

УДК 622.243.13

Очистка от шлама наклонного ствола скважины потокм пенной газожидкостной смеси

Куликов В. В., Соловьёв Е. Н.

ГОУ ВПО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
(РГГРУ), Москва, Россия

Поступила в редакцию 01.03.11, принята к печати 18.03.11

Аннотация

Разработана модель транспортирования частиц бурового шлама по стволу горизонтальной и наклонной скважины потокм пенной газожидкостной смеси (ПГЖС). Предложено применение критериев (чисел) механического подобия для описания движения пены. Получены зависимости для расчета критической скорости движения пены и скорости трогания частиц шлама с места.

Ключевые слова: модель, транспорт шлама, критерии подобия, пена.

В современных условиях всё большее распространение получают процессы, связанные с бурением наклонных и горизонтальных скважин. В качестве очистных агентов для бурения горизонтальных скважин применяется большое количество промывочных жидкостей – от водных растворов полимеров до многокомпонентных полимерминеральных композиций, что позволяет повысить эффективность очистки забоя и ствола скважины при бурении от выбуриваемых частиц шлама; уменьшить силы сопротивления перемещению бурильной колонны при проведении спуско-подъёмных операций в процессе бурения; исключить осложнения при бурении скважин, связанные с обводнением и потерей устойчивости ствола скважин в глиносодержащих горных породах.

При бурении наклонных и горизонтальных скважин с использованием указанных выше промывочных жидкостей достаточно хорошо теоретически и экспериментально изучен процесс транспортирования бурового шлама за счёт регулирования структурно-реологических параметров, а также выбора режима течения промывочной системы в кольцевом пространстве бурящейся скважины.

Применение пенных газожидкостных смесей (ПГЖС) в устойчивых породах при бурении на твёрдые полезные ископаемые обеспечивает проведение углубки скважины на депрессии, в условиях отрицательных значений дифференциального давления, что позволяет существенно увеличить механическую скорость бурения. Высокие теплоизолирующие (адиабатные) свойства ПГЖС способствуют получению качественных керновых проб и препятствуют растеплению околоскважинного пространства в условиях многолетней мерзлоты. Максимальная по отношению к иным видам очистных агентов транспортирующая способность ПГЖС обеспечивает наиболее полное удаление продуктов разрушения из ствола скважины. Стабильность структурных свойств и низкое давление пен препятствуют их поглощению при разбурировании сильнотрещиноватых, пористых и кавернозных пород.

Вертикальный транспорт шлама пенами изучен достаточно полно. Наименее исследован процесс транспортирования частиц бурового шлама в наклонном и горизонтальном стволах скважин.

Весьма значимые теоретические и экспериментальные процессы транспортирования частиц бурового шлама с помощью ПГЖС в вертикальном стволе скважины изучены рядом исследователей под руководством Б.Б. Кудряшова [5]. Эти исследования позволили раскрыть некоторые закономерности поведения смесей при транспортировании шлама: ПГЖС движется как единое целое и, поэтому, взаимным проскальзыванием фаз можно пренебречь, а её можно

рассматривать как гомогенную среду; для описания закономерностей течения пены целесообразно использовать усреднённые характеристики; оценивая взаимодействие ПГЖС и бурового шлама можно отметить, что устойчивость и прочность системы ПГЖС + шлам выше, чем просто ПГЖС, что свидетельствует о способности шлама к упрочнению ПГЖС; известные формулы [12] (для скорости витания и другие), полученные применительно к жидкостям и газам, для ПГЖС не применимы, что диктует необходимость вывода новых зависимостей; полученные экспериментальные формулы [5] не раскрывают физические зависимости исследуемых параметров системы ПГЖС + шлам.

В [11] изложены теоретические обоснования по созданию модели транспортирования шлама в горизонтальной скважине, однако не учитывать, что в отличие от жидкостей и газов, частицы бурового шлама без проскальзывания выносятся потоком ПГЖС. Причем эффективность транспортирования шлама по стволу горизонтальной скважины определяется скоростью течения ПГЖС, касательными напряжениями при её деформации и физико-механическими процессами на границе раздела твёрдое тело – жидкая фаза несущей среды.

