

подачи БМС может быть изменена в сторону увеличения.

5. Качество ремонтных работ контролируется геофизическими методами: расходометрией, индукционным каротажем или опрессовкой [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, А.Г. Особенности ремонта эксплуатационных колонн технологических скважин в условиях многолетнемерзлых горных пород / А.Г. Иванов, Е.А. Гурулев, Н.А. Алексеев, Д.Н. Базаров, Д.А. Иванов, Ю.А. Арсентьев, А.П. Назаров // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сб. трудов IX международной науч.-практ. конф. Ч. 1. 7–9 ноября 2019 г. — Алматы: Казак университеті, 2019. — С. 216–223.
2. Иванов, А.Г. Опыт определения герметичности эксплуатационных колонн методом опрессовки / А.Г. Иванов, В.А. Костин, Н.А. Остапец, А.П. Ежов // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия Горно-металлургическое производство. — 1989. — Вып. 3. — С. 17–20.
3. Иванов, А.Г. Опыт восстановления герметичности технологических скважин / А.Г. Иванов, В.А. Кравцов, В.А. Костин, А.П. Ежов // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия Горно-металлургическое производство. — 1989. — Вып. 6. — С. 17–19.
4. Иванов, А.Г. Сооружение и эксплуатация скважин в криолитозоне / А.Г. Иванов, И.Н. Солодов, Е.А. Гурулев // Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья: Матер. международной науч.-техн. конф. — М.: ВНИПИПромтехнологии, 2019. — С. 204–212.
5. Кошколда, К.Н. Пути интенсификации подземного выщелачивания / К.Н. Кошколда, М.К. Пименов, Т. Атакулов и др. / Под ред. Н.И. Чеснокова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 224 с.
6. Руденская, И.М. Органические вяжущие вещества для дорожного строительства / И.М. Руденская, А.В. Руденский. — М.: Транспорт, 1984. — 229 с.
7. Справочник по геотехнологии урана (российский опыт): монография / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. — М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. — 576 с.

© Коллектив авторов, 2021

Иванов Дмитрий Александрович // dexhouse@ya.ru  
Арсентьев Юрий Александрович // arsentev1956@yandex.ru  
Соловьев Николай Владимирович // nvs@mgri-rggru.ru  
Иванов Александр Георгиевич // AlekGeorIvanov@armz.ru

УДК 622.24

Тунгусов С.А. (МГРИ-РГГРУ)

#### ПЕРЕНОС ШЛАМА ВОСХОДЯЩИМ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ПОТОКОМ ПРОМЫВОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

В статье рассматривается взаимодействие потока промывочной жидкости и частицы шлама как в восходящем потоке, так и при движении потока горизонтально. Показаны силы, действующие на частицу шлама при разном направлении потока жидкости. Рассмотрен механизм переноса частицы шлама по горизонтальному участку ствола скважины. **Ключевые слова:** бурение скважин, поток жидкости, горизонтальный ствол скважины, перенос частицы шлама.

Tungusov S.A. (MGRI-RGGRU)

#### SLUDGE TRANSFER BY UPWARD AND HORIZONTAL FLOW OF FLUSHING FLUID

*The article discusses the interaction of the flow of flushing fluid and sludge particles in both upward and horizontal flows. The forces acting on the sludge particle at different directions of the fluid flow are shown. The mechanism of the transfer of sludge particles along the horizontal section of the wellbore is considered. **Keywords:** well drilling, fluid flow, horizontal wellbore, sludge particles transfer.*

Вскрытие продуктивных пластов горизонтальными скважинами позволяет существенно повысить эффективность извлечения углеводородов из пласта. Горизонтальное бурение вместе с тем необходимо и для разведки месторождений со сложной геологией. Также горизонтальное бурение скважин находит свое применение и в том случае, если размещение вертикальных скважин на данной территории представляется затруднительным, например, на территории заповедников или вследствие непростой ледовой обстановки на шельфе. Стоит также отметить все возрастающий объем бурения наклонно-направленных скважин при разведке твердых полезных ископаемых.

Рост объемов наклонно-направленного бурения вызвал и рост числа научных публикаций на эту тему. Но эти работы пока не дают ответ на некоторые вопросы, возникающие при проектировании и бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин. В частности, таким вопросом является задача эффективного удаления шлама как по вертикальной части ствола скважины, так и в горизонтальной части ствола скважины. Для вертикальной части существует достаточно стандартный расчет скорости промывочной жидкости, которая обеспечивает транспортирование шлама от забоя к устью скважины. Для наклонной части ствола скважины и горизонтального участка на сегодняшний день нет единой методики расчетов параметров движения промывочной жидкости. Отсутствие подобной методики связано с поиском решения целого комплекса задач, возникающих при транспортировании шлама в наклонно-направленных стволах скважин: оседание частиц шлама на горизонтальной поверхности ствола скважины, образование шламовой подушки в виде наносов, скатывание шлама по наклонной поверхности.

Такое положение создает необходимость более глубокого теоретического и экспериментального изучения процессов транспортирования шлама при бурении наклонно-направленных скважин.

При очистке вертикального ствола скважины как жидким, так и газообразным очистным агентом основное внимание уделяется скорости восходящего потока, несущего частицы шлама от забоя к устью. Скорость восходящего потока очистного агента  $v$ , как правило, определяют как скорость  $v_n$  подъема выбуренной породы в восходящем потоке очистного агента

и скорость проскальзывания  $w$ . Скорость восходящего потока для выноса шлама в общем случае [6, 11] определяется выражением:

$$v = w + v_n \quad (1).$$

Минимальная скорость восходящего потока, при которой начинается движение частиц шлама по вертикали, равна скорости их свободного падения, то есть достаточным условием выноса шлама является условие  $-v = w$ . Сиферман [13] неоднократно отмечал этот факт в своих исследованиях, в том числе и в ходе экспериментов.

Однако в работе [6] отмечается, что реальное время подъема шлама с забоя скважины до поверхности в несколько раз больше рассчитанного по формуле (1). Частицы шлама меньших размеров не всегда достигают поверхности первыми, хотя их скорость проскальзывания меньше. Вынос мелких частиц на поверхность может оказаться более затрудненным, чем подъем крупных частиц. По всей вероятности подобная ситуация складывается из-за того, что более мелкие частицы способны увлекаться потоком, движущимся ближе к стенке скважины или колонне труб, поскольку скорость потока в приграничной зоне меньше [5].

В работах Сифермана показано, что средняя скорость подъема шлама в реальных условиях бурения меньше теоретической на 10–15 % при ламинарном режиме и на 20–25 % при турбулентном режиме течения промывочной жидкости. В работе [6] предлагается учитывать увеличение времени подъема шлама, то есть в выражение (1) следует ввести поправочный коэффициент (2):

$$v = k_0 w + v_n \quad (2).$$

где  $k_0$  — коэффициент, учитывающий характер профиля скоростей потока. При турбулентном режиме  $k_0 \approx 1$ , поскольку около 80 % площади сечения потока имеет скорость течения, превышающую среднюю скорость потока по этому сечению. При