*Записки Ленинградского ордена Ленина,
ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 2, 1974 г.*

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СКВАЖИН В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА

Канд. геол.-мин. наук **В. М. МАКСИМОВ**
(Ленинградский горный ин-т)

Взрывные работы, проводимые в скважинах, включают в себя: анализ основ физики взрыва и его механического эффекта; расчеты зарядов ВВ и электровзрывной сети; описание средств и методики проведения взрыва (торпедирование, перфорация); исследование геологических и гидрогеологических факторов, влияющих на взрыв; гидрогеологические расчеты скважин в зоне действия взрыва и технику безопасности при его проведении и др. В статье кратко рассматривается один вопрос сложного процесса взрыва в скважинах — гидрогеологические их расчеты в зоне его действия применительно к условиям проведения взрыва в скважинах для водоснабжения, закачки воды в нефтяной пласт и для извлечения глубинного тепла Земли.

Расчеты скважин для водоснабжения

При разведке подземных вод, залегающих в твердых трещиноватых, трещиновато-пористых и закарстованных горных породах, довольно часто скважины в одном и том же водоносном горизонте, на одних участках его распространения являются водообильными, на других — слабоводообильными или даже практически безводными. Это бывает обусловлено изменением характера трещиноватости горных пород и фациальной изменчивостью их по глубине и простиранию; наличием в одних местах и отсутствием в других дизъюнктивных нарушений; изолированностью трещин и пустот в одних и тех же породах и горизонтах; неравномерностью заполнения трещин песчано-глинистым материалом и рудными образованиями; глинизацией открытых трещин при бурении скважин с применением глинистой промывки.

Малодебитные и практически безводные скважины, как показывает многочисленная практика, после проведения в них взрывов зарядов ВВ, торпед или перфорации становятся водообильными, пригодными для водоснабжения, так как при взрыве в твердых горных породах, слагающих водоносные горизонты и зоны, пройденные или вскрытые скважиной на ту или иную глубину, образуются три взаимосвязанные между собой зоны: сплошного разрушения, трещинообразования и упругих колебаний.

При перфорации в пласте, примыкающем к стенкам скважины, создается ряд отверстий, увеличивающих проницаемость призабойной части скважин. Размеры и форма этих отверстий, как известно, зависят

от типа применяемого перфоратора, его конструктивных особенностей, веса заряда ВВ, а также от характера горных пород (их прочности, твердости, структуры и текстуры, минералого-петрографического состава) и их водонасыщенности.

Перфорация — широко распространенный метод вскрытия водоносных и поглощающих горизонтов, увеличения дебита скважин для водоснабжения, приемистости нагнетательных скважин при законтурном заводнении нефтяных пластов. Она осуществляется перфораторами разных типов: пулевыми, торпедными и кумулятивными [4, 5]. На увеличение дебита скважин оказывают влияние размеры зоны трещинообразования, образующейся при торпедировании и зависящей от величины зарядов ВВ, глубины их расположения, характера горных пород, слагающих водоносный горизонт; при перфорации — от длины, числа и размеров перфорационных отверстий в призабойной части скважин.

Главной целью торпедирования, пулевой и кумулятивной перфорации скважин для водоснабжения является увеличение их дебита за счет улучшения под влиянием взрыва фильтрационных свойств горных пород в призабойной части скважин. Влияние торпедирования на дебиты скважин, при правильной оценке геологических и гидрогеологических условий его проведения, как показывают многие примеры по различным районам СССР, является довольно эффективным. Дебиты разведочных слабоводообильных скважин и эксплуатационных, снизивших в процессе эксплуатации свою производительность, после торпедирования возрастают в 1,5—10 раз и более [7, 8, 13].