Нами предлагается рабочая гипотеза, в соответствии с которой ПГЖС уподобляется бингамовской жидкости. Это позволяет считать, что по аналогии с законом трения Бингама сопротивление, возникающее при относительном движении частицы в потоке ПГЖС, можно считать величиной аддитивной. Пусть сопротивления складываются из вязких (ньютоновских) сопротивлений, определяемых, как и в ньютоновских жидкостях, и пластических (бингамовских) сопротивлений (сопротивлений сдвига), вызванных начальными касательными напряжениями и физико-химическими силами между жидкой фазой ПГЖС и частицами шлама. Вязкие сопротивления – это сила лобового сопротивления $F_{лс}$, а сдвигающие – это суммарная сила T , возникающая от действия внутреннего трения и физико-химических сил.

Таким образом, в соответствии с принятой гипотезой, механическое взаимодействие ПГЖС и частиц шлама рассматриваем как сумму взаимодействий воображаемой ньютоновской сжимаемой жидкости с плотностью и вязкостью реальной ПГЖС (сил сопротивления – $F_{лс}$), но не обладающей начальным напряжением сдвига ($\tau_0 = 0$) и физико-химическими поверхностными силами, – и воображаемой бингамовской жидкости, в которой $F_{лс} = 0$, но, как и в реальной системе ПГЖС, есть τ_0 и силы физико-химической природы – силы сопротивления T .

В отличие от многих жидкостей и газов, частицы шлама в стационарно движущемся потоке пены проскальзывают незначительно. При этом шлам выносится практически со скоростью движения самой пены и определяется касательными напряжениями и физико-химическими силами, возникающими на поверхности частиц. Силы лобового сопротивления действуют на шлам в основном при нестационарном течении потока ПГЖС и при трогании частиц с места.

Следовательно, для описания поведения шлама в потоке ПГЖС необходимо рассмотреть два базовых варианта механического взаимодействия пены и частиц. Первый – когда относительное перемещение частиц и ПГЖС отсутствует. Он позволит установить условия, при которых шлам в пене не тонет. И второй – когда шлам проскальзывает в пене. Этот вариант взаимодействия необходим для определения режима промывки, при котором поток пены сможет заставить частицы шлама перемещаться по стволу наклонной и субгоризонтальной скважин.

Вначале рассмотрим вынос шлама стационарным вертикальным потоком ПГЖС (рис. 1).

$$F_T = T + F_A, \quad (1)$$

где T – суммарная сила, возникающая от действия внутреннего трения за счет касательных напряжений τ_0 и физико-химических сил поверхностного взаимодействия частицы шлама и структуры ПГЖС; F_A – архимедова сила; F_T – сила тяжести.

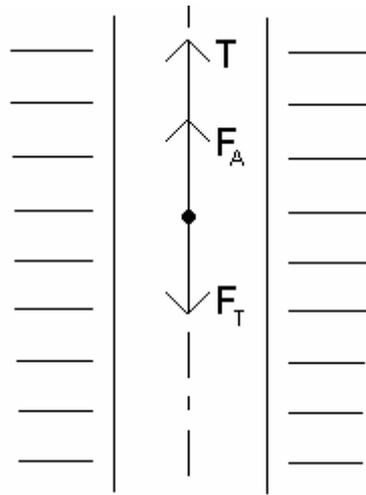


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу шлама, находящуюся в стационарном вертикальном потоке ПГЖС: T – суммарная сила внутреннего трения и физико-химических воздействий на поверхности частицы; F_A – архимедова сила; F_T – сила тяжести

$$T = \alpha \cdot \tau_0 \cdot f_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент, учитывающий физико-химические силы [9, 12]; $f_{\text{пов}}$ – площадь поверхности частицы шлама.

$$F_A = \rho_{\Pi} \cdot g \cdot U_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где ρ_{Π} – плотность ПГЖС; g – ускорение силы тяжести; $U_{\text{ш}}$ – объём частицы шлама.

$$F_T = m_{\text{ш}} \cdot g, \quad (4)$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса частицы шлама.

