СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ И БУРЕНИЯ СКВАЖИН

PRESENT-DAY PROBLEMS OF GEOLOGICAL EXPLORATION AND WELL DRILLING

УДК 622.257.122

В.С.ЛИТВИНЕНКО, *д-р техн. наук, профессор, ректор, spmi@mail.wplus.net*
Н.И.НИКОЛАЕВ, *д-р техн. наук, профессор, spmi@mail.wplus.net*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.S.LITVINENKO, *Dr. in eng. sc., professor, rector, spmi@mail.wplus.net*
N.I.NIKOLAEV, *Dr. in eng. sc., professor, spmi@mail.wplus.net*
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ОБСАДНЫХ КОЛОНН ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

В статье представлены результаты исследований, связанных с разработкой математической модели цементирования скважин в высокопроницаемых горных породах при бурении и ремонте нефтяных и газовых скважин.

***Ключевые слова*:** скважина, буровой раствор, тампонажный раствор, обсадная колонна.

MATHEMATIC MODEL OF WELL CEMENTATION WHEN CONSTRUCTING AND OPERATING OF OIL AND GAS WELLS

In this article were shown research results connected with development of mathematical model of cementation in high-permeability rock at drilling and repair of oil and gas wells.

***Key words*:** well, drilling mud, plugging slurry, casing.

Практика сооружения нефтяных скважин в сложных условиях (чередование интервалов с различными пластовыми давлениями, близкое расположение друг от друга водоносных и нефтеносных горизонтов, низкие градиенты давлений гидроразрыва пластов, бурение скважин с большими отходами от вертикали и повышенные требования к охране недр) показывает, что не всегда обеспечивается необходимый уровень качества их строительства. Основными проблемами при креплении скважин в таких условиях являются поглощения тампонажных растворов, недоподъем цементного раствора до проектной высоты, недостаточно качественное разобщение пластов и возникновение вследствие этого межпластовых перетоков.

При составлении математической модели процесса цементирования обсадной колонны в условиях поглощения тампонажного раствора допускались упрощения, не искажающие физическую сущность изучаемых процессов, и позволяющие получить простые и достаточно точные формулы. Необходимо отметить, что полученные в данном разделе аналитические выражения справедливы будут для любых тампонажных смесей, обладающих способностью интенсивно увеличивать объем в процессе фильтрации в поглощающий интервал.

При постановке задачи исследования приняты следующие допущения:

1. Движение тампонажной смеси в поглощающей среде принимается неразрывным, установившимся, удовлетворяющим уравнению равновесия

$$\frac{\partial u}{dx}+\frac{\partial v}{dy}+\frac{\partial w}{dz}=0,$$

где u, v и w – компоненты полной скорости движения жидкости в направлениях соответствующих координатных осей.

2. При полном, а тем более при катастрофическом поглощении раствора, движение естественных подземных вод оказывает весьма малое влияние на фильтрационный поток из скважины, поэтому вязкостью вытесняемой воды можно пренебречь.

3. В основу исследования принято уравнение линейной фильтрации Дарси.

4. Движение тампонажной суспензии по каналам проницаемого пласта прекращается, когда геометрические размеры набухающих компонентов смеси становится равным эквивалентному диаметру пористой среды или среднеобъемной раскрытости трещин, что в общем определяет величину «пустотности» массива.

Исходя из классической постановки задачи, представленной на рис.1 и рис.2, видно, что для успешного цементирования обсадной колонны в условиях поглощения цементного раствора необходимо знать два основных параметра процесса изоляции поглощающего пласта тампонажным составом: необходимую репрессию на пласт (ΔP) и необходимый объем тампонажной смеси (V).

Тогда указанную выше задачу можно сформулировать в виде следующей зависимости, связывающей геометрию поглощающего пласта, структурно-реологические характеристики тампонажного состава и бурового раствора, технологические параметры процесса цементирования обсадной колонны:

$$\Delta P = f\begin{cases} k_{\text{п}}, h, r, r_{\text{с}}, m_0, \delta; \\ \gamma, \rho, \mu, t_{\text{к}}; \\ P_{\text{наг}}, P_{\text{вых}}, Q, k_{\text{ф}}, \end{cases} \qquad (1)$$

где ΔP – перепад давления со стороны скважины, необходимый для нагнетания тампонажного состава в поглощающий интервал, Па; $k_{\text{п}}$ – коэффициент проницаемости, м^2; h – мощность поглощающего интервала, м; F – площадь фильтрации, м^2; r – текущий радиус, м; $r_{\text{с}}$ – радиус скважины, м; $R_{\text{max.}}$ – максимальный радиус распространения тампонажной смеси, м; γ – удельный вес тампонажной смеси, Н/м^3; ρ – плотность бурового раствора, кг/м^3; μ – пластическая вязкость тампонажной смеси, Па·с; $t_{\text{к}}$ – время за которое тампонажная смесь достигает предельной консистенции, при которой теряется подвижность (30 Вс), с; $P_{\text{наг}}$ – давление нагнетания на устье, Па; $P_{\text{вых}}$ – давление на выходе из затрубного пространства, Па; Q – расход тампонажной смеси, м^3/с; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации, м/с.

