

ЭФФЕКТИВНАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА БУРОВОГО ШЛАМА НА ПОВЕРХНОСТЬ

Эффективный вынос бурового шлама является одной из важнейших функций бурового раствора. Скорость, с которой восходящий поток раствора выносит из скважины твердые частицы, зависит от соотношения между скоростью раствора и осаждением отдельной частицы в этом растворе под действием силы тяжести. В неподвижном растворе осаждающаяся частица вскоре приобретает постоянную, направленную вниз конечную скорость осаждения. Она зависит от разности плотностей частицы и раствора, размера и формы частицы, вязкости раствора, а также от турбулизации раствора в непосредственной близости к частице.

Прогнозировать конечную скорость осаждения частиц выбуренной породы затруднительно, так как частицы имеют различную форму и размеры и большинство буровых растворов по своей природе отличаются от ньютоновских жидкостей.

В неньютоновской жидкости скорость осаждения частиц зависит от разности между напряжением сдвига ϕ , создаваемым разностью плотностей ($\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{бр}}$), и предельным статическим напряжением сдвига (ПНС) бурового раствора.

Если $\phi < \text{ПНС}$ и конечная скорость осаждения равна нулю, то частицы остаются во взвешенном состоянии. Начальное СНС большинства буровых растворов слишком мало, чтобы крупные частицы шлама продолжали находиться во взвешенном состоянии, этому способствует повышение ПНС во времени.

В восходящем потоке твердая фаза будет двигаться вверх, если скорость жидкости превышает скорость осаждения частиц. Однако частица проскальзывает в восходящем потоке, поэтому ее скорость при движении вверх меньше скорости течения жидкости в кольцевом пространстве.

Различные авторы исследовали движение частиц шлама в кольцевом пространстве. Сифферман [1] исследовал вынос шлама при отсутствии вращения труб и низких скоростях течения в кольцевом пространстве и предложил оценивать эффективность очистки ствола скважины соотношением:

$$x_{\text{с}} = x_{\text{а}} - x_{\text{с}}, \quad (1)$$

где $x_{\text{с}}$ – абсолютная скорость подъема частицы; $x_{\text{а}}$ – скорость течения в кольцевом пространстве между стенками скважины и бурильной колонной; $x_{\text{с}}$ – скорость проскальзывания частицы вниз.

Результаты экспериментов с использованием 4-х видов растворов с различной вязкостью показали, что эффективность очистки сильно зависит от вязкости бурового раствора.

Уильямс и Брюс [2] экспериментально доказали, что одной из причин низкой эффективности переноса твердой фазы является способность плоских частичек шлама совершать локальные циркуляции. Считают, что это явление обусловлено параболической формой профиля скоростей при ламинарном течении, в результате которой на плоские частицы действуют неравные между собой силы. В результате они поворачиваются на ребро и смещаются к стенкам труб, после чего опускаются на некоторое расстояние, прежде чем начинают мигрировать к центральной области кольцевого пространства. Нисходящее движение вызывается как низкой скоростью, преобладающей у стенок, так и ориентацией частиц – ребром вниз.

Вращение бурильной колонны способствует увеличению коэффициента переноса, так как частицы, находящиеся в непосредственной близости от бурильной колонны, начинают перемещаться по спирали. Однако, как показал Сифферман, этот эффект довольно слаб. Теоретически при турбулентном течении коэффициент переноса должен был бы увеличиваться, так как более плоский профиль скоростей исключает возможность вращательного момента.

