

УДК 622.242.6

И. П. Ганин, канд. техн. наук, В. В. Куликов, д-р техн. наук

*Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ), Москва, Россия*

## Транспортирование частиц бурового шлама по скважине в поле действия массовых сил

Рассмотрены формы вращения жидкости в колонне бурильных труб и кольцевом пространстве скважины при роторном бурении. Проанализированы закономерности силовых воздействий полей массовых сил на транспортируемые частицы бурового шлама в скважине. Обоснована необходимость учета формы вращения жидкости при расчете процесса гидротранспортирования частиц шлама.

Ключевые слова: частица шлама, силы, вращение жидкости.

Для обеспечения выноса выбуренных частиц шлама из скважины потоком промывочной жидкости необходимо, чтобы скорость шламонесущего потока превышала так называемые «критические» значения, при которых имеет место взвешивание частиц в потоке. При этом суммарный вектор скорости не обязательно ориентирован вверх по скважине: он может иметь достаточно большую составляющую от вращения жидкости вокруг оси скважины. В плоскости поперечного сечения скважины на частицы жидкости и шлама, находящегося в ней, действуют массовые силы, существенным образом определяющие характер вращательного движения.

В процессе транспортирования бурового шлама потоком очистного агента частицы выбуренной горной породы находятся в зоне влияния двух гравитационных полей – естественного поля тяготения Земли и искусственного поля тяжести, создаваемого вращающейся в шламонесущем потоке колонной бурильных труб (принцип эквивалентности сил тяготения и сил инерции [12]). Воздействие этих гравитационных полей на частицы шлама проявляется в виде сил тяжести (естественной и центробежной - создаваемой вращением) и «сил-откликов» (условное название) на действие полей тяготения. Силы-отклики вызваны разницей давлений очистного агента на границах поверхности частиц шлама. Например, поле тяготения Земли вызывает появление вертикальной силы тяжести частицы. Вращение частицы шлама приводит к появлению силы тяжести – центробежной силы инерции. К силам-откликам в рассматриваемом случае относятся: архимедовы силы (подъемная и центростремительная) и центростремительная (или центробежная) поперечная сила, инициируемая разницей местных скоростей жидкости при обтекании частицы. Кроме того, перемещение частиц шлама относительно восходящего потока провоцирует появление сил сопротивления со стороны очистного агента.

Силы, действующие на частицы шлама, рассматривались во многих работах (например, в [3, 7, 9, 10]). Согласно существующим представлениям каждая частица шлама находится под действием следующих сил:

- собственно силы тяжести  $F_t$ , направленной вертикально вниз [13, 14];
- центробежной силы инерции  $F_{ei}$ , направленной от оси вращения по нормали к ней [13, 14];
- подъемной архимедовой силы  $F_A^I$ , направленной вертикально вверх (отклик на действие естественного поля тяготения [11]);
- центростремительной архимедовой силы инерции  $F_A^{ei}$ , направленной к оси вращения (отклик на действие искусственного поля тяжести [11]);
- центростремительной или центробежной (поперечной) силы  $F_{II}$ , направленной по нормали к оси вращения, в сторону вектора местной скорости жидкости большей величины (отклик на разницу местных скоростей движения жидкости на границах поверхности частицы [3; 8]);

– силы сопротивления перемещению частиц шлама относительно очистного агента  $F^*$ , направленной в сторону, противоположную направлению движения частиц относительно жидкости (сила реакции жидкости на относительное движение, или сила лобового сопротивления [1, 2]).

Действие вышеперечисленных сил следует учитывать при определении рациональной скорости движения восходящего потока, обеспечивающей устойчивый вынос шлама из скважины. Известны решения, предложенные на основе рассмотрения перечисленных сил, однако их результаты трудно признать окончательными и исчерпывающими, в связи с тем, что предложенные решения основываются на моделях, в которых не учтено комплексное воздействие ряда существенных факторов. Так, в работах [7, 9, 10] не учитывается вращение шламонесущего потока, отсутствует связь между задаваемой частотой вращения бурового инструмента и рациональным значением скорости движения восходящего потока. Это вызывает потребность в детальном рассмотрении силовых воздействий на частицы шлама с целью раскрытия физической сущности процессов и обоснования, на этой основе, рациональных параметров скважинного гидротранспорта выбуренных горных пород.