Согласно расчетной схемы (рис.2) во время подхода тампонажной смеси к поглощающему горизонту на контуре питания необходимо создать избыточное давление путем регулировки дроссельной заслонки на выходе бурового раствора из скважины.

Тогда

$$\Delta P = P_{\text{наг}} - P_{\text{вых}} - P_{\text{г.с}}, \qquad (2)$$

где ΔP – репрессия на пласт; $P_{\text{г.с}}$ – гидростатическое давление столба бурового раствора над поглощающим интервалом.

Поскольку

$$P_{\text{г.с}} = \rho g(L-l), \qquad (3)$$

найдем, подставив формулу (3) в формулу (2),

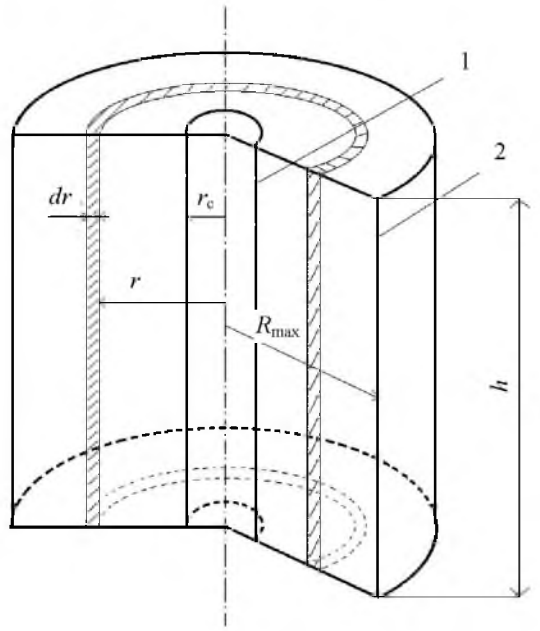


Рис.1. Расчетная схема осложненного интервала скважины

1 – ствол скважины в зоне осложнения; 2 – контур тампонирования поглощающего интервала скважины дросселирования

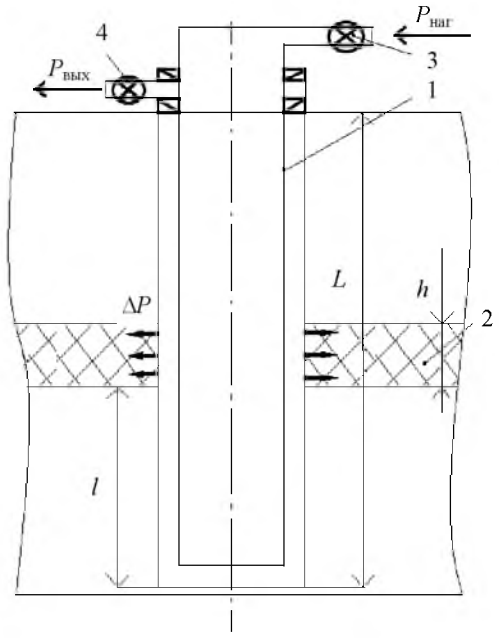


Рис.2. Схема закачки тампонажной смеси в поглощающий пласт

1 – обсадная колонна; 2 – поглощающий интервал; 3 – линия нагнетания цементного раствора; 4 – линия дросселирования

$$\Delta P = P_{наг} - P_{вых} - \rho g(L - l). \quad (4)$$

В соответствии с линейным законом фильтрации общий расход жидкости через единицу площади

$$Q = \frac{k_п F}{\mu}\frac{dP}{dr}. \quad (5)$$

С учетом того, что

$$F = 2\pi r h. \quad (6)$$

и разделив переменные, будем иметь

$$dP = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\frac{dr}{r}. \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) получим

$$P = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln r + c. \quad (8)$$

С учетом граничных условий: при $r = R_c$ $P = P_c$; при $r = R_{max}$ $P = P_{пл}$.

Будем иметь:

$$P_{пл} = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln R_{max} + c; \quad (9)$$

$$P_c = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln r_c + c, \quad (10)$$

где P_c – давление в скважине, Па; $P_{пл}$ – пластовое давление, Па.

Вычтем из уравнения (9) уравнение (10), получим:

$$\Delta P_1 = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln\frac{R_{max}}{r_c}. \quad (11)$$

Очевидно, что на контуре питания поглощающего пласта $\Delta P = \Delta P_1$.