Тогда условие (1) можно записать в следующем виде:

$$\rho_{\text{ш}} g \frac{\pi}{6} d_{\text{ш}}^3 = \alpha \tau_0 \cdot \pi d_{\text{ш}}^2 + \frac{P}{R_{\Pi} \cdot T} g \frac{\pi}{6} d_{\text{ш}}^3, \quad (5)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр частицы; P – абсолютное давление; T – абсолютная температура; R_{Π} – удельная газовая постоянная пены [5]; $\rho_{\text{ш}}$ – плотность частицы шлама; ρ_{Π} – плотность пены при давлении P и температуре T , $\rho_{\Pi} = \frac{P}{R_{\Pi} \cdot T}$.

$$R_{\Pi} = \frac{M_{\text{ж}} \cdot P + \rho_{\text{ж}} \cdot M \cdot R \cdot T}{\rho_{\text{ж}} (M_{\text{ж}} + M) \cdot T}, \quad (6)$$

где $M_{\text{ж}}$, M – массовые расходы жидкой фазы пены (вода плюс пенообразователь) и воздуха соответственно; $R = 287$ Дж / (кг · К) – удельная газовая постоянная воздуха; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы пены.

Преобразуя (5), получим:

$$6 \cdot a \cdot He = Ar, \quad (7)$$

где He , Ar – числа подобия Хедстрёма и Архимеда соответственно [7].

$$He = \rho_{\Pi} \cdot \tau_0 \frac{d_{\text{ш}}^2}{\mu_{\Pi}}, \quad (8)$$

где μ_{Π} – пластическая вязкость ПГЖС.

$$Ar = \rho_{\Pi} \cdot g \cdot (\rho_{ш} - \rho_{\Pi}) \cdot \frac{d_{ш}^3}{\mu_{\Pi}}. \quad (9)$$

При взаимодействии структуры ПГЖС и частиц бурового шлама возможны случаи: если

$$6 \cdot a \cdot He < Ar, \quad (10)$$

то частица шлама будет тонуть в ПГЖС, при этом сила лобового сопротивления $F_{лс} \neq 0$; если

$$6 \cdot a \cdot He \geq Ar, \quad (11)$$

то частица шлама не будет тонуть в ПГЖС, при этом скорость относительного движения $V_{отн} = 0$ и $F_{лс} = 0$.

Рассмотрим второй вариант взаимодействия пены и частицы: падение частицы в вертикальном потоке ПГЖС, когда выполняется условие (10).

Пусть частица шлама равномерно падает (витают) в ПГЖС, тогда

$$V_{отн} = V_{в} = V_{кр}, \quad (12)$$

где $V_{в}$ – скорость витания; $V_{кр}$ – критическая скорость.

Это соответствует условию

$$F_{т} = T + F_{лс} + F_{А}. \quad (13)$$

Тогда (13) примет вид

$$\rho_{ш} \cdot g \frac{\pi}{6} d_{ш}^3 = a \tau_0 \cdot \pi d_{ш}^2 + 0,5 C_{лс} \frac{P}{R_{\Pi} \cdot T} \cdot \frac{\pi}{4} d_{ш}^2 V_{кр}^2 + \frac{P}{R_{\Pi} \cdot T} g \frac{\pi}{6} d_{ш}^3, \quad (14)$$

где $C_{лс}$ – коэффициент лобового сопротивления относительному движению частицы.

Преобразовав (14), получим:

$$V_{кр} = \frac{2\mu_{\Pi} R_{\Pi} T}{d_{ш} P} \cdot \sqrt{\frac{Ar - 6aHe}{3C_{лс}}}. \quad (15)$$

Следовательно, по формуле (15) можно определить величину критической скорости (скорости витания) частицы бурового шлама в ПГЖС.

Рассмотрим взаимодействие неподвижной частицы бурового шлама с ПГЖС в наклонном стволе скважины (рис. 2).

В этом случае

$$F_{А} \cdot \cos \theta + T + F_{тр} = F_{т} \cdot \cos \theta, \quad (16)$$

где θ – зенитный угол скважины; $F_{тр}$ – сила трения частицы о поверхность ствола скважины.

Или

$$\frac{P}{R_{\Pi} \cdot T} - g \frac{\pi}{6} d_{ш}^3 \cdot \cos \theta + a \tau_0 \pi d_{ш}^2 + f \cdot \sin \theta (\rho_{ш} \cdot g \cdot \frac{\pi}{6} d_{ш}^3 - \frac{P}{R_{\Pi} \cdot T} g \cdot \frac{\pi}{6} \cdot d_{ш}^3) = \rho_{ш} g \frac{\pi}{6} d_{ш}^3 \cos \theta, \quad (17)$$

где f – коэффициент трения частицы шлама о стенки скважины.

