Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1985, т. 105

УДК 622.245.4/088.84

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТАМПОНИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Н.И.НИКОЛАЕВ, В.И.КОВАЛЕНКО

Применение так называемых «сухих" быстросхватывающихся смесей (БСС) на основе минеральных вяжущих веществ в качестве тампонирующего материала для изоляции зон геологических осложнений (поглощений очистного агента, водопритоков и приуроченных к ним интервалов неустойчивых горных пород) потребовало создания ряда специальных устройств для доставки и переработки БСС непосредственно в интервале скважины, подлежащем тампонированию.

Основной конструктивной особенностью используемых в настоящее время устройств для «сухого" тампонирования является наличие специального отражателя, выполненного в виде шнека со спиральными витками, обратными направлению вращения бурового снаряда. Шнековый отражатель является главным элементом устройства, нагнетающего вязко-пластичную тампонирующую пасту в поры и трещины изолируемого интервала скважины.

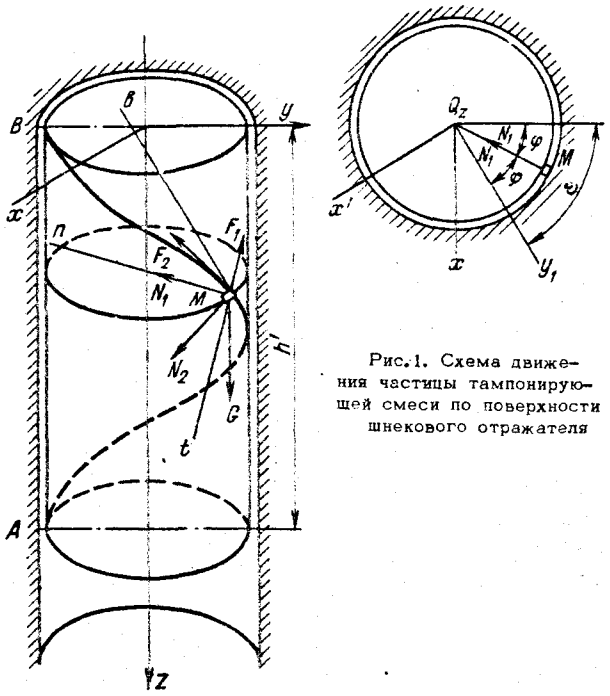


Рис.1. Схема движения частицы тампонирующей смеси по поверхности шнекового отражателя

Применяемые в практике бурения режимы работы тампонирующих устройств данного типа, а также геометрические параметры их шнековых отражателей не обоснованы теоретически, что в ряде случаев обуславливает некачественную изоляцию зон геологических осложнений.

В связи с этим необходимо исследовать процесс нагнетания тампонирующей смеси в трещиноватую зону скважины, определить оптимальные геометрические параметры отражателя, необходимое коли-

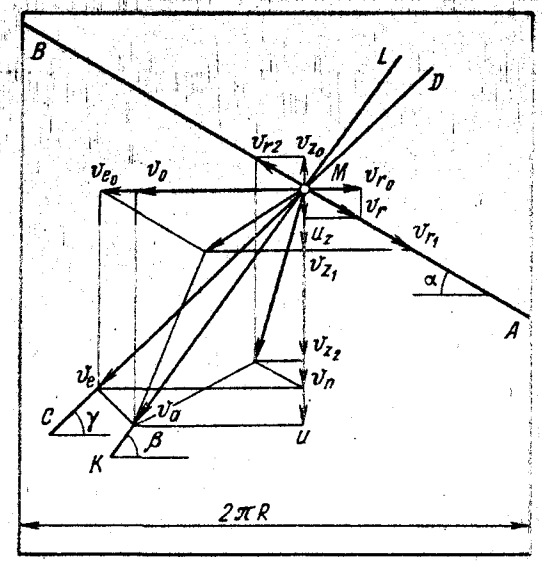


Рис.2. Поле скоростей движения частицы тампонирующего материала

v_{z0} - вертикальная составляющая скорости относительного движения v_{r2}; v_{z2} - геометрическая сумма скоростей $v_п$ и v_{z0}, $\vec{v}_{z2} = \vec{v}_п - \vec{v}_{z0}$

чество тампонирующей смеси и режимы работы тампонирующего устройства, исходя из условий прочности создаваемого изоляционного кольца, физико-механических свойств БСС, характеристик зоны геологического осложнения, и на этой основе рациональную область применения данного способа тампонирования скважин.