Силы  $F_{ин}$ ,  $F_A^{ин}$ , вызванные действием искусственного поля тяжести, определяются частотой и видом вращения жидкости. В гидромеханике принято выделять идеализированные виды вращения [1, 12]: вихревое (твердое), поступательное (потенциальное) и деформационное. При роторном бурении вихревое движение возникает в результате воздействия вращающейся колонны бурильных труб (как центрифуги [11]) на промывочную жидкость внутри нее. Потенциальный вид движения (в его классической форме) инициируется вращающейся колонной (аналогично одиночному вихревому шнуру [4, 6]) в неограниченной (условно) стенками скважины жидкости, омывающей наружную поверхность труб.

Обобщенная форма записи уравнения вида вращения жидкости представляется следующим образом:

$$w_x \cdot x^m = \omega_x \cdot x^{m+1} = idem, \quad (1)$$

где:  $w_x$  – местная окружная скорость вращения жидкости на расстоянии  $x$  от оси вращения;  $x$  – текущее значение радиуса вращения;  $\omega_x$  – местная угловая скорость вращения жидкости на расстоянии  $x$  от оси вращения;  $(w_x \cdot x)$  – момент местной окружной скорости вращения жидкости [5, 7];  $m$  – целое число, принимающее значения, равные 1 и -1.

При  $m = -1$  зависимость (1) примет вид:

$$\frac{w_x}{x} = \omega_x = \omega = idem, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения бурового снаряда.

Уравнение (2) – уравнение вихревого, иначе непотенциального, или твердого, вращения жидкости (по закону вращения твердого тела [1, 4, 5, 11, 12, 14]).

При  $m = 1$  формула (1) преобразуется в частное решение:

$$w_x \cdot x = \omega_x \cdot x^2 = idem. \quad (3)$$

Зависимость (3) представляет собой уравнение потенциального, или безвихревого (другие названия: циркуляционного, поступательного) вращения жидкости, она соответствует закону сохранения момента местной окружной скорости вращения, являющегося, в свою очередь, частным случаем закона сохранения момента импульса для стационарного потока жидкости [1, 4, 5, 6, 12, 14]).

Соответственно вышеприведенной модели, при промывке скважины в процессе роторного бурения, рассмотрим следующие идеализированные формы вращения потока промывочной жидкости.

### 1. Равномерное твердое вращение жидкости в вертикальной колонне бурильных труб.

При равномерном вращении [14] колонны бурильных труб ее частота вращения  $n$  неизменна, вращение жидкости, находящейся в колонне труб – твердое (рис. 1), т.е. справедливо уравнение (2).

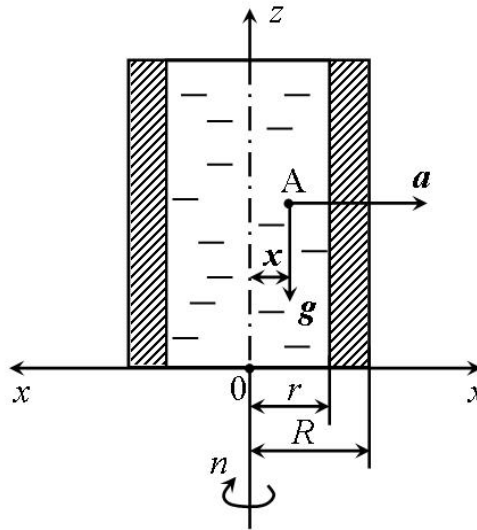


Рис. 1. Равномерное твердое вращение жидкости в вертикальной колонне бурильных труб

$r, k$  – внутренний и наружный радиус колонны бурильных труб соответственно;  $x$  – текущее значение радиуса вращения жидкости в точке  $A$ ;  $g, a$  – напряженность естественного поля тяжести (ускорение силы тяжести, или ускорение свободного падения) и искусственного поля тяжести (нормальное, или центробежное, ускорение) в точке  $A$  соответственно;  $n$  – задаваемая частота вращения колонны бурильных труб;  $Oz, Ox$  – координатные оси.