Приравняем уравнение (4) и уравнение (11):

$$P_{наг} - P_{вых} - \rho g(L - l) = \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln\frac{R_{max}}{r_c}. \quad (12)$$

Тогда

$$P_{вых} = P_{наг} - \rho g(L - l) - \frac{Q\mu}{k_п 2\pi h}\ln\frac{R_{max}}{r_c}. \quad (13)$$

Поскольку

$$k_ц = k_ф\frac{\mu}{\gamma}, \quad (14)$$

то, подставив уравнение (14) в уравнение (13) получим:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{наг}} - \rho g(L-l) - \frac{Q\mu}{2\pi h k_{\text{ф}}} \ln \frac{R_{\max}}{r_{\text{с}}}. \quad (15)$$

Известно, что

$$k_{\text{ф}} = \frac{v_{\text{ф}}}{J}, \quad (16)$$

где $v_{\text{ф}}$ – скорость фильтрации, м/с; J – напорный градиент.

Подставив уравнение (16) в уравнение (15) получим:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{наг}} - \rho g(L-l) - \frac{Q\mu J}{2\pi h v_{\text{ф}}} \ln \frac{R_{\max}}{r_{\text{с}}}. \quad (17)$$

Рассматривая временной параметр процесса можно записать:

$$t_{\text{конс}} = t_{\text{вниз}} + t_{\text{вверх}} + t_{\text{ф}}, \quad (18)$$

где $t_{\text{конс}}$ – время загустевания тампонажной смеси; $t_{\text{вниз}}$ – время прокачивания тампонажной смеси внутри колонны обсадных труб; $t_{\text{вверх}}$ – время подъема тампонажной смеси до поглощающего интервала; $t_{\text{ф}}$ – время фильтрации тампонажной смеси по поглощающему пласту.

Тогда, исходя из того что

$$v_{\text{ф}} = \frac{R_{\max}}{t_{\text{ф}}} \quad (19)$$

с учетом уравнения (18) окончательно будем иметь:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{наг}} - \rho g(L-l) - \\ - \frac{Q\gamma J(t_{\text{конст}} - t_{\text{з}})}{2\pi h \alpha R_{\max}} \ln \frac{R_{\max}}{r_{\text{с}}}, \quad (20)$$

где $t_{\text{з}} = t_{\text{вниз}} + t_{\text{вверх}}$ – время закачки тампонажной смеси до пласта; α – коэффициент учитывающий криволинейность каналов фильтрации жидкости, равный отношению криволинейной траектории движения жидкости к криволинейному радиусу ее распространения ($\alpha \geq 1{,}0$).

Таким образом, полученное уравнение (20) позволяет рассчитать необходимую репрессию, создаваемую на уровне поглощающего интервала при прокачке тампонажной смеси по затрубному пространству.

С технологической точки зрения наибольший практический интерес представляет решение задачи о необходимом объеме тампонажной смеси для ликвидации поглощения в трещиноватом массиве пород.

Согласно расчетной схеме (рис.1 и рис.2) при нагнетании в поглощающий пласт тампонажной смеси, ее расход на границе $r = r(t)$

$$Q = \frac{2\pi m_0 h r dr}{dt}, \quad (21)$$

где r – текущий радиус продвижения контура питания по поглощающему пласту, м; m_0 – пустотность трещиноватого массива.

Граничными условиями уравнения (21) будут

$$t = 0;\ r = r_{\text{с}};$$

$$t = t_{\text{ф}};\ r = R_{\max};$$

где $t_{\text{ф}}$ – время фильтрации тампонажной смеси вплоть до начала загустевания.

Тогда, решая уравнение (11) относительно объема тампонажной смеси, получим:

$$V = 2\pi m_0 h(R_{\max}^2 - r_{\text{с}}^2). \quad (22)$$

Максимальный радиус распространения тампонажной смеси по проницаемому коллектору будет зависеть от скорости ее фильтрации и времени движения по пласту, т.е.

$$R_{\max} = v_{\text{ф}} t_{\text{ф}}. \quad (23)$$

С учетом уравнения (23) уравнение (22) преобразуем к виду

$$V = 2\pi m_0 h[(v_{\text{ф}} t_{\text{ф}}) - r_{\text{с}}^2]. \quad (24)$$

Очевидно, что при достижении времени начала загустевания тампонажной смеси ее продвижение по пласту прекратится, т.е.

