольких факторов. Во-первых, от того факта, что вода в порах скелета пласта при давлении более 50 атм. начинает заметно сжиматься. Таким образом, фонтан геотермальной воды вполне вероятен при глубинах скважин более 0,5 км. Во-вторых, дополнительное аккумулярование в пористом пласте возможно, если при выходе воды из открытых пор скелет пласта также будет существенно сжиматься под давлением расположенной выше массы породы.

Поэтому, если отработанную геотермальную воду не закачивать обратно в водоносный коллектор, то из-за снижения пластового давления в этом коллекторе через некоторое время дебит фонтанирующих скважин снизится, а потом вообще может упасть до нуля, так как пластовое давление не может опуститься ниже гидростатического давления воды в фильтре обсадной трубы. Следовательно, в целях сохранения дебита скважины на постоянном уровне отработанную геотермальную воду необходимо в полном объеме закачивать обратно в пласт на ту же глубину нагнетательными насосами через расположенную соседнюю скважину.

Закачка в пласт отработанной геотермальной воды имеет некоторые особенности. Дело в том, что на поверхности от горячей геотермальной воды отводится тепло нагрева и обратно в пласт она закачивается при пониженной температуре. А это приводит к тому, что резко возрастает перепад давления на преодоление гидравлического

сопротивления скелета прискважинной зоны фильтрации. Ведь в выражение закона Дарси входит динамическая вязкость воды μ , которая резко возрастает при понижении температуры. Например, при понижении температуры воды от 85°C до 20°C величина μ увеличивается втрое. Это можно видеть из таблицы 2.

Данные по зависимости динамической вязкости воды $\mu(t)$ [8].

Таблица 2

t	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
μ	17,5	12,9	10	7,9	6,5	5,4	4,6	4,0	3,5	3,1

Табличные данные зависимости динамической вязкости воды μ от температуры в градусах Цельсия можно обобщить точной эмпирической формулой, полученной методом аналитического приближения [9]:

$$\mu = \mu_0 \exp(-0,052 \cdot t^{0,8}), \quad (14)$$

где t – безразмерная температура воды, град. (°C/K); μ_0 – динамическая вязкость воды при 0°C, $\mu_0 = 17,53 \cdot 10^{-3}$ (Па·с).

Пример 4. Рассмотрим закачку отработанной геотермальной воды в пос. Янтарное (АР Крым). Скважина для "обратной" воды расположена на расстоянии 0,5 км от рабочей и имеет такую же глубину и диаметр обсадной трубы. Расход отработанной воды составляет 30 м³/час, т.е. вблизи оптимального значения. Закачивается вода обратно в скважину центробежным электронасосом при давлении 30 атм, поскольку температура "обратной" воды составляет 35°C. При попытке увеличить расход давление на входе в устье резко растет и скважина больше воды уже "не принимает". Это указывает на то, что в прискважинной зоне при расходе воды 30 м³/час изменяется режим фильтрации: ламинарный режим течения в пористом скелете переходит в турбулентный и резко возрастает гидравлическое сопротивление.

Выводы. Проведен анализ современного состояния аналитического описания фильтрации в прискважинной зоне пористого скелета несовершенного вскрытого водоносного коллектора. Установлено, что логарифмический характер

формулы Дюпюи в виде (1) для зависимости притока воды из пласта в одиночную скважину, полученной при решении "плоской задачи фильтрации", не позволяет провести простую и точную оценку гидравлических параметров водоносного коллектора в натуральных условиях. При использовании точного нестационарного решения Тейса для определения проницаемости пласта необходимы данные по пьезопроводимости скелета, определение которого является тоже очень сложной проблемой.

В статье на основе анализа проблемы методом теплогидравлической аналогии найдено стационарное решение задачи трехмерной фильтрации жидкости из водоносного коллектора в фильтр обсадной трубы для случая $L/R \geq 20$. Это позволило получить возможность быстрой и точной оценки проницаемости скелета гидравлического сопротивления прискважинной зоны водоносного коллектора, что необходимо в том числе и для оптимизации режима эксплуатации фонтанирующей скважины.

Проведена оценка значений гидравлической проницаемости скелета водоносного горизонта на глубине 1,1 км и 2,3 км и установлено, что k обратно пропорционально зависит от куба глубины вскрытия пласта.

Впервые проведена оптимизация дебита фонтанирующих скважин геотермальной воды по критерию полезной работы фонтана. Установлено выражение для оптимального дебита. Найдено, что оптимальный приток в скважину (дебит) прямо пропорционален отношению максимального давления в устье скважины и обратно пропорционален гидравлическому сопротивлению пористого скелета пласта в прискважинной зоне водоносного коллектора.

Предложена новая формула, точно аппроксимирующая зависимость динамической вязкости воды от температуры в диапазоне 0-100°C.

1. Басниев К.С. (и др.). Подземная гидромеханика. Изд. 2-е. РГУ НГ – М.: , 2006. – 495 с.

2. Иконникова Л.Н., Золотухин А.Б. Оценка забойного давления фонтанирующей скважины при его значении ниже давления насыщения // Вестник ПНИПУ "Геология. Нефтяное и горное дело". 2012, №2. – С. 61 – 68.