Эффективность торпедирования разведочных и эксплуатационных скважин для водоснабжения оценивается по гидрогеологическим расчетам, которые сводятся к определению дебита скважин до и после взрыва при одних и тех же исходных параметрах откачки воды из них. Дебит скважины в условиях жесткой, установившейся радиальной ламинарной фильтрации для напорных и безнапорных водоносных горизонтов определяется по известным формулам Дюпюи:

до взрыва

$$Q' = \frac{2{,}73\,KMS}{\lg \frac{R'}{r_0}}; \tag{1}$$

$$Q'' = \frac{1{,}36\,KS\,(2H - S)}{\lg \frac{R''}{r_0}}; \tag{2}$$

после взрыва

$$Q_1 = \frac{2{,}73\,K_д\,MS}{\lg \frac{R_1}{r_0'}}; \tag{3}$$

$$Q_2 = \frac{1{,}36\,K_д\,S\,(2H - S)}{\lg \frac{R_2}{r_0''}}, \tag{4}$$

где Q', Q'' и Q_1, Q_2 — дебит скважин соответственно до и после взрыва, *м*³/*сек* или *м*³/*сут*; K, $K_д$ — коэффициент фильтрации до и после взрыва, *м*/*сек* или *м*/*сут*; M, H — мощность напорного и безнапорного горизонтов, *м*; S — понижение при откачке до и после взрыва, *м*; R', R'' и R_1, R_2 — радиусы влияния скважины до и после взрыва, *м*; r_0 и r_0', r_0'' — радиусы скважин до и после взрыва, *м*.

Проводя откачку при одном и том же S, коэффициент изменения дебита скважины n_0 для напорного и безнапорного горизонтов соответственно можно выразить формулами

$$n_0 = \frac{Q_1}{Q'} = \frac{q_1}{q'}, \tag{5}$$

$$n_0 = \frac{Q_2}{Q''} = \frac{q_2}{q''}, \tag{6}$$

где q', q'', q_1, q_2 — дебиты скважин при $S=1$.

Из формул (5) и (6) видно, что коэффициент n_0 при торпедировании скважин для водоснабжения может рассчитываться по общим или удельным дебитам их, полученным при одном и том же понижении одинаковых насосном оборудовании и способе замера расхода воды. Об изменении фильтрационных свойств горных пород в призабойной части скважин могут дать представление и графики $S=f(t)$ и $S=f(\ln t)$, построенные по данным наблюдений за восстановлением уровня в скважине до и после взрыва.

Коэффициент n_0 в зависимости от литологического строения водоносных горизонтов изменяется от нуля до нескольких единиц. Он используется для анализа результатов взрыва, при котором возможны четыре случая [8, 11]: 1) когда $n_0 = 0$, торпедирование приводит к полной потере дебита скважины; это объясняется непригодностью водоносных пород для торпедирования (породы с высоким содержанием глинистых частиц, линз и прослойков глин); 2) когда $1 < n_0 > 0$, торпедирование приводит к отрицательным результатам вследствие ошибок, допущенных в оценке водоносности пород при составлении проекта торпедирования (водоносные горизонты с ничтожной водоотдачей, высоким содержанием глинистых частиц, прослоев и линз); 3) когда $n_0 = 1$, торпедирование не дает должных результатов по различным причинам: недостаточная величина заряда ВВ, плохая очистка скважины от шлама и глинистого раствора, глинизация водоносных пород и др.; 4) когда $n_0 > 1$, торпедирование дает положительные результаты, подтверждающие пригодность водоносных пород для торпедирования и правильность методики его проведения.

В первом и втором случаях не требуется повторного торпедирования; в третьем повторное торпедирование, после устранения непригодных для взрыва факторов, может дать положительный результат. При эксплуатации крупнотрещиноватых и сильнозакарстованных водоносных горизонтов с турбулентным режимом движения подземных вод (редкие случаи) скважины, снизившие свою производительность по тем или иным причинам (кольматация трещин и пустот песчано-глинистым осадками, смыкание трещин и др.), могут подвергаться торпедированию, эффективность которого также оценивается с учетом коэффициента n_0, для напорного водоносного горизонта соответственно до и после взрыва

$$Q' = 2\pi KM \sqrt{\frac{S}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R'}}}; \tag{7}$$

$$Q'' = 2\pi K_д H \sqrt{\frac{S}{\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R''}}}; \tag{8}$$