Выберем внутри жидкости произвольную точку  $A$  (рис. 1). В этой точке, помимо напряженности естественного поля тяжести  $g$  (ускорения силы тяжести, или ускорения свободного падения [13]), в силу принципа эквивалентности [13] действует напряженность искусственного поля тяжести  $a$  (нормальное, или центробежное, ускорение)

$$a = w_x \cdot \omega_x = w_x \cdot \omega. \quad (4)$$

Но [14]

$$\omega = 2\pi \cdot n, \quad (5)$$

$$w_x = \omega \cdot x = 2\pi \cdot n \cdot x, \quad (6)$$

где:  $n$  – задаваемая частота вращения колонны бурильных труб.

Уравнение (6) характеризует закон распределение местных окружных скоростей вращения жидкости внутри колонны бурильных труб (рис. 2).

В данном случае силы внутреннего трения в жидкости и между жидкостью и внутренней поверхностью колонны бурильных труб отсутствуют [16], частота вращения жидкости равна частоте вращения колонны бурильных труб. После подстановки зависимостей (5) и (6) в (4), имеем:

$$a = 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot x. \quad (7)$$

Уравнение твердого вращения жидкости (2), с учетом (5) и (6), после сокращений примет вид:

$$n = idem. \quad (8)$$

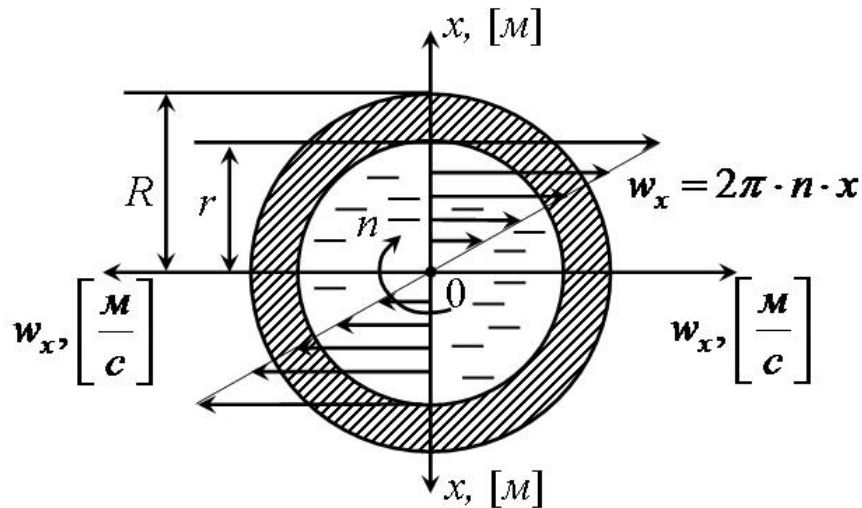


Рис. 2. Эпюра местных окружных скоростей вращения жидкости внутри колонны бурильных труб

Уравнение (8) показывает, что частота вращения жидкости внутри колонны бурильных труб неизменна по радиусу и равна задаваемой частоте вращения труб.

Центробежная сила инерции  $F_{ei}$ , действующая на твердую частицу в жидкости и направленная от оси вращения по нормали, оценивается следующим образом:

$$F_{ин} = m_{ш} \cdot a_{ш}, \quad (9)$$

где  $a_{ш}$  – центробежное ускорение частицы шлама.