Исследования, проведенные в области теории лопастных (центробежных и осевых) винтовых насосов, винтовых питателей, шнековых осадительных центрифуг, показывают, что основное уравнение лопастных машин, в том числе и винтовых шнековых транспортеров, позволяет свести задачу определения напора, создаваемого рабочей поверхностью машины, к расчету приращения момента количества движения потока жидкости, т.е. свести динамическую задачу к кинематической.

Кинематическое исследование потока идеальной жидкости в рабочей области машины на основе уравнений гидродинамики приводит в общем случае к неразрешенным до настоящего времени задачам [2]. Движение реальной жидкости в рабочей области шнекового отражателя в еще меньшей степени доступно исследованию теоретическим путем. Поэтому изучение движения тампонирующей смеси при ее взаимодействии с отражателем производится на основе упрощенных теоретических схем с корректировкой полученных результатов эмпирическими данными.

Основной характеристикой винтовой поверхности шнекового отражателя является направляющая винтовая линия, образуемая сложным движением точки M (рис.I) по цилиндрической поверхности: поступательным вдоль образующей и вращательным вокруг оси цилиндра.

Величина смещения точки вдоль образующей при одном полном обороте определяет шаг h' винтовой линии. При постоянном шаге все касательные к винтовой линии одинаково наклонены к образующей цилиндра и пересекают плоскость, перпендикулярную к оси под углом наклона винтовой линии α.

Развертка винтовой линии с постоянным шагом представляет собой прямую линию с углом наклона α (рис.2), причем $tg\alpha = h'/2\pi R = P/R$, где R - радиус винтовой линии (цилиндра), м; P - параметр винтовой линии, характеризующий величину вертикального перемещения точки M при повороте на один радиан, м.

При движении точки M по винтовой линии положение ее в пространстве определяется координатами $x = R\cos\varphi$; $y = R\sin\varphi$; $z = \frac{h}{2\pi}\varphi = P\varphi$, где φ – угол поворота.

Осевая, окружная и абсолютная скорости точки определяются через производные ее координат, соответственно

$$u = \dot{Z} = P\omega;\ v_0 = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = R\omega;\quad v_a = \sqrt{v_0^2 + u^2} = \omega\sqrt{P^2 + R^2},$$

где $\omega = \dot{\varphi}$ – угловая скорость вращения точки, $с^{-1}$.

Гидродинамические свойства винтовой поверхности шнекового отражателя определяются направлением и величиной скоростей потока жидкости.

Поскольку тампонажная суспензия представляет собой двухфазную систему, состоящую из смеси твердого вяжущего вещества и жидкости, то для характеристики кинематики потока этой смеси в некоторой области, прилегающей к отражателю, необходимо и достаточно установить величину и направление скорости каждой частицы тампонирующей смеси, расположенной в этой области, в зависимости от времени, т.е. задать поле скоростей.

Движение частицы смеси вниз по скважине является результатом ее взаимодействия с поверхностью шнекового отражателя и стенкой скважины. При правом вращении отражателя, имеющего левое направление винтовой линии, частица M центробежной силой отбрасывается от оси вращения и соприкасается со стенкой скважины. Трение частицы о стенку скважины тормозит ее вращение и заставляет проскальзывать относительно отражателя со скоростью v_{r1}.

В результате смещения частицы относительно отражателя она движется вниз с осевой скоростью v_{z1}. При движении тампонирующего устройства вниз вдоль оси скважины со скоростью подачи $v_{п}$ трение частицы о стенку скважины тормозит ее движение и заставляет проскальзывать вверх относительно отражателя со скоростью v_{r2}.

Таким образом, частица, находящаяся в постоянном контакте со стенкой скважины и поверхностью отражателя, перемещается по винтовой линии AMB, и скорость относительного движения v_r совпадает с касательной к винтовой линии: $\vec{v}_r = \vec{v}_{r1} + \vec{v}_{r2}$.

В переносном движении частица перемещается вниз со скоростью $v_e = \sqrt{\omega^2 R^2 + v_{п}^2}$; по винтовой линии CD, имеющей угол наклона γ ($tg\,\gamma = v_{п}/\omega R$). Это движение складывается из поступательного движения тампонирующего устройства вдоль оси скважины со скоростью $v_{п}$ и его вращения со скоростью $v_{e0} = \omega R$, где ω – угловая скорость вращения бурового снаряда, $с^{-1}$.

В результате сложения движений частицы по двум винтовым линиям AB и CD траектория абсолютного движения представляет собой новую винтовую линию KL с углом наклона β, а скорость абсолютного движения $\vec{v}_a$ можно представить как геометрическую сумму скоростей вращения $\vec{v}_0$ и поступательного движения $\vec{u}$.