для безнапорного водоносного горизонта соответственно до и после взрыва

$$Q_1 = 2\pi KM \sqrt{\frac{S}{\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{R_1}}}; \tag{9}$$

$$Q_2 = 2\pi K_д H \sqrt{\frac{S}{\frac{1}{r''_0} - \frac{1}{R_2}}}. \tag{10}$$

По коэффициенту n_0 можно анализировать результаты перфорации скважин, выполняемой для увеличения их дебита (при откачках) или приемистой способности (при нагнетаниях). Формулы (1)—(10) справедливы для торпедирования и перфорации разведочных и эксплуатационных скважин, пройденных на месторождениях пресных подземных вод. При разведке и эксплуатации промышленных подземных вод применимы формулы (1)—(6), только в них Q', Q_1 выражают в кубических сантиметрах в секунду; K и $K_д$ в дарси, при этом S надо заменить на ΔP в атмосферах и подставить в знаменателе вязкость воды μ в сантипуазах, которая определяется в зависимости от температуры пласта. Заметим, что торпедирование может применяться при разведке и эксплуатации минеральных лечебных вод, а также при разглинизировании и очистке фильтров скважин, эксплуатирующих месторождение всех видов подземных вод — пресных и минеральных. Для очистки фильтров используют торпеды из детонирующего шнура (ТДШ), это дает удовлетворительные результаты [13].

Расчеты скважин для закачки воды в нефтяной пласт

При разработке нефтяных месторождений с водонапорным режимом пласта для поддержания пластового давления в процессе эксплуатации широко применяется законтурное заводнение, при котором в водяную часть пласта нагнетается вода [6]. Дебит одной нагнетательной скважины определяется по формулам

до взрыва

$$Q' = \frac{2\pi KM(P_с - P_0)}{\xi\mu \ln \frac{R'}{r_0}}; \tag{11}$$

после взрыва

$$Q_1 = \frac{2\pi K_д M(P_с - P_0)}{\xi\mu \ln \frac{R_1}{r'_0}}, \tag{12}$$

где Q' и Q_1 — дебит скважины, *см*^{3}/*сек*; K и $K_д$ — коэффициент проницаемости водяной части пласта, *дарси*; ξ — коэффициент загрязнения призабойной части нагнетательной скважины; μ — коэффициент вязкости воды, *спз*; R', R_1 — радиусы влияния скважины при нагнетании, *см*; r_0, r'_0 — радиусы скважины до и после взрыва, *см*; P_0 — начальное пластовое давление, *ат*; $P_с$ — давление на забое нагнетательной скважины, *ат*,

$$P_с = P_{нас} + \frac{H_с}{10} - P_{тр}$$

($P_{нас}$ — давление на выкиде насоса, *ат*; $H_с$ — глубина скважины; $P_{тр}$ — потеря на трение, определяемая по формуле Вейсбаха-Дарси, *ат*).

Из формул (11) и (12), при одних и тех же значениях $P_с$, P_0, ξ, μ и M, определяется коэффициент изменения дебита нагнетательной скважины при ее торпедировании

$$n_н = \frac{Q_1}{Q'}. \qquad (13)$$

Многочисленные данные по торпедированию нагнетательных скважин свидетельствуют о том, что коэффициент $n_н$ изменяется в пределах от 1 до 2—3, реже более, в зависимости от конструкции забоя скважин, литологической однородности пласта, его естественной трещиноватости и пористости и других факторов. Эти значения коэффициента $n_н$ говорят о небольшой эффективности торпедирования нагнетательных скважин, что объясняется [10] сравнительно большими глубинами их, где возникшие при взрыве трещины, по-видимому, быстро смыкаются после взрыва и приемистость скважин остается такой же, как и до взрыва.

Исследования и практика показывают: для увеличения коэффициента $n_н$ наиболее целесообразна кумулятивная перфорация пластов, вскрытых или пройденных нагнетательными скважинами. Поэтому такой метод увеличения приемистости нагнетательных скважин применяется чаще всего.

Расчеты скважин для извлечения глубинного тепла Земли

Решение проблемы извлечения глубинного тепла Земли связано с проведением мощных взрывов для создания на глубине, в пластах и массивах горных пород, подземных котлов, в которых располагаются нагнетательная (НС) и водоподъемная (ВС) скважины термоциркуляционных систем.[1] Получение теплой воды с помощью таких систем, как показали исследования, проводимые в ЛГИ,[2] является среди других способов (наземные котлы, передвижные атомные станции) наиболее выгодным в экономическом отношении. Выбор и обоснование типа системы, методики гидрогеологических расчетов НС и ВС в зоне действия камуфлетного взрыва во многом определяется геологическими и гидрогеологическими условиями района строительства системы. Поэтому гидрогеологические расчеты скважин в зоне действия взрыва нами рассматриваются отдельно в пласте и массиве горных пород, причем пространственные задачи сводятся к плоским, т. е. решаются в плоскости $XУ$ и XZ.