Примем, в соответствии с данными работы [3], что при окружном движении частицы шлама ее проскальзывание относительно вращающейся жидкости отсутствует. Тогда  $a_{ш} = a$ .

$$F_{ин} = m \cdot a = m \cdot \omega_x^2 \cdot x = \rho_{ш} \cdot V_{ш} \cdot \omega_x^2 \cdot x = \frac{\pi}{6} \cdot \rho_{ш} \cdot d_{ш}^3 \cdot \omega_x^2 \cdot x. \quad (10)$$

Понятно, что с увеличением  $x$  центробежная сила возрастает. Ей противодействует «сила-отклик» на действие искусственного поля тяжести – центростремительная архимедова сила инерции  $F_A^{ei}$ , направленная к оси вращения. Центростремительная архимедова сила инерции  $F_A^{ei}$  определяется по формуле, структурно аналогичной (10), но в ней вместо плотности  $\rho_{ш}$  присутствует  $\rho$  – плотность жидкости.

$$F_A^{un} = m \cdot a = m \cdot \omega_x^2 \cdot x = \rho \cdot V_{ш} \cdot \omega_x^2 \cdot x = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \cdot d_{ш}^3 \cdot \omega_x^2 \cdot x. \quad (11)$$

Таким образом, отличие величины  $F_A^{un}$  в формуле (11) от  $F_{ин}$  в (10) заключается в величине плотности. В результате имеет место процесс механического разделения жидких неоднородных систем в поле центробежных сил, возникающих при сообщении находящемуся внутри бурильных труб объему жидкости вращательного движения. Движущей силой процесса является разность центробежных сил, действующих на частицы твердой фазы, и на окружающую их жидкость:

$$F_{ц} = F_{ин} - F_A^{un} = \omega^2 \cdot r \cdot (m_T - m_{жс}), \quad (12)$$

где:  $\omega$  – угловая скорость вращения частицы (рад/с);  $x$  – радиус вращения;  $m_T$ ,  $m_{жс}$  – масса, соответственно, частицы и вытесняемой ею жидкости.

Таким образом, можно сделать вывод: если осуществляется роторное бурение с обратной промывкой, то частицы выбуренной породы в шламнесущем потоке внутри бурильной колонны под воздействием полей массовых сил концентрируются вблизи внутренней поверхности бурильных труб, формируя в этой зоне полидисперсную среду повышенной плотности.

Иная картина распределения твердых частиц в шламнесущем потоке под воздействием тех же самых сил формируется в кольцевом пространстве между колонной бурильных труб и стенками скважины.

## 2. Равномерное потенциальное вращение неограниченной стенками скважины жидкости снаружи вертикальной колонны бурильных труб

Рассмотрим вращение колонны бурильных труб в неограниченном пространстве жидкости. Подобная модель в определенной мере соответствует поведению шламнесущего потока при бурении скважин большого диаметра с прямой промывкой.

Если, как и в первом случае, в соответствии с [3], принять, что при окружном движении частицы шлама ее проскальзывание относительно вращающейся жидкости отсутствует, т.е.  $a_{ш} = a$ , то для характеристики центробежных сил и соответствующих «сил-откликов», необходимо определить распределение скоростей во вращающемся потоке.

Вращающаяся колонна бурильных труб за счет сил внутреннего трения приводит во вращение окружающую ее жидкость (рис. 3). При этом бурильная колонна по воздействию на окружающую ее жидкость уподобляется единичному вихревому шнуру. Вращение жидкости в рассматриваемом случае относится к потенциальным течениям, т.е. безвихревым, при которых всякий малый объем жидкости деформируется и перемещается поступательно, не имея вращения; при этом соответственно видоизменяется распределение скоростей.