После преобразования (17) получим:

$$6aHe = Ar(\cos \theta - f \cdot \sin \theta). \quad (18)$$

Зависимость (18) является более общей по отношению к (7) и переходит в (7) при $\theta = 0$.

Если

$$6aHe < Ar(\cos \theta - f \cdot \sin \theta), \quad (19)$$

то частица шлама будет перемещаться в ПГЖС по стволу наклонной скважины, при этом $F_{лс} \neq 0$.

Если выполняется условие

$$6aHe \geq Ar(\cos \theta - f \cdot \sin \theta), \quad (20)$$

то частица шлама не будет перемещаться в ПГЖС; $V_{омн} = 0$ и $F_{лс} = 0$.

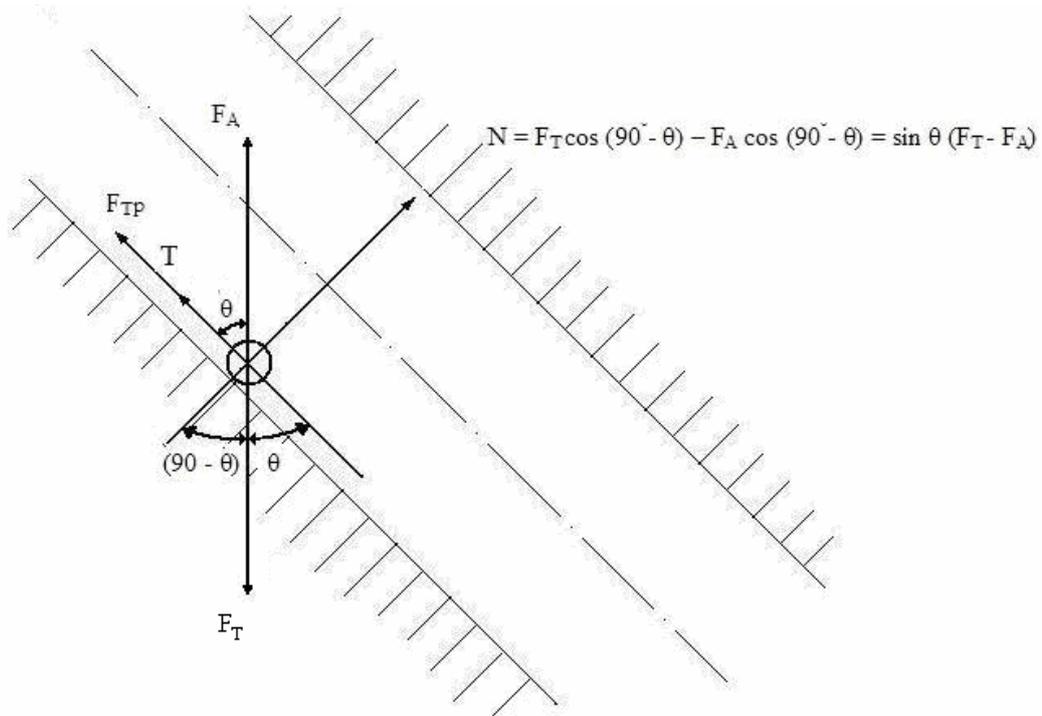


Рис. 2. Схема сил взаимодействия частицы бурового шлама с ПГЖС в наклонном стволе скважины: $F_{Тр}$ – сила трения частицы о поверхность стенки скважины; T – суммарная сила внутреннего трения и физико-химических воздействий на поверхности частицы; F_A – архимедова сила; N – сила нормального давления частицы на стенку скважины, $N = F_T \cdot \cos(90^\circ - \theta) - F_A \cdot \cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta \cdot (F_T - F_A)$; F_T – сила тяжести; θ – зенитный угол скважины

Пусть частица перемещается по стволу наклонной скважины. Уравнение сил, действующих на частицу бурового шлама, запишем в следующем виде:

$$F_{лс} + F_{тр} + T + F_A \cdot \cos \theta = F_T \cdot \cos \theta. \quad (21)$$

В этом случае относительная скорость частицы шлама является скоростью движения потока пены, при которой начинается движение (трогание с места) частицы: $V_{омн} = V_{мп}$.