Системы в пласте горных пород. При изучении движения жидкости в трещиноватых горных породах различают [1]: *а*) чисто трещиноватые горные породы, в которых пористость и проницаемость отдельных блоков весьма малы и основными путями для движения жидкостей являются трещины; *б*) трещиноватые породы, в которых проницаемость в блоках весьма незначительная (ею можно пренебречь), а пористость блоков больше трещиноватости; *в*) породы с двойной пористостью, где пористость и проницаемость сопоставимы между собой, движение жидкостей происходит как по порам, так и трещинам. При мощном взрыве, производимом на большой глубине от поверхности Земли в пласте или

[1] В НС нагнетается холодная вода; из ВС поступает теплая вода, нагретая за счет глубинного тепла Земли.

[2] В ЛГИ исследования по использованию глубинного тепла Земли в народном хозяйстве выполняются под руководством доктора техн. наук проф. Ю. Д. Дядькина.

массиве горных пород, в сфере трещинообразования образуется трещиноватая среда, отвечающая преимущественно первому и второму случаям движения жидкостей в трещиноватых породах.

Пренебрегая пористостью и проницаемостью кусков и обломков горных пород, образовавшихся после взрыва, что вполне допустимо для больших глубин залегания пород, и считая трещиноватость пласта или массива равномерной (до взрыва) и дроблено-трещиноватую среду изотропной или анизотропной в фильтрационном отношении (после взрыва), движение воды в таких средах можно считать аналогичным движению ее в пористых горных породах, что дает возможность фильтрационные задачи, относящиеся к работе термоциркуляционных систем, приближенно решать по уравнениям движения воды в пористой среде.

Движение воды в призабойной части НС и ВС, при нагнетании ее в НС и одновременном отборе из ВС (рис. 1), описывается [2] уравнением суперпозиции фильтрационных полей

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = \frac{Q}{2\pi KM}\left(\ln\frac{R_1}{r_1} - \ln\frac{R_2}{r_2}\right), \qquad (14)$$

где ΔP — перепад давления в точке N при суперпозиции полей, *ат*; ΔP_1 — избыточное давление на устье НС, *ат*; ΔP_2 — депрессия при отборе воды из ВС, *ат*; Q — дебит НС, равный дебиту ВС, *см*^{3}/*сек*; R_1 и R_2 — радиусы влияния НС и ВС; r_1 и r_2 — расстояние точки N от НС и ВС; K — коэффициент проницаемости пласта, *дарси*; M — мощность пласта, *см*.

Решая уравнение (14) при $R_1 = R_2 = R$ (R — радиус влияния ВС при суперпозиции полей) и принимая $r_1 = r_0$; $r_2 = 2\sigma$, с учетом коэффициентов ξ и μ, получим

$$Q = \frac{2\pi KM\Delta P}{\xi\mu \ln\dfrac{2\sigma}{r_0}}, \qquad (15)$$

где ξ — устанавливается опытным путем; μ — определяется по таблице в зависимости от температуры пласта в месте создания подземного котла; 2σ — расстояние между НС и ВС, *см*; r_0 — радиус фильтра в НС и ВС, *см*.

Формула (15) справедлива для расчета дебита ВС в неограниченном пласте, не нарушенном взрывом, в условиях установившейся фильтрации нагнетаемой воды. При мощном камуфлетном взрыве в сфере дробления и трещинообразования горные породы приобретают другие фильтрационные свойства. Коэффициент водопроницаемости в результате взрыва значительно возрастает близ центра взрыва и по мере удаления от него постепенно уменьшается до проницаемости пласта в естественных условиях его залегания. Если принять длинную ось сферы дробления и трещинообразования (высоту подземного котла) равной мощности пласта и расположить ВС близ внешней цилиндрической поверхности котла, то дебит ВС на основе формулы (15) можно рассчитать по формуле

$$Q = \frac{2\pi K_д MP}{\xi\mu \ln\dfrac{2\sigma}{r_0}}, \qquad (16)$$

где $K_д$ — коэффициент проницаемости пород в зоне действия взрыва, *дарси* (определяется по данным опытных нагнетаний).