Разложение истинного движения частицы на составляющие показывает, что скорость вращения частицы $v_0 = v_{e0} - v_{r0}$, т.е. равняется разности скоростей в переносном и относительном движениях.

Если в начальный момент времени частица M находилась на оси y (см. рис.I), то за время T отражатель повернется на угол $\varepsilon = \omega T$, а частица, двигаясь с проскальзыванием, – на угол $\varphi = f(T)$. Относительно отражателя частица переносится на угол $\varphi = \varepsilon - \varphi = \omega T - \varphi$.

На частицу тампонирующей смеси действует сила тяжести G, реакция со стороны скважины N_1, реакция отражателя N_2. Проскальзывание частицы по отражателю обуславливает возникновение силы трения $F_2 = f_2 N_2$, а трение частицы о стенки скважины характеризуется силой $F_1 = f_1 N_1$ (здесь f_1 и f_2 – коэффициенты гидравлического трения смеси соответственно о стенки скважины и о шнековый отражатель).

Проведем из точки M оси (см. рис.I) главную нормаль n, проходящую по радиусу скважины, касательную t, совпадающую с направлением скорости движения, и бинормаль b, направленную по орту $\bar{b} = \bar{\tau} \times \bar{n}$. Составив дифференциальные уравнения абсолютного движения и уравнение Лагранжа второго рода в обобщенной координате, за которую принимается угол φ поворота частицы в абсолютном движении, получим выражение, связывающее осевую скорость движения частицы тампонирующей смеси с геометрическими параметрами отражателя, осевой скоростью вращения бурового снаряда и свойствами вяжущего материала:

$$\frac{f_1 R(P\omega + v_{\text{п}} - u)^2 \left[R(f_2 P - R)(P\omega + v_{\text{п}} - u) + P(f_2 R + P)u\right]}{g P^2 (f_2 R + P)\sqrt{(P\omega + v_{\text{п}} - u)^2 R^2 + u^2 P^2}} = 1. \qquad (I)$$

Очевидно, что движение тампонирующей смеси вниз по скважине без проскальзывания относительно поверхности отражателя обеспечивается условием $v_{r_1} \geq v_{r_2}$ или $v_r \geq 0$. При определенной скорости вращения бурового снаряда частицы тампонирующей смеси будут неподвижны относительно отражателя, тогда $v_{r_1} = v_{r_2}\,(v_r = 0)$.

В этом случае отражатель лишь препятствует проскальзыванию частицы вверх, а осевая скорость перемещения тампонирующей смеси зависит только от скорости подачи бурового снаряда ($u = v_{\text{п}}$), т.е. тампонирующее устройство выполняет функцию поршня.

Тогда уравнение (I) примет вид

$$\frac{f_1 R \omega_{\text{кр}}(uP - R^2 \omega_{\text{кр}})}{g P \sqrt{\omega_{\text{кр}}^2 R^2 + u^2}} = 1, \qquad (2)$$

где $\omega_{\text{кр}}$ – критическая скорость вращения бурового снаряда, $с^{-I}$.

Используемые в бурении твердеющие тампонирующие материалы в большинстве своем относятся к так называемым неньютоновским или структурным жидкостям. При нагнетании структурных жидкостей в трещиноватую или пористую среду движение их происходит с малыми скоростями, поэтому в данном случае представляется обоснованным для расчета процесса нагнетания принять линейный закон фильтрации. Для условий линейной фильтрации вязко-пластичной жидкости в трещиноватых породах при схеме бокового нагнетания получена зависимость [I]

$$p_0 - p_{R_1} = \frac{\mu_c}{\alpha' K}\left[\frac{Q}{2\pi h}\ln\frac{R_1}{r_0} + BC\left(R_1 - r_0\right)\right], \qquad (3)$$

где p_0 и p_{R_1} – давление соответственно в скважине и пластовое, Па; μ_c – структурная вязкость тампонажного раствора, Па·с; α' – безразмерный коэффициент, $\alpha' = 81{,}6/A$; A – эмпирический коэффициент, $110 \leqslant A \leqslant 115$; K – коэффициент проницаемости пласта, м^2; Q – дебит нагнетания, м^3/с; R_1 и r_0 – радиус соответственно инъекции в пласт и скважины, м; h – мощность пласта, м; B – константа, зависящая от реологических свойств жидкости, $B = \tau_0 / \mu_c$, с$^{-1}$; τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; C – константа, определяемая геометрическими параметрами пласта, $C = mb_0/2$, м; m – пустотность пласта, %; b_0 – среднее раскрытие трещин, м.

Пустотность m трещиноватой зоны скважины может служить критерием для определения количества тампонирующей смеси и радиуса ее инъекции в пласт.