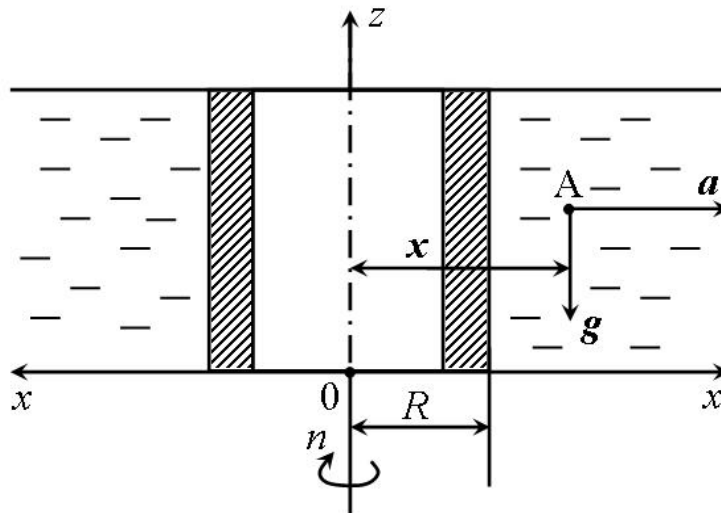


Рис. 3. Равномерное потенциальное вращение неограниченной стенками скважины жидкости снаружи вертикальной колонны бурильных труб

$R$  – наружный радиус колонны бурильных труб;  $x$  – текущее значение радиуса вращения жидкости в точке  $A$ ;  $g$ ,  $a$  – ускорение силы тяжести и нормальное ускорение в точке  $A$  соответственно;  $n$  – задаваемая частота вращения колонны бурильных труб;  $0z$ ,  $0x$  – координаты оси.

Равномерное потенциальное вращение неограниченной жидкости подчиняется закону сохранения момента импульса для потока жидкости:

$$M \cdot w \cdot R = M \cdot \omega \cdot R^2 = M \cdot w_x \cdot x = M \cdot \omega_x \cdot x^2 = idem, \quad (12)$$

где:  $M$  – массовый расход вращающейся вокруг колонны бурильных труб жидкости;  $w$ ,  $w_x$  – местная окружная скорость вращения жидкости на расстоянии от оси вращения  $R$  (равна окружной скорости вращения наружной поверхности бурильных труб) и  $x$  соответственно;  $x$  – текущее значение радиуса вращения;  $R$  – наружный радиус бурильных труб;  $\omega$ ,  $\omega_x$  – местная

угловая скорость вращения жидкости на расстоянии от оси вращения  $R$  (равна угловой скорости вращения бурильных труб) и  $x$  соответственно;  $(w_x \cdot R)$ ,  $(w_x \cdot x)$  – момент местной окружной скорости вращения жидкости на расстоянии от оси вращения  $R$  и  $x$  соответственно.

Уравнению (12) удобнее придать более простую форму представления, произведя сокращение величины  $M$ , неизменной при равномерном вращении колонны бурильных труб:

$$w \cdot R = \omega \cdot R^2 = w_x \cdot x = \omega_x \cdot x^2 = idem. \quad (13)$$

Уравнение (13) выражает закон сохранения момента местной окружной скорости вращения жидкости. Оно описывает закономерность распределения местной окружной скорости вращения в неограниченной стенками жидкости (рис. 4).

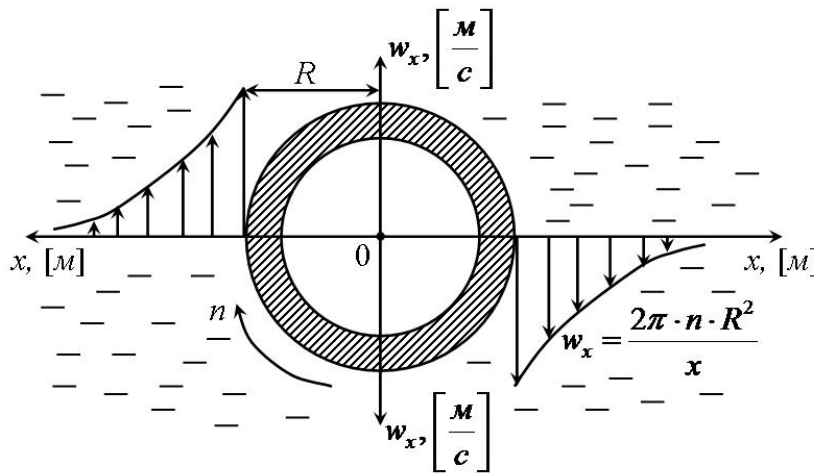


Рис. 4. Эпюра местных окружных скоростей неограниченной потенциально вращающейся жидкости

Уравнение потенциального вращения жидкости (3) эквивалентно уравнению (13).