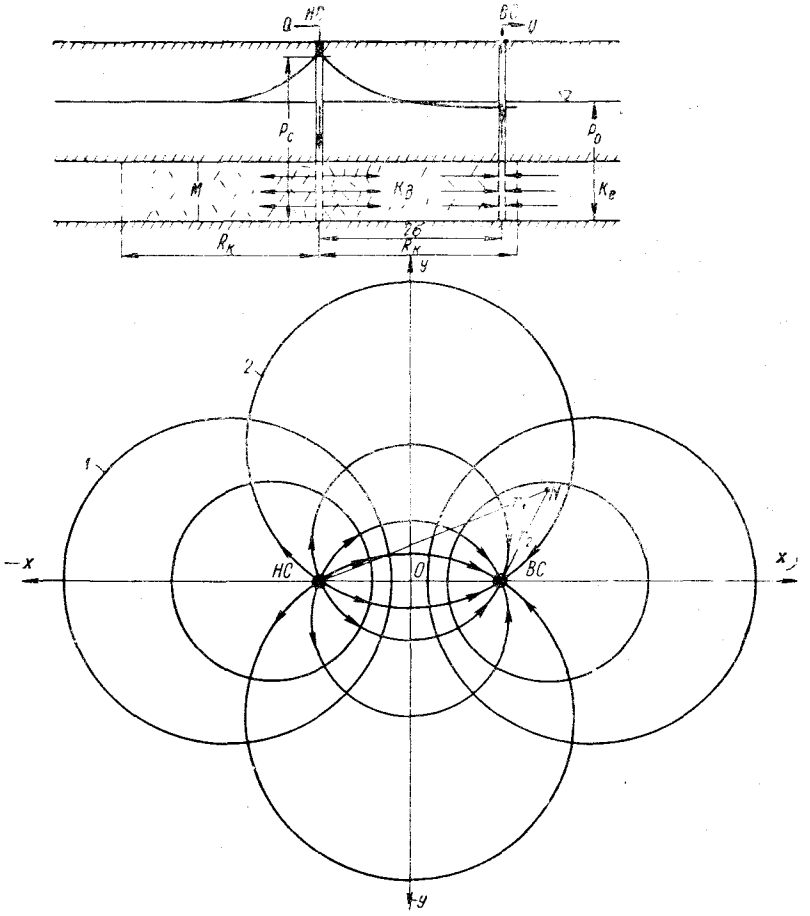


Рис. 1. Схема нагнетания воды в пласт, нарушенный камуфлетным взрывом

1 — эквипотенциальные линии; *2* — линии тока воды. $R_к$ — граница подземного котла; K_e — коэффициент проницаемости пород пласта в естественных условиях его залегания (до взрыва); мощность пласта M (равна высоте подземного котла)

Формула (16) применима для подземных котлов при фильтрационной изотропии горных пород в них. При фильтрационной анизотропии пород в котле, форма которого представляет собой эллипсоид (рис. 2), исходное уравнение движения нагнетаемой воды в плоскости XZ имеет вид

$$K_{д_1}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + K_{д_2}\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \tag{17}$$

где $K_{д_1}$ и $K_{д_2}$ — коэффициенты проницаемости пород по направлению осей X и Z.

Решая уравнение (17) через систему координат в преобразованном виде и учитывая граничные условия, получим для определения дебита НС при расположении ее, как показано на рис. 2, и нагнетании воды в водоносные породы следующую формулу

$$Q = \frac{2\pi l\sqrt{K_{д_1}K_{д_2}}\,\Delta P}{\xi\mu \ln\dfrac{R_к}{r_0}}, \tag{18}$$

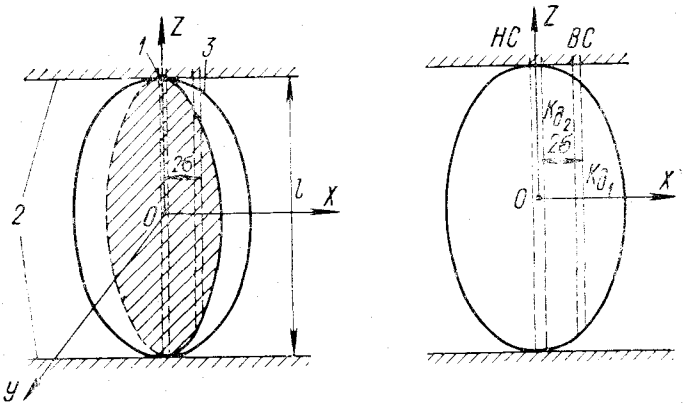


Рис. 2. Схема нагнетания воды в подземный котел эллипсоидальной формы

1 — нагнетательная скважина; *2* — верхний и нижний водонепроницаемые пласты; *3* — водоподъемная скважина