3. Theis C.V. Trans. Amer. Geophys. Union / V 35. – N6. – 1954.

4. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. П-717-80, Москва, Энергоиздат, 1981.

5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Изд. 2-е. – Л.: Энергия. 1976. – 352 с.

6. Шетцле В., Бретт С., Граббс Д., Сеппонен М. Аккумуляция тепловой энергии в водоносных горизонтах. Устройство и практическое применение. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.

7. Милн-Томсон Л.М., Комри Л.Дж. Четырехзначные математические таблицы. Изд. 2-е. М.: "Наука", 1964. 248 с.

8. Варгафтик Н.Б. СПРАВОЧНИК по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е. М.: "Наука", 1972. – 720 с.

9. Луданов К.И. Метод аппроксимации суммы степенного ряда по первым трем членам // Деп. № 763 в УкрНИИ-ИНТИ, – Киев, 1984.

REFERENCES

1. Basniev K.S. (and etc.). Underground hydromechanics. Ed. The 2 nd. РГУ НГ – М.: 2006. – 495 с.

2. Ikonnikova LN, Zolotukhin AB Estimation of the bottomhole pressure of the flowing well at its value below the saturation pressure // Bulletin of the Institute of Geology. Oil and mining. 2012, №2 pp. 61 – 68.

3. Theis C.V. Trans. Amer. Geophys. Union / V 35. – N6. 1954.

4. Guidelines for determining the coefficient of filtration of aquifers by the method of experimental pumping. P. 717 – 80, Moscow, Energoizdat, 1981.

5. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. Calculations of the thermal regime of solids. Ed. The 2 nd. – L.: Energy. 1976. – 352 p.

6. Shetzle V., Brett S., Grubbs D., Sepponen M. Accumulation of thermal energy in aquifers. The device and practical application. Trans. With the English. - Moscow: Energoatomizdat, 1984. – 208 p.

7. Milne-Thomson LM, Comrie L.J. Four-digit mathematical tables. Ed. The 2 nd. Moscow: Nauka, 1964. – 248 p.

8. Vargaftik N.B. DIRECTORY on the thermophysical properties of gases and liquids. Ed. The 2 nd. Moscow: Nauka, 1972. – 720 p.

9. Ludanov K.I. The method of approximating the sum of a power series in the first three terms, Dep. № 763 in UkrNIINTI, – Kiev, 1984.

К.І.Луданов, канд.техн.наук, **В.Г.Олійніченко** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Натурний метод оцінки проникності скелету водоносного колектора та оптимізація дебіту фонтануючих свердловин

У розділі розроблено натурний метод оцінки проникності пористого скелету водоносного колектора на принципово новій основі, тобто на базі стаціонарного рішення, отриманого з використанням тривимірної теплогідравлічної аналогії для фільтрації води в присвердловинній зоні. Крім

того, в роботі проведено оптимізацію дебіту фонтануючих свердловин за максимальною корисною роботою фонтану. Бібл. 9, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: фонтануюча свердловина, геотермальна вода, пористий скелет, водоносний колектор, гідравлічна проникність, рівняння Дюпюї, оптимальний дебіт.

Ludanov K., Oliinichenko V. (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

A natural method of evaluating the permeability of the water-collector skeleton and optimization of the debit of fountain wells

The full-scale method for estimating permeability of the porous skeleton of a water-bearing reservoir based on a new (alternative to the Dupuy logarithmic dependence) formula is developed in the form of a three-dimensional dependence obtained using the heat-hydraulic analogy, and the flow rate of the flowing wells is optimized for the maximum useful work. References 9, table 2, figures 1.

Keywords: gushing well, geothermal water, porous skeleton, water reservoir, hydraulic permeability, Dupuis equation, optimal production rate.

SYNOPSIS

The analysis of the current state of the analytical description of the filtration in the near-well zone of the porous skeleton of an imperfectly opened aquifer has been carried out and it is established that the logarithmic nature of the Dupuy formula in the form (1) for the dependence of the inflow of water from the formation into a single well obtained in solving the "flat filtration problem" Conduct a simple and accurate assessment of the hydraulic parameters of the aquifer in full-scale conditions. When using the exact non-stationary solution of Teys to determine the permeability of the formation, data on the piezoelectric conductivity of the skeleton are required, the determination of which is also a very difficult problem.

In the paper, based on the analysis of the problem by the method of heat-hydraulic analogy, a stationary solution of the problem of three-dimensional filtration of liquid from the aquifer into the casing filter for the case $L/R \geq 20$ has been found. This made it possible to quickly and accurately estimate the permeability of the skeleton of the hydraulic resistance of the well- Which is necessary, among other things, to optimize the operating mode of the flowing well.

The values of the hydraulic permeability of the skeleton of the aquifer at a depth of 1.1 km and 2.3 km have been estimated and it has been established that k depends inversely on the cube of the formation depth.

For the first time, the flow rate of the flowing wells of geothermal water has been optimized by the criterion of useful work of the fountain. The expression for the optimal production rate is established. It was found that the optimal inflow into the well (production rate) is directly proportional to the ratio of the maximum pressure at the wellhead and inversely proportional to the hydraulic resistance of the porous skeleton of the formation in the near-well zone of the aquifer.

Стаття надійшла до редакції 06.04.17

Остаточна версія 30.05.17