

УДК 622.257.1

САЛАМАТОВ М.А. (Уральская государственная горно-геологическая академия, г. Екатеринбург), САЛАМАТОВ С.М. (Уральская горно-металлургическая компания, г. Екатеринбург)

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТАМПОНАЖА ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В статье представлены результаты определения аналитического выражения обобщенного закона инъекции (фильтрации) применительно к тампонажу трещиноватых горных пород. Предложенное общее дифференциальное уравнение инъекционного потока вязкопластичной жидкости полностью характеризует гидродинамические процессы тампонажа трещиноватого пласта горной породы и может быть использовано для математического описания процесса формирования инъекционного потока тампонажного раствора нагнетаемого через скважину по зажимной схеме.

Аналитические исследования процесса тампонажа трещиноватых горных пород в гидродинамической постановке необходимо производить при определенной схематизации процесса инъекции, которая предусматривает:

- выбор модели трещиноватой горной породы, подлежащей тампонажу, и установление ее структурной и гидродинамической характеристик;
- определение характера движения потока во времени (стационарный, нестационарный) и обоснование возможности изучения нестационарного процесса методом последовательной смены стационарных состояний;
- задание пространственной структуры потока и обоснование возможности его аппроксимации плоским потоком;
- выбор математической модели потока в соответствии с режимом инъекции (жесткий, упругий) на основании дифференциальных уравнений движения;
- выбор и обоснование граничных условий инъекционного потока.

Методика исследований вязкопластичных инъекционных потоков в трещиноватых горных породах, учитывающая законы движения вязкопластичных жидкостей в элементарных трещинах и структуру трещиноватой среды, позволяет получить гидродинамические модели инъекционных потоков, в основе которых лежит обобщенный нелинейный закон инъекции (фильтрации). Поэтому, при разработке гидродинамики инъекционных потоков вязкопластичных тампонажных сред необходимо, прежде всего, получить аналитическое выражение обобщенного закона инъекции (фильтрации) применительно к тампонажу трещиноватых горных пород.

Впервые обобщенный закон фильтрации Дарси был получен в феноменологической теории фильтрации вязкопластичных жидкостей в пористых горных породах А.Х. Мирзаджазаде [1] в виде уравнения скорости фильтрации:

$$v = \frac{K_{пр}}{\eta} \left(1 - \frac{P_0}{|gradP|} \right) gradP, \quad (1)$$

где $K_{пр}$ — коэффициент проницаемости горной породы; η — пластическая (структурная) вязкость вязкопластичной жидкости; P_0 — модуль градиента давле-

ния, расходуемого на преодоление предельного напряжения сдвига; P — перепад внешнего давления.

Полученные на основании (1) выражения обобщенного закона фильтрации Дарси в развернутом виде не могут быть использовано для описания инъекционных потоков вязкопластичных сред в трещиноватых горных породах, так как не отражает их структурные особенности.

Тампонаж трещиноватых горных пород происходит при структурном режиме движения тампонажного раствора в трещинах. Этот процесс в трещиноватых горных породах можно описать системой основных дифференциальных уравнений движения вязкопластичной жидкости Генки-Ильюшина [2]. На основании этой системы, в пределах $K_{\phi} \leq 100$ м/сутки получены уравнения скорости фильтрации (инъекции) вязкопластичного тампонажного раствора v_x, v_y, v_z , которые в общем виде имеют следующее выражение:

$$v = \frac{K_{\phi}^*}{\gamma} \text{grad} p, \quad (2)$$

где K_{ϕ}^* — коэффициент фильтрации (инъекции); γ — удельный вес вязкопластичного тампонажного раствора.

В общем виде уравнение скорости фильтрации (инъекции) вязкопластичной жидкости (2) является обобщенным законом Дарси. Коэффициент фильтрации (инъекции) трещиноватой среды K_{ϕ}^* характеризует закономерности движения вязкопластичной жидкости в трещиноватых горных породах. Аналитическое выражение K_{ϕ}^* в (2) отражает особенности движения вязкопластичной жидкости, обусловленные ее реологическими свойствами. Поэтому по своему содержанию K_{ϕ}^* принципиально отличается от коэффициента фильтрации K_{ϕ} проницаемых горных пород при фильтрации вязких жидкостей.

Линейный закон Дарси, используемый при аналитических исследованиях фильтрации вязких жидкостей в пористых и трещиноватых горных породах, записывается в форме уравнения скорости фильтрации:

$$v = -K_{\phi} \frac{dH}{dl} = K_{\phi} J, \quad (3)$$

где J — градиент давления.

Аналитическое выражение коэффициента фильтрации K_{ϕ} в трещиноватых горных породах, характеризующее условие фильтрации в зависимости от свойств фильтрующейся вязкой жидкости и величины раскрытия трещин, получается из уравнений среднеобъемной скорости движения в трещиноватой горной породе и в одиночной трещине, в следующем виде:

$$K_{\phi} = m_T \frac{\delta^2 \gamma}{3\mu}, \quad (4)$$

где m_T — трещинная скважность (пустотность) горной породы; δ — половина раскрытия трещины; γ — удельный вес жидкости; μ — динамическая вязкость жидкости.