где $\Delta P = P_c - P_0$ (P_0 принимается равным гидростатическому, *ат*); $R_к$ — радиус подземного котла,

$$R_к = C\sqrt[3]{W},$$

(*C* — коэффициент, зависящий от характера породы, слагающей пласт, ее твердости, плотности, прочности на разрыв, трещиноватости, литолого-петрографического состава; *W* — вес тротилового заряда, *кг*).

Дебит ВС, расположенной на расстоянии 2σ от НС, составит

$$Q = \frac{2\pi l \sqrt{K_{д_1} K_{д_2}}\,\Delta P}{\xi\mu \ln \dfrac{2\sigma}{r_0}}. \qquad (19)$$

При *n* водоподъемных скважин суммарный дебит системы составит

$$Q'_{сум} = Q'n, \qquad (20)$$

$$Q''_{сум} = Q''n, \qquad (21)$$

где $Q'_{сум}$ и $Q''_{сум}$ — соответственно суммарный дебит системы при фильтрационной изотропии и анизотропии горных пород в подземном котле, Q' и Q'' — дебиты водоподъемных скважин системы.

Следует отметить, что гидрогеологические расчеты системы с учетом фильтрационной анизотропии горных пород в подземном котле достоверней отражают действительные условия фильтрации воды в них, нежели расчеты по среднему коэффициенту проницаемости, входящему в формулы, полученные методом суперпозиции фильтрационных полей. В последнем случае дебиты НС и ВС, как показывают расчеты конкретных систем, при одних и тех же исходных параметрах получаются завышенными.

Гидрогеологические расчеты системы в массиве горных пород разработаны приближенно при расположении НС в центральной части подземного котла. Такое расположение НС обеспечивает наименьшую утечку воды во внешнюю область массива в период работы системы.

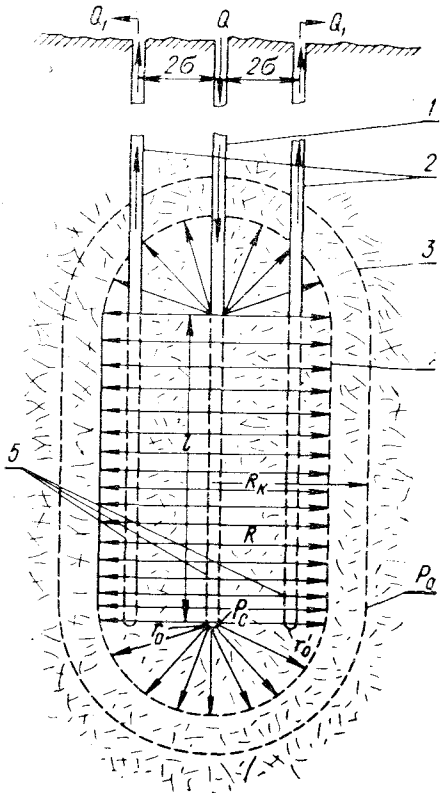


Рис. 3. Схема нагнетания воды в массив горных пород

1 — нагнетательная скважина; *2* — водоподъемная скважина; *3* — подземный котел, имеющий форму цилиндра с двумя полусферами; *4* — схема фильтрации в плоскости; *5* — фильтры НС и ВС

При нагнетании воды в массив горных пород, нарушенный взрывом, исходными уравнениями, описывающими жесткую фильтрацию в подземном котле, имеющем форму цилиндра с двумя полусферами (рис. 3), являются [3]:

$$Q = -K_д (4\pi r^2 + 2\pi r l) \frac{\partial P}{\partial x}; \qquad (22)$$

$$Q = m (4\pi r^2 + 2\pi r l) \frac{\partial r}{\partial t}, \qquad (23)$$

где m — коэффициент трещиноватости пород, определяемый по результатам опытных нагнетаний [12]; t — время нагнетания.