По аналогии с уравнениями (5) и (6) можно записать:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (14)$$

$$w = \omega \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R. \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) уравнение (13) примет вид:

$$w \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R^2 = 2 \cdot \pi \cdot n_x \cdot x^2 = idem, \quad (16)$$

где:  $n$ ,  $n_x$  – частота вращения колонны бурильных труб и местная частота вращения жидкости на расстоянии  $x$  от оси вращения;  $(2 \cdot \pi \cdot n \cdot R^2)$ ,  $(2 \cdot \pi \cdot n_x \cdot x^2)$  – момент местной окружной скорости на расстоянии от оси вращения  $R$  и  $x$  соответственно.

Уравнение (16) показывает, что момент местной окружной скорости вращения жидкости снаружи колонны бурильных труб остается неизменным, а местная частота вращения жидкости переменна по радиусу.

При данной частоте вращения бурильных труб  $n = const$  момент местной окружной скорости вращения жидкости легко рассчитывается: он равен величине

$$w \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R^2 = const. \quad (17)$$

Как и при вращении жидкости внутри колонны бурильных труб, на частицу жидкости, находящуюся снаружи колонны на расстоянии  $x$  от оси вращения, действуют два ускорения: силы тяжести  $g$  и нормальное  $a$  (рис. 5).

В соответствии с уравнениями (4), (13) и (17), имеем:

$$a = w_x \cdot \omega_x = \frac{const^2}{x^3}, \quad (18)$$

или

$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot R^2}{x^3}. \quad (19)$$

В соответствии с тем, что движущей силой процесса перемещения частиц в горизонтальной плоскости является разность двух сил  $F_{ин}$  и  $F_A^{ин}$ , то аналогично (10) и (11) с условием движения частиц без «проскальзывания», справедливо следующее выражение:

$$\begin{aligned} F_{ин} - F_A^{ин} &= m_{ин} a_{ин} - m_{жс} \cdot a = a(m_{ин} - m_{жс}) = \\ &= a \cdot (\rho_{ин} - \rho_{жс}) \cdot V_{ин} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot R^2}{x^3} \cdot (\rho_{ин} - \rho_{жс}) \cdot V_{ин} \end{aligned} \quad (20)$$

Из (13) и (20) следует, что вращательные эффекты, а вместе с ними и центробежные силы, довольно быстро убывают в радиальном направлении от оси бурильной колонны. Диспергированные частицы в шламонесущем потоке располагаются на определенном удалении от бурильной колонны и перестают испытывать влияние эффективного «взвешивания» под воздействием вращательного движения жидкости. Именно этим фактором можно объяснить необходимость применения турбулизаторов в скважинах больших диаметров.

### 3. Равномерное вращение жидкости между колонной бурильных труб и стенками скважины в относительно небольшом зазоре

Распределение местных окружных скоростей вращения жидкости между колонной бурильных труб и стенками скважины (рис. 8) описывается зависимостью [6, 15]

$$w_x = \frac{\omega \cdot R^2}{x} \cdot \frac{R_c^2 - x^2}{R_c^2 - R^2}, \quad (24)$$

где  $R_c$  – радиус скважины.