Для характеристики фильтрационных свойств среды независимо от физических свойств фильтрующейся жидкости используется коэффициент проницаемости $K_{пр}$, который связан с коэффициентом фильтрации следующей зависимостью:

$$K_{\phi} = K_{пр} \frac{\gamma}{\mu}, \quad (5)$$

Аналитическое выражение коэффициента проницаемости трещиноватых горных пород записывается согласно (4) и (5) в следующем виде:

$$K_{пр} = \frac{m_T \delta^2}{3} = m_T K_{пр.T}, \quad (6)$$

где $K_{пр.T}$ — коэффициент проницаемости одиночной трещины.

Аналитическое выражение коэффициента фильтрации (инъекции) трещиноватых горных пород при движении вязкопластичных жидкостей получено [3] аналогично (4) в следующих выражениях:

$$K_{\phi} = \frac{\delta^2 \gamma}{3\eta} \beta = m_T K_{пр.T} \frac{\gamma}{\eta} \beta = K_{пр} \frac{\gamma}{\eta} \beta, \quad (7)$$

где β — структурный множитель, характеризующий строение вязкопластичных потоков в отдельных трещинах;

$$\beta = \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\delta_0}{\delta} + \frac{1}{2} \frac{\delta_0^3}{\delta^3} \right) = \left(1 - \frac{3}{2} \frac{\Delta P_0}{\Delta P} + \frac{1}{2} \frac{\Delta P_0^3}{\Delta P^3} \right) = \left(1 - \frac{3}{2} \frac{J_0}{J} + \frac{1}{2} \frac{J_0^3}{J^3} \right),$$

где δ_0 — половина ядра потока при определенной среднеобъемной скорости движения в трещине; ΔP_0 — начальный перепад давления; ΔP — перепад давления в процессе нагнетания; ΔJ_0 — начальный градиент давления (инъекции)

Аналитическое выражение коэффициента фильтрации (7), характеризующее трещиноватую горную породу и свойства инъекционного потока, является основным критерием оценки процесса инъекции.

Зависимость (7) аналогична (4) и имеет размерность скорости. В отличие от (4), аналитическое выражение коэффициента фильтрации трещиноватой горной породы при фильтрации (инъекции) вязкопластичной жидкости (7) имеет дополнительный структурный множитель, который отражает строение вязкопластичных потоков в отдельных трещинах. Таким образом, в (7) первый множитель характеризует фильтрационные свойства горной породы, второй — физические свойства вязкопластичной жидкости и дополнительный третий структурный множитель — перераспределение скоростей и напряжений в сечении потока при изменении среднеобъемной скорости его движения.

Тампонаж обводненных горных пород осуществляется путем бокового нагнетания вязкопластичного тампонажного раствора через скважину зажимной схеме. В результате при напорном режиме нагнетания в пределах трещиноватого пласта формируется нестационарный осесимметричный инъекционный поток тампонажного раствора.

Рассматривая стенки тампонажной скважины, как прямолинейный источник нагнетания в виде непрерывного ряда точечных источников формирующих плоские параллельные потоки, можно оценить закономерности формирования пространственного осесимметричного напорного потока, изучая плоские плановые радиальные потоки.

Общее дифференциальное уравнение планового упругого инъекционного потока можно получить на основании уравнения неразрывности потока и уравнения скорости фильтрации (инъекции) (2). При этом возможно не учитывать влияние давления на γ и $K^*_ф$, так как их относительные изменения под воздействием давления несоизмеримо малы по сравнению изменениями самого давления.

Уравнение неразрывности планового потока тампонажной среды в деформируемой трещиноватой горной породе имеет вид:

$$\frac{\partial(m_T \gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(m_T v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(m_T v_y)}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

Заменяя в уравнении неразрывности (8) временную производную и компоненты скорости инъекции v_x и v_y их выражениями, получим общее дифференциальное уравнение кусочно-однородного по составу и проницаемости нестационарного потока вязкопластичной жидкости при упругом режиме движения:

$$K_x \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \chi_{упр} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (9)$$

где K_x, K_y — компоненты коэффициента фильтрации (инъекции) в декартовых координатах;

$$K_x = K_{np,x} \frac{\gamma}{\eta} \beta_x;$$

$$K_y = K_{np,y} \frac{\gamma}{\eta} \beta_y;$$

где $\chi_{упр}$ — коэффициент упругости, который характеризует изменение объема тампонажной среды в единичном элементе инъекционного потока, отнесенного к изменению давления.

Уравнение (9) получено без учета деформации кровли и почвы пласта горной породы, что в определенной степени будет влиять на количественные показатели характеристики инъекционных потоков. Однако общие закономерности при этом сохраняются.

Общее дифференциальное уравнение инъекционного потока вязкопластичной жидкости (9) полностью характеризует гидродинамические процессы тампонажа трещиноватого пласта горной породы и может быть использовано для математического описания процесса формирования инъекционного потока тампонажного раствора нагнетаемого через скважину по зажимной схеме.

Библиографический список

1. Мирзаджанзаде А.Х. Вопросы гидродинамики вязкопластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. — Баку: Азернеф., 1959.
2. Мирзаджанзаде А.Х., Касимов А.Ф. Основные дифференциальные уравнения движения вязкопластичных тел. — Баку: Докл. АН АзССР, 1952 — №10. — Т.8.
3. Саламатов М.А. Аналитическое выражение коэффициента фильтрации трещиноватых пород при течении вязкопластичных жидкостей. // Труды СГИ, — Свердловск: изд. УПИ, 1977. — вып. 126.