Если допустить, что сфера фильтрации при нагнетании повторяет форму котла; поверхности полусфер и цилиндра являются поверхностями равного давления; фильтрация из скважины происходит по радиальным прямым; коэффициент проницаемости в котле является средним, постоянным; давление на внешней поверхности котла равняется начальному пластовому давлению; сила тяжести и инерции воды не учитываются, то, решая уравнения (22) и (23), получим формулы для определения дебита НС и ВС. Дебит НС при установке в котле фильтра с двумя полусферами и длиной l [9]

$$Q = \frac{2\pi K_д l (P_c - P_0)}{\xi\mu \ln \dfrac{R_к (2r_0 + l)}{r_0 (2R_к + l)}}. \qquad (24)$$

То же, но при установке в котле фильтра с одной полусферой[1] и длиной l:

$$Q = \frac{2\pi K_д l (P_c - P_0)}{\xi\mu \ln \dfrac{R_к (r_0 + l)}{r_0 (R_к + l)}}. \qquad (25)$$

Формулы (24) и (25) справедливы при условиях фильтрационной изотропии пород в котле — во всех направлениях от НС; установившейся фильтрации; отсутствии в массиве региональных тектонических трещин, связанных с котлом; постоянстве коэффициента ξ в зоне влияния НС; однотипности фильтров НС и ВС.

Термоциркуляционная система может работать при заданном расходе (Q=const) или постоянном давлении нагнетания ($P_п$=const).

[1] Такой фильтр является более приемлемым для установки в НС и ВС.

В связи с этим радиус влияния НС на любой период времени нагнетания определяется по различным формулам, полученным из уравнений (22) и (23). Для определения R при $Q=\text{const}$ из формулы (23) получим (фильтр с двумя и одной полусферами)

$$R=\sqrt{\frac{Qt}{\pi m\xi\mu\,(l+1{,}33R)}}\;; \tag{26}$$

$$R=\sqrt{\frac{Qt}{\pi m\xi\mu\,(l+0{,}66R)}}\;. \tag{27}$$

Для определения R при $P_{\text{н}}=\text{const}$ из совместного решения уравнений (22) и (23) получим (фильтр с двумя и одной полусферой)

$$R=\sqrt{\frac{K_{\text{д}}l(P_{\text{с}}-P_{\text{о}})t}{\xi\mu\left(\frac{l}{2}+\frac{2}{3}R\right)m\ln\frac{R(2r_{\text{о}}+l)}{l_{\text{о}}(2R+l)}}}\;; \tag{28}$$

$$R=\sqrt{\frac{K_{\text{д}}l(P_{\text{с}}-P_{\text{о}})t}{\xi\mu\left(\frac{l}{2}+\frac{R}{3}\right)m\ln\frac{R(r_{\text{о}}+l)}{r_{\text{о}}(R+l)}}}\;. \tag{29}$$

Из уравнений (26)—(29), которые решаются графически, видно, что при $Q=\text{const}$ радиус влияния НС возрастает с увеличением Q и уменьшением вязкости воды μ; при $P_{\text{н}}=\text{const}$ радиус влияния НС возрастает с увеличением $K_{\text{д}}$, давления нагнетания, уменьшением вязкости воды μ. В обоих случаях на величину радиуса влияния НС большое влияние оказывает продолжительность процесса нагнетания.

Режимы работы систем и расчет утечки. Режим работы систем определяется соотношением $P_{\text{с}}$ и P_0. В зависимости от него возможны три режима. Первый — когда $P_{\text{с}}=P_0$. При этом режиме исключается влияние на работу системы внешней области питания пласта или массива. Второй — когда $P_{\text{с}}>P_0$. В этом случае часть нагнетаемой воды будет уходить во внешнюю область пласта или массива. Третий — когда $P_{\text{с}}<P_0$. Этот режим характерен только для периода прекращения подачи воды в НС, что вызовет приток воды к ВС из внешней области пласта или массива.

Таким образом, утечка воды во внешнюю область пласта или массива может быть только при втором режиме работы системы. Величина утечки воды в системе, сооружаемой в пласте, определяется по формулам

$$Q_{\text{у}}=\frac{2\pi K_{\text{е}}M\,\Delta P}{\xi\mu\ln\frac{R_{\text{о}}}{2\sigma}}\;; \tag{30}$$

$$Q_{\text{у}}=\frac{2\pi K_{e}M\,\Delta P}{\xi\mu\ln\frac{R_{t}}{2\sigma}}\;, \tag{31}$$

где K_e — коэффициент проницаемости пород в ненарушенной взрывом части пласта или массива, *дарси*; R_0 — радиус области питания пласта

(устанавливается по результатам геологической и гидрогеологической разведки района строительства системы); $R_t = 1{,}5\sqrt{at}$ — радиус влияния НС на любой период времени (a — коэффициент пьезопроводности пласта; t — продолжительность работы системы на рассматриваемый период времени).