$$t_{\text{к}} = t_{\text{зак}} + t_{\text{ф}}. \quad (25)$$

Тогда

$$t_{\text{ф}} = t_{\text{к}} + t_{\text{зак}}. \quad (26)$$

По закону Дарси имеем:

$$v_{ф} = k_{ф} J. \quad (27)$$

С учетом выражений (26) и (27) уравнение (24) примет следующий вид:

$$V = 2\pi m_0 h\{[k_{ф} J(t_{к} - t_{зак})]^2 - r_{с}^2\}. \quad (28)$$

Коэффициент фильтрации $k_{ф}$ связан с коэффициентом проницаемости $k_{п}$ следующим соотношением:

$$k_{п} = k_{ф} \frac{\mu}{\gamma}. \quad (29)$$

Тогда уравнение (28) примет вид:

$$V = 2\pi m_0 h\left\{\left[\frac{k_{ф} J\gamma}{\mu}(t_{к} - t_{зак})\right]^2 - r_{с}^2\right\}. \quad (30)$$

Для трещиноватого массива

$$k_{п} = \frac{\alpha\Gamma\delta^3}{12}, \quad (31)$$

где α – коэффициент криволинейности трещин; Γ – густота трещин, 1/м; δ – среднеобъемная раскрытость трещин, м.

Подставив уравнение (31) в (30) получим:

$$V = 2\pi m_0 h\left\{\left[\frac{\alpha\Gamma\delta^3 J\gamma}{12\mu}(t_{к} - t_{зак})\right]^2 - r_{с}^2\right\}. \quad (32)$$

Элементарный анализ уравнения (32) показывает, что радиусом скважины (r_c) можно пренебречь без существенного ущерба для точности инженерных расчетов. В этом случае ствол скважины в зоне поглощения можно представить как линейный источник питания.

Тогда выражение (32) примет вид:

$$V = 2\pi m_0 h\left[\frac{\alpha\Gamma\delta^3 J\gamma}{12\mu}(t_{к} - t_{зак})\right]^2. \quad (33)$$

Так как время закачки тампонажной смеси зависит от глубины скважины (L) и расстояния от забоя до подошвы поглощающего пласта (l_1), а так же скорости ее движения внутри колонны (v_k) и в кольцевом пространстве ($v_{k.n.}$), то

$$t_{зак} = \frac{L}{v_{к}} + \frac{l}{v_{к.п}}. \quad (34)$$

Тогда окончательно выражение (33) примет вид:

$$V = 2\pi m_0 h\left[\frac{\alpha\Gamma\delta^3 J\gamma}{12\mu}\left(t_{к} - \frac{L}{v_{к}} - \frac{l}{v_{к.п}}\right)\right]^2. \quad (35)$$

Как видно из структуры формулы (35), объем тампонажной смеси, необходимой для изоляции поглощающего пласта, возрастает при увеличении пустотности трещиноватого массива, среднеобъемной раскрытости и густоты трещин и уменьшается при увеличении вязкости самой тампонажной смеси.

Аналитические зависимости (20) и (35) позволяют рассчитать потребный объем тампонажного материала для ликвидации поглощения известной интенсивности и давление необходимое для продавливания тампонажной смеси по поглощающему пласту, создаваемое путем перекрытия затрубного пространства на цементировочной головке.

Уравнение (20) дает возможность оценить степень влияния гидравлического напорного градиента J совместно с коэффициентом учитывающим криволинейность каналов фильтрации жидкости при известных их величинах.

Выражение (20) позволяет проводить расчеты необходимого давления с учетом плотности тампонажной смеси и радиуса ее проникновения необходимого для предотвращения поглощения цементного раствора при креплении обсадной колонны.

Математическая зависимость (35) объединяет технологические параметры процесса тампонирования V, J, $v_{к}$ и $v_{к.п}$ с геометрическими характеристиками поглощающего пласта h, m_0, его проницаемостью $k_{п}$ и структурно-реологическими параметрами тампонажной смеси.

Поскольку уравнение (35) является обобщенным, был проведен его анализ с целью определения значимых факторов и границ их применимости, на основании которого были получены следующие выводы:

• основными факторами, определяющими потребный расход тампонажной смеси на основе портландцемента и расширяющейся полимерной добавки, являются густота распространения трещин, мощность поглощающего интервала, его пустотность, величина среднеобъемной раскрытости трещин, структурно-реологические характеристики тампонажной суспензии;

• на эффективность изоляционных работ существенное влияние оказывает величина поровых каналов δ, причем при $\delta \leq 1{,}5$ мм и небольших величинах вязкости применение рассматриваемых тампонажных смесей малоэффективно;

• рациональная область применения расширяющихся тампонажных смесей может быть ограничена показателями вязкости ($\mu \geq 0{,}2$Па·с) и размерами каналов поглощающего пласта ($\delta \leq 1{,}5$ мм);

• расчетный анализ полученной математической зависимости доказывает ее применимость для инженерных расчетов в диапазоне реальных значений величин входящих в нее показателей.