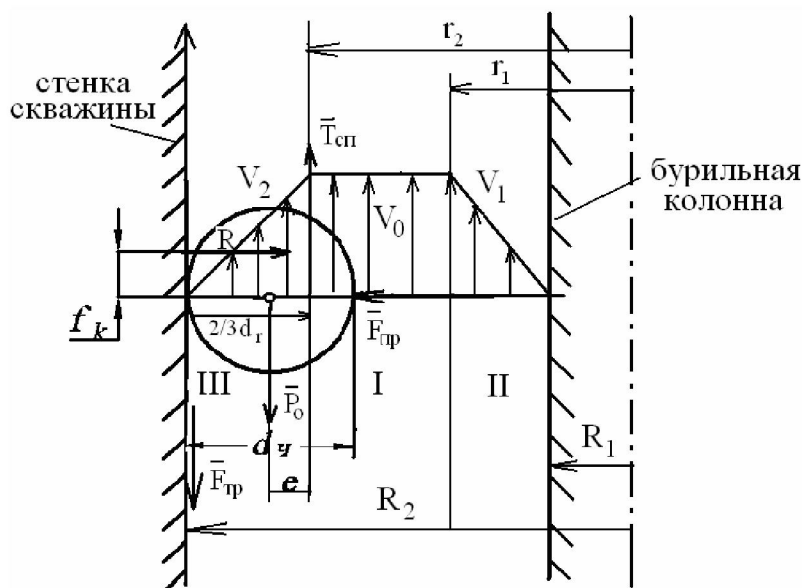
Таким образом, из анализа литературных данных следует, что при расчете расхода бурового раствора, в котором происходит транспортиров-

ка шлама на дневную поверхность, учитывалась средняя скорость раствора по кольцевому сечению и игнорировалось снижение скорости потока до нуля на контакте со стенками трубопровода.

Представляет интерес расчет скорости подъема шлама на основе разработанной математической модели [3] и сопоставление полученных данных с литературными.

Реальное распределение скоростей при ламинарном течении бурового раствора в кольцевом пространстве показано на рис. 1, из которого следует, что имеется кольцевое ядро течения, ограниченное радиусами r_1 и r_2 , и кольцевые зоны потока, примыкающие к стенкам скважины и бурильной колонны. Скорости течения раствора в этих зонах x_2 и x_1 переменны и зависят от градиента давления P , реологических показателей бурового раствора, радиусов скважины R_2 и бурильной колонны R_1 . Следовательно, условия транспортировки частиц шлама по кольцевому пространству будут неодинаковыми: наиболее благоприятными в кольцевой зоне I, ограниченной радиусами r_1 и r_2 , где скорость потока постоянна и равна x_0 , менее благоприятны в зоне II, ограниченной радиусами R_1 и r_1 . Наконец, наихудшие условия транспорта частиц шлама будут в пристеночной зоне III скважины, ограниченной радиусами R_2 и r_2 . Последнее объясняется тем, что в зоне III отсутствуют круговые возмущения потока жидкости, характерные для зоны II, вызванные вращением бурильной колонны и облегчающие транспорт частиц шлама.

Рис. 1. Распределение скоростей и силы, приложенные к частице в зоне кольцевого пространства



Тем не менее, и для частиц шлама, находящихся в зоне III при определенных обстоятельствах, создаются условия удаления их из скважины. Это связано, главным образом, с появлением силы, прижимающей частицы к стенкам скважины. Упомянутая прижимающая сила возникает при определенных условиях в результате электрохимических процессов, протекающих в буровом растворе и связанных с действием электростатических сил отталкивания и притяжения.

На частицу (радиусом r) будет также действовать сила P_0 (рис. 1), равная силе ее тяжести за вычетом выталкивающей (архимедовой) силы:

$$P_0 = M \cdot g - V \cdot \rho_{\text{бр}} g, \quad (2)$$

где M – масса частицы; $\rho_{\text{бр}}$ – плотность бурового раствора; V – объем частицы.

Кроме того, на частицу будет действовать сила скоростного напора $T_{\text{сн}}$ бурового раствора, равная:

$$T_{\text{сн}} = \frac{C_x S_x \gamma_{\text{бр}} v_{2\text{ср}}^2}{2g}, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент обтекания частицы; S_x – миделево сечение частицы; $\gamma_{\text{бр}}$ – удельный вес бурового раствора; $v_{2\text{ср}}$ – средняя скорость потока, действующая на частицу у наружной трубы (у стенки скважины).

Решение дифференциальных уравнений плоского движения твердого тела позволяет вычислить скорость подъема шлама (для частицы сферической формы) по следующему уравнению:

$$V_n = \frac{(T_{\text{сн}} - P_0 - F_{\text{мп}}) t}{M}, \quad (4)$$

где $M = 4/3 \pi r^3 c_r$ (c_r – плотность выбуренной частички). Полученная скорость подъема частицы не может быть больше скорости переноса частиц в центральной зоне.