Величина утечки воды в системе, сооружаемой в массиве, по аналогии с пластом приближенно может быть рассчитана по формуле

$$Q_y = \frac{2\pi K_e l \Delta P}{\xi\mu \ln \dfrac{R_t(4\sigma + l)}{2\sigma(2R_t + l)}}. \qquad (32)$$

Поскольку K_e на больших глубинах обычно составляет 10^{-4}—10^{-5} *дарси*, утечка воды во внешнюю область пласта или массива составляет от дебита НС доли и единицы процентов.

Гидравлические расчеты систем, включающие в себя определение давления на устье НС и ВС, забойного давления в НС, потерь давления в НС и ВС, производятся по известным формулам гидравлики, широко применяемым в буровой и нефтепромысловой практике.

В заключение отметим, что системы будут эксплуатироваться в течение довольно длительного времени (10—20 лет), поэтому бесперебойное обеспечение их водой в необходимом количестве и надежного качества является важной задачей в решении проблемы использования глубинного тепла Земли. Для водоснабжения систем могут быть использованы пресные поверхностные и подземные воды, которые в количественном и качественном отношениях должны оцениваться на основе специальных гидрогеологических исследований, предшествующих строительству систем.

Выводы

1. Торпедирование и перфорация разведочных и эксплуатационных скважин, пройденных на пресные, минеральные, промышленно-ценные подземные воды, являются эффективными методами увеличения их дебита. Эффективность торпедирования и перфорации вполне может оцениваться по коэффициенту n_0, получаемому из отношения дебитов скважин до и после их торпедирования или перфорации.

2. При нагнетании воды в нефтяной пласт результаты торпедирования и перфорации анализируются по коэффициенту $n_н$, характеризующему изменение приемистости нагнетательных скважин до и после их торпедирования или перфорации.

3. Гидрогеологические расчеты скважин систем извлечения глубинного тепла Земли определяются геологическими и гидрогеологическими условиями районов их строительства. Они разделяются на расчеты в пластах и массивах горных пород, причем вследствие принятых допущений являются приближенными, но вполне применимыми для инженерных расчетов систем.

4. При расчетах систем в пластах для определения дебита НС и ВС, радиуса нагнетания, утечки воды могут применяться формулы (16), (18)—(21), (30), (31); в массиве — формулы (24)—(29) и (32).

5. Гидрогеологические расчеты скважин в зоне действия взрыва — это начало формирования нового раздела в специальной, вернее инженерной, гидрогеологии и динамике подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бан А. и др. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М., Гостоптехиздат, 1962.
2. Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М., «Мир», 1971.
3. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1962.
4. Вицени Е. М. Кумулятивные перфораторы, применяемые в нефтяных и газовых скважинах. М., «Недра», 1971.
5. Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам в скважинах. Под ред. Н. Г. Григоряна. М., «Недра», 1970.
6. Крылов А. П. и др. Проектирование разработки нефтяных месторождений. М., Гостоптехиздат, 1962.
7. Ловля С. А. Взрывные работы в водозаборных скважинах. М., «Недра», 1971.
8. Максимов В. М. Торпедирование гидрогеологических скважин в целях увеличения их водообильности. Зап. ЛГИ, т. 27, вып. 2. Л., 1952.
9. Максимов В. М. Приближенные гидродинамические расчеты систем для использования глубинного тепла Земли в области многолетней мерзлоты. Изд. МГУ, 1970.
10. Муравьев И. М., Абдулин Ф. С. Освоение и исследование нагнетательных скважин. М., Гостоптехиздат, 1963.
11. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 2. Под ред. В. М. Максимова. Л., «Недра», 1967.
12. Труды II Всесоюзного совещания по трещинным коллекторам нефти и газа. М., «Недра», 1965.
13. Шлейферт М. А., Вольницкая Э. М. Увеличение дебита водяных скважин взрывом. М., «Недра», 1970.