$$0,5 \cdot C_{лс} \frac{P}{R_{II}} \cdot T \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_u^2 \cdot V_{мп}^2 + f \cdot \sin \theta \cdot (\rho_u \cdot g \frac{\pi}{6} d_u^3 - \frac{P}{R_{II}} \cdot T \cdot g \frac{\pi}{6} d_u^3) + a \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot d_u^2 + \frac{P}{R_{II}} \cdot T \cdot g \frac{\pi}{6} d_u^3 \cdot \cos \theta = \\ = \rho_u \cdot g \frac{\pi}{6} d_u^3 \cdot \cos \theta. \quad (22)$$

Решая это уравнение относительно $V_{мп}$, получим:

$$V_{мп} = \frac{2\mu_{II} R_{II} T}{d_u \cdot P} \sqrt{\frac{Ar(\cos \theta - f \sin \theta) - 6aHe}{3C_{лс}}}. \quad (23)$$

Решение для $V_{мп}$ при $\theta = 0$, т. е. для вертикальной скважины, переходит в критическую скорость $V_{кр}$, следовательно, решение для скорости трогания (23) является общим и его можно рекомендовать в качестве модели транспортирования бурового шлама потоком ПГЖС, в том числе и для горизонтальных скважин при $\theta = 90^\circ$.

Библиографический список

1. Василенко П.И., Телегин В.С. Применение пенных полимерных систем с целью ограничения водопритоков при эксплуатации нефтяных скважин // Инженер – нефтяник. 2008. №1. С. 16 – 17.
2. Временная инструкция по глушению скважин с применением пеноэмульсий с наполнителями в условиях АНПД. Ставрополь, ОАО «Газпром». 2001. С. 9 – 24.
3. Гасумов Р.А., Калинин А.В., Гейхман М.Г. Пенные системы для бурения и ремонта скважин. М.: ОАО «Газпром», ООО «ИРЦ Газпром». 2008. С. 64 – 82.
4. Козловский А.Е. Оптимизация процесса бурения (структура и элементы управления). М.: Издательство РАЕН, 2000. С. 108 – 116.
5. Кудряшов Б.Б., Кирсанов А.И. Бурение разведочных скважин с применением воздуха. М.: Недра, 1990. С. 107 – 117.
6. Куликов В.В., Калинин А.Г. Гидромеханика потока промывочной жидкости в местах локального искривления ствола скважины. // Инженер – нефтяник. 2008. №3. С. 23 – 25.
7. Куликов В.В. Применение числа Хедстрёма и других чисел механического подобия при проектировании режима промывки скважин. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2010. № 4. С. 20 – 21.
8. Куликов В.В. Транспортирование шлама по стволу наклонной скважины. // Инженер – нефтяник. 2008. №3. С. 18 – 19.
9. Маковой Н. Гидравлика бурения. М.: Недра, 1986. С. 295 – 315.
10. Нифантов В.И. Вскрытие продуктивных пластов при строительстве и ремонте скважин. М.: ОАО «Газпром», 2002. С. 40 – 48.
11. Соловьёв Н.В., Малухин Н.Г., Соловьёв Е.Н. Анализ факторов, обуславливающих эффективность транспортирования шлама в горизонтальных скважинах при использовании газожидкостной смеси. // Инженер – нефтяник. 2008. №3. С. 19 – 22.
12. Шищенко Р.И., Есьман Б.И. Практическая гидравлика в бурении. М.: Недра, 1966. 320 с.

© Куликов В. В., Соловьёв Е. Н., 2011.

Анотація

Розроблена модель транспортування часток бурового шламу по стволу горизонтальної і похилої свердловини потоком пінної газорідної суміші (ПГЖС). Запропоновано вживання критеріїв (чисел) механічної подібності для опису руху піни. Отримані залежності для розрахунку критичної швидкості руху піни і швидкості страгування часток шламу з місця.

Ключові слова: модель, транспорт шламу, критерії подібності, піна.

Abstract

The model of transporting of particles of boring sludge is developed on the barrel of horizontal and sloping mining hole by the stream of foamy gas-liquid mixture. Application of criteria (numbers) of mechanical similarity is offered for description of motion of foam. Dependences are got for the calculation of stalling speed of motion of foam and speed of moving of particles of sledge from a place.

Keywords: model, transport of sledge, criteria of similarity, foam.