Подставляя величины M и V в уравнении (2), получаем:

$$\begin{aligned} P_0 &= 4/3 \pi r^3 c_r g - 4/3 \pi r^3 c_{\text{бр}} g = \\ &= 4/3 \pi r^3 g (c_r - c_{\text{бр}}). \end{aligned} \quad (5)$$

На частицу действует также сила трения $F_{\text{мп}}$, возникающая в точках ее соприкосновения с глинистой коркой. Эта сила направлена в сторону, противоположную силе $T_{\text{сн}}$. С силой трения связана другая сила, упомянутая выше, так называемая прижимающая сила. Модули этих сил связаны между собой соотношением:

$$F_{\text{мп}} = (0,6 F_{\text{мп}} + T_{\text{сн}} (0,4 - \frac{e}{r}) - 0,4 \cdot P_0) \frac{r}{f_k}, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения качения.

Из формулы (1) следует, что движение частицы вверх может происходить при выполнении условия

$$T_{\text{сн}} - P_0 - F_{\text{мп}} > 0.$$

Отсюда

$$T_{\text{сн}} > P_0 + F_{\text{мп}}. \quad (7)$$

Поскольку эпюра распределения скоростей потока бурового раствора треугольная, то сила скоростного потока $T_{\text{сн}}$ будет действовать на рас-

стоянии $\frac{2}{3} d_r$ от стенки скважины. Если перенес-

ти силу $T_{\text{сн}}$ в центр частицы на величину e (рис. 1), тогда добавляется момент:

$$M_{\text{сн}} = T_{\text{сн}} \cdot e = T_{\text{сн}} \cdot (\frac{2}{3} d_q - \frac{d_q}{2}) = T_{\text{сн}} \cdot \frac{1}{6} d_q.$$

Качение частицы без скольжения может иметь место при значениях силы $T_{\text{сн}}$, не превосходящих определенного предела, соответствующего предельному значению силы трения:

$$F_{\text{мп}} \leq f \cdot F_{\text{мп}}. \quad (8)$$

После преобразований окончательно получим величину прижимающей силы:

$$F_{\text{мп}} = \left[T_{\text{сн}} (1 - \frac{e}{r}) - P \right] \cdot \frac{r}{f_k}. \quad (9)$$

Таким образом, подъем бурового шлама на дневную поверхность происходит в результате действия сил, имеющих различную природу. Между частицами выбуренной породы и буровым раствором возникают силы, обусловленные их физико-химической природой. С другой стороны, действуют силы проскальзывания частиц в растворе, обусловленные их весом. В неподвижном растворе осаждающаяся частица вскоре приобретает постоянную направленную вниз конечную скорость осадения. Она зависит от разности плотностей частицы и раствора, размера и формы частицы, вязкости раствора, а также от турбулизации раствора в непосредственной близости к частице, для чего требуется определенная скорость ее движения вниз.

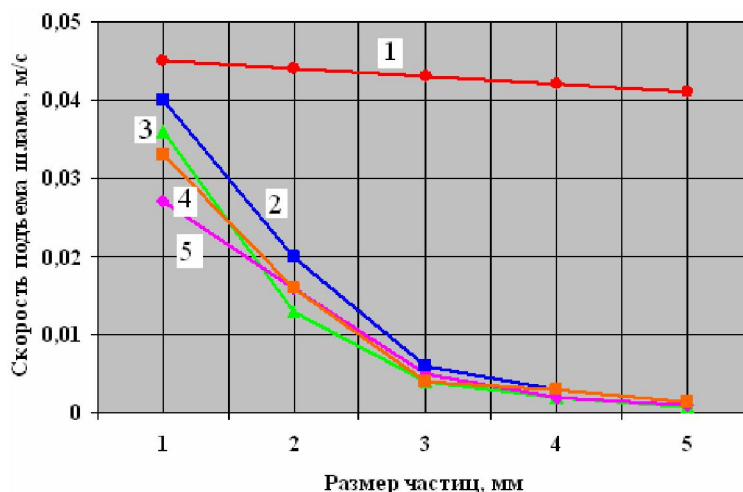


Рис. 2. Зависимость скорости подъема шлама от размера частиц: 1 – рассчитанные по Маковею, 2–5 – по предложенной модели для различных буровых растворов