Или, с учетом (6) и (14), распределение местных частот вращения жидкости будет подчиняться зависимости

$$n_x = \frac{n \cdot R^2}{x^2} \cdot \frac{R_c^2 - x^2}{R_c^2 - R^2}. \quad (25)$$

В соответствии с уравнениями (4) и (6):

$$a = \omega_x^2 \cdot x = \frac{w_x^2}{x}. \quad (26)$$

Подставляя (14) и (24) в (26), получим:

$$n_x = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot R^4}{x^3} \cdot \frac{(R_c^2 - x^2)^2}{(R_c^2 - R^2)^2}, \quad (27)$$

или

$$a = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot R^4}{(R_c^2 - R^2)^2} \cdot \left( \frac{R_c^4}{x^3} - 2 \cdot R_c^2 \cdot \frac{1}{x} + x \right). \quad (28)$$

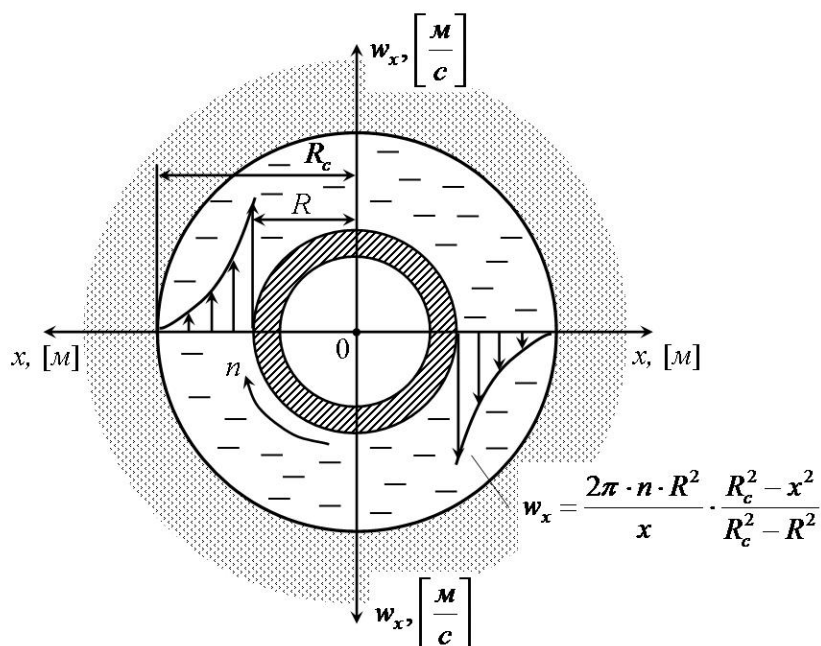


Рис. 5. Эпюра местных окружных скоростей вращения жидкости между колонной бурильных труб и скважиной

Аналогично вариантам рассмотренным выше ((10)÷(12), (20)), результирующее силовое воздействие, смещающее частицы в поперечном сечении потока, определится следующим образом:

$$F_{ин} - F_A^{ин} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot R^4}{(R_c^4 - R^2)^2} \cdot \left( \frac{R_c^4}{x^3} - 2 \cdot R_c^2 \cdot \frac{1}{x} + x \right) \cdot (\rho_{ш} - \rho_{ж}) \cdot V_{ш}. \quad (29)$$

Анализируя полученное выражение, можно сделать вывод, что для рассмотренного случая эффект от вращения колонны достаточно существенный. С одной стороны, центробежные силы стремятся сместить частицы от оси вращающейся колонны, с другой – устойчивый потенциальный характер вращения жидкости в ограниченном объеме способствует формированию критических скоростей движения жидкости, при которых происходит устойчивое «взвешивание» твердых частиц с переносом их шламонесущим потоком промывочной жидкости.

Тот факт, что поток является потенциальным, означает однозначное выполнение уравнения Бернулли, согласно которому если местная скорость вращения жидкости в каких-то точках (на больших расстояниях от оси) существенно падает, то в этих точках повышается давление. Это сопровождается возникновением дополнительных центростремительных сил, направленных к оси скважины, имеющих не только гидродинамическую, но архимедову природу. Таким образом, небольшие зазоры кольцевых пространств являются наиболее оптимальными с точки зрения организации промывки скважин при роторном бурении.