Поскольку объем смеси в скважине до начала процесса ее нагнетания в трещиноватую зону (рис.3) $V_1 = \pi r_0^2 h_{см}$, то объем околоствольного пространства, заполненного тампонирующей смесью по окончании процесса тампонирования $V_2 = \pi h_{пл} m(R_1^2 - r_0^2)$.

Тогда

$$R_1 = r_0\sqrt{h_{см}/h_{пл}\, m + 1} \qquad (4)$$

(здесь $h_{см}$ – высота заполнения скважины тампонирующей смесью, м; $h_{пл}$ – мощность трещиноватой зоны, м).

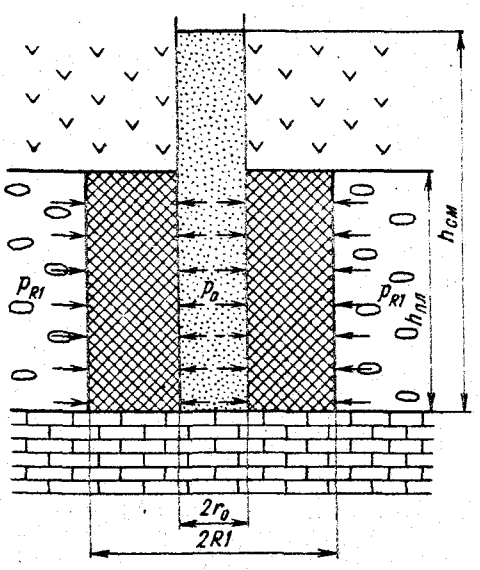


Рис.3. Схема для расчета процесса нагнетания БСС в трещиноватую зону скважины

Минимальный радиус инъекции R_{min}, удовлетворяющий условию надежной изоляции трещиноватой зоны скважины, можно определить, решив задачу Ламэ [3]. Расчетное напряжение на внутренней поверхности зоны изоляции по третьей теории прочности

$$\sigma = \frac{2R_1^2(p_0 - p_{R_1})}{(R_1^2 - r_0^2)} \leqslant [\sigma]; \qquad (5)$$

$$[\sigma] \geqslant 2\Delta P / \left(1 - \frac{r_0^2}{R_1^2}\right),$$

где p_0 – давление в скважине на глубине залегания поглощающего пласта, Па; p_{R_1} – давление, действующее на наружную поверхность зоны изоляции (пластовое давление), Па.

В формуле (5) напряжения обратно пропорциональны отношению квадратов радиусов, и при $R_1 / r_0 \geq 4$ цилиндр можно рассматривать как имеющий бесконечно большую толщину стенки, поэтому $R^2_{min} / r_0^2 = 16$. Учитывая выражение (4), получим высоту заполнения скважины тампонирующей смесью до начала процесса ее нагнетания в пласт $h_{см} \geq 15 h_{пл} / m$, что позволяет определить рациональную область применения способов тампонирования с дискретной доставкой вяжущих материалов.

Поскольку время проведения операции тампонирования трещиноватой зоны должно быть не больше времени начала схватывания БСС ($T_{опер} \leq 0{,}75 T^{н}_{схв}$), то минимальная скорость перемещения тампонирующего устройства по скважине $u_{min} \geq h_{см} / 0{,}75 T^{н}_{схв}$ или $u_{min} \geq 15 h_{пл} m / 0{,}75 T^{н}_{схв}$.

При работе устройства в поршневом режиме расход нагнетания $Q = 15 \pi r_0^2 h_{пл} m / 0{,}75 T^{н}_{схв}$, а давление нагнетания $\Delta p = G_{сн} / \pi r_0^2$ (здесь $G_{сн}$ – осевая нагрузка на снаряд, Н).

Тогда уравнение (3) примет вид

$$G_{сн} = \frac{\pi r_0^3 m \mu_c}{\alpha K} \left[\frac{10{,}4\, m r_0}{0{,}75 T^{н}_{схв}} + \frac{1{,}5 \tau_0 b_0}{\mu_c} \right]. \qquad (6)$$

Уравнения (2) и (6) позволяют определить режимные параметры процесса изоляции зоны осложнения в скважине и оценить возможность применения способа "сухого" тампонирования, исходя из характеристики трещиноватой зоны и реальных значений осевой нагрузки и скорости вращения бурового снаряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айтматов И.Т., Кравцов Б.И., Половов Б.Д. Тампонирование обводненных горных пород в шахтном строительстве. М., Недра, 1972.

2. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. М., Машиностроение, 1966.

3. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. М., Наука, 1965. Т. 2.