По формуле (4) в программе Maple 11 были рассчитаны значения скоростей подъема шлама и величин прижимающей силы в разработанных системах буровых растворов для различных размеров частичек выбуренной породы. На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости скоростей подъема шлама от диаметра частиц для некоторых разработанных буровых растворов (кр. 2–5). Для сравнения рассчитаны значения скоростей подъема шлама по формулам, приведенным в монографии Маковея [4].

По Маковею, абсолютная скорость, необходимая для подъема выбуренной породы с забоя на поверхность, определяется темпом накопления шлама на забое (следовательно, скоростью проходки) и максимально допустимой объемной долей твердой фазы в циркулирующем буровом растворе.

Объемная доля твердых частиц в буровом растворе, находящемся в кольцевом пространстве (C_{sl}), определяется соотношением между их объемом и объемом бурового раствора в кольцевом пространстве:

$$C_{sl} = \frac{D_s^2 v_m}{(D_s^2 - d_p^2) v_r}, \quad (10)$$

где D_s – диаметр скважины; d_p – наружный диаметр буровых труб; v_m – скорость проходки. Откуда средняя скорость подъема шлама:

$$V_r = \frac{D_s^2}{D_s^2 - d_p^2} \frac{v_m}{C_{sl}}. \quad (11)$$

Согласно соотношению (11), скорость подъема шлама должна быть тем выше, чем больше скорость проходки и диаметр коронки и чем уже кольцевое пространство скважины.

Следует учесть, что при ламинарном режиме возможно увеличение длительности транспортирования шлама, что повышает вероятность диспергирования твердых частиц и загустевания бурового раствора. При этом затрудняется перенос частиц и появляется возможность образования застойных зон в узких каналах и в местах изменения проходного сечения. В таких местах увеличивается скорость падения частиц шлама, которую рассчитывают по формуле:

$$U = 0,267 \phi_p, \quad (12)$$

где ϕ_p – среднее напряжение сдвига, создаваемое падающей частицей, Па. Оно вычисляется по формуле:

$$\phi_p = 2,18 \sqrt{h_r (\rho_r - \rho_f)}, \quad (13)$$

где h_r – толщина частицы (в случае сферы берется диаметр частицы), м; ρ_r – плотность частицы; ρ_f – плотность бурового раствора (кг/м^3).

Скорость сдвига вблизи частицы Y рассчитывают по реологическим параметрам бурового раствора:

$$Y = \left(\frac{\tau_p}{K}\right)^{1/n}, \quad (14)$$

где K – показатель консистенции, n – показатель нелинейности.

Затем вычисляется критическая скорость сдвига с помощью соотношения:

$$Y_c = \frac{52}{d \sqrt{\rho_f}}. \quad (15)$$

Путем сравнения этих двух величин уточняется режим течения бурового раствора (ламинарный, переходный или турбулентный).

Необходимая скорость восходящего потока вычисляется:

$$V_{as} = U + V_r. \quad (16)$$

Иначе говоря, минимальная скорость восходящего потока, при которой начинается эффективная транспортировка твердых частиц породы, равна скорости их свободного падения. Этот факт неоднократно подтверждался, в том числе опытами Сиффермана [1].

Тем не менее многочисленными экспериментами доказано, что скорость подъема шлама приближенно соответствует разнице ($v_{as} - u$), где величина u определена для неподвижной жидкости в неограниченном пространстве. Иногда отмечали, что время подъема шлама с забоя скважины до поверхности в несколько раз больше расчетной указанной разницы [5]. Не всегда частицы меньших размеров достигают поверхности первыми, хотя их скорость проскальзывания меньше. Вынос на поверхность таких частиц может оказаться более затруднительным, чем подъем крупных частиц. Сифферман установил, что фактическая средняя скорость подъема шлама меньше теоретической на 10–15 % при ламинарном режиме и на 20–25 % при турбулентном режиме течения бурового раствора.