#### Выводы

1. Надежное, обоснованное расчетом, транспортирование частиц шлама по стволу скважины определяется действующими на частицу массовыми силами, в их числе – центробежными и центростремительными.

2. Характер соотношения между центробежными и центростремительными силами существенным образом определяется формой вращательного движения транспортирующего очистного агента в скважине.

3. Вихревая либо потенциальная форма вращательных движений шламонесущего потока определяет особенности концентрации диспергированных частиц выбуренной породы в поперечных сечениях скважины при роторном бурении, что необходимо учитывать при организации процесса промывки.



4. Рациональное значение объемного расхода очистного агента необходимо устанавливать не только с учетом свойств и режима течения промывочной жидкости, величин зенитного угла скважины, механической скорости бурения и задаваемых частот вращения бурового снаряда. Необходимо учитывать силовое воздействие полей массовых сил на транспортируемые частицы бурового шлама, и как результат этого – концентрацию частиц шлама в транспортирующем потоке на различных расстояниях от оси скважины.

### Библиографический список

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. - М.: Наука, 1969. - 824 с.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. - М.: Недра, 1982. - 224 с.
3. Промывка при бурении, креплении и цементировании скважин / [В.Г. Беликов, А.И. Булатов, Р.Ф. Уханов и др.]. - М.: Недра, 1974. - 240 с.
4. Газовая динамика. Механика жидкости и газа / [В.С. Бекнев, В.М. Епифанов, А.И. Леонтьев и др.]; под общ. ред. А.И. Леонтьева. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. - 671 с.
5. Вукалович М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. - М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
6. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев. - М.: Машиностроение, 1987. - 440 с.
7. Куликов В.В. Динамика движения частиц шлама в жидком и газообразном очистных агентах / В.В. Куликов, В.Н. Родионов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. - № 6. - С. 21 – 25.
8. Леви И.И. Динамика русловых потоков / И.И. Леви. - М. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. - 242 с.
9. Леонов Е.Г. Гидроаэромеханика в бурении / Е.Г. Леонов, В.И. Исаев. - М.: Недра, 1987. - 304 с.
10. Леонов Е.Г. Теория и методика расчета расхода бурового раствора различной реологии для очистки от шлама ствола наклонно-направленных скважин / Е.Г. Леонов, В.И. Исаев, И.П. Лукьянов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. - № 8. - С. 24 – 31.
11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. - М.: Наука, 1973. - 848 с.
12. Новиков И.И. Термодинамика / И.И. Новиков. - М.: Машиностроение, 1984. - 592 с.
13. Савельев И.В. Курс общей физики: в 3-х т. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1987. - Т. 1: Механика. Молекулярная физика. - 1987. - 432 с.
14. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. - М.: Высш. шк., 1995. - 416 с.
15. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений / С.М. Тарг. - М.-Л.: Гостехтеориздат, 1951. - 420 с.
16. Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. - Л.: Энергоиздат, 1982. - 672 с.

Надійшла до редакції 22.04.2013

I. П. Ганін, В. В. Куликов

*Російський державний геологорозвідувальний університет імені Серго Орджонікідзе (МГПІ-РГГРУ), Москва, Росія*

#### Транспортування часток бурового шламу по свердловині в полі дії масових сил

Розглянуті форми обертання рідини в колоні бурильних труб і кільцевому просторі свердловини при роторному бурінні. Проаналізовані закономірності силових дій полів масових сил на частки бурового шламу, що транспортуються, у свердловині. Обґрунтована необхідність врахування форми обертання рідини при розрахунку процесу гідротранспортування часток шламу.

Ключові слова: частка шламу, сили, обертання рідини.

I. Ganin, V. Kulikov

*Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia*

#### Transportation of bore mud particles in the well in the field of action of mass forces

The paper considers the forms of rotation of liquid in the drill string and the annular space while drilling a borehole. We analyzed the laws of the force fields action on bore mud particles in the well. It is necessary to take into account the form of liquid rotation when calculating the process of particles transportation.

Keywords: bore mud particle, forces, liquid rotation.