Эти несоответствия объясняются некоторыми дополнительными явлениями, а именно: неравномерностью профиля скоростей восходящего потока, эксцентриситетом и вращением колонны бурильных труб, влиянием стенок, разнообразием конфигураций и размеров частиц бурового шлама, их взаимодействием, искривлением ствола скважины и т. п.

В литературе есть мнение, что при ламинарном режиме течения вследствие параболической формы профиля скоростей на частицы действует так называемый опрокидывающий момент и они перемещаются к стенкам, где скорость течения меньше. Здесь частицы могут оставаться без движения или скользить вниз до тех пор, пока их не «подхватит» вновь и не увлечет восходящий поток жидкости. Этот процесс может повторяться многократно. Траектория движения частиц зависит от соотношения их поперечных размеров и зазора между бурильными трубами и стенками скважины. Более мелкие частицы, имеющие форму чешуек, дольше транспортируются восходящим потоком, поскольку ориентируются ребрами по направлению потока и при перемещении образуют петли. Более крупные частицы располагаются, как правило, перпендикулярно к

направлению течения и выносятся быстрее [2]. Если размеры частиц шлама близки к поперечным размерам канала течения, то возникает и пристенный эффект, в результате чего скорость падения частиц уменьшается.

Нами предлагается такая интерпретация поведения частиц, согласно которой на частицы действует прижимающая сила, обусловленная электрохимической природой частиц выбуренной породы и бурового раствора. Вследствие этого частицы породы, обладая определенным зарядом, притягиваются к стенкам скважины и катятся по ним в восходящем потоке бурового раствора.

По мнению Чьена [6], соотношение (16) следует изменить следующим образом:

$$V_{as} = \delta U + V, \quad (17)$$

где δ – коэффициент, учитывающий характер профиля скоростей. В ламинарном режиме коэффициент δ следует принимать большим единицы. Нами принято значение 1.3 в предположении, что, по крайней мере 80 % площади проходного сечения канала занято областью течения, где скорости выше среднего по сечению значения. Рассчитанные значения величин скоростей подъема частиц шлама при среднем значении величины скорости проходки для всех разработанных буровых растворов составляют $\approx 0,045$ – $0,040$ м/с (рис. 2, кр. 1).

Таким образом, сравнение величин скоростей подъема шлама, рассчитанных по предложенной модели и по Маковею, позволили сделать следующие выводы:

- в предложенной модели учтен неравномерный характер распределения скоростей в пристеночной зоне скважины;
- на частицу выбуренной породы в этой зоне действует прижимающая сила, возникающая в результате электрохимических процессов в буровом растворе;
- наличие этих двух фактов позволяет утверждать, что процесс транспортировки шлама в указанной зоне осуществляется путем качения частиц в направлении к устью скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sifferman T.R. s. a. Drill-cutting transport in full-scale vertical annuli // J. Petr. Tech. Nov, 1974. P. 1295-1302.
2. Williams C.T. si Bruce G.N. Carrying capacity of drilling muds // Trans. АIME. 1951. V. 192. P. 111-120.
3. Кудайкулова Г.А., Федоров Б.В. Математическая модель

процесса очистки скважины от выбуренной породы // Записки Горного института. СПб., 2008. № 4. С. 33-37.

4. *Маковей Н.* Гидравлика бурения. М.: Недра, 1986. 536 с.

5. *Рабинович Н.Р.* Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М., 1989. 270 с.

6. *Chien Sze-Foo.* Annular velocity for rotary drilling operations // Intern. J. Rock. Mech. Min. Sci. 1972.V. 9, N 3. P. 403-416.

Резюме

Ұсынылған математикалық модель бойынша бұр-ңыланған таужыныстарының ұсақ кесектерінің жылдамдығы

есептелінген. Ұңының сақиналық кеңістігінде пайда болған тарту күшінің әсерін ескере отырып жылдамдықтардың таралуы көрсетілген.

Summary

The speeds of lifting of particles drilling cuttings according to offered mathematical model are calculated. Given real distribution of speeds in ring space with consideration the pressing force operating in near of well zone.

УДК 622.244.442.063

КазНТУ

Поступила 10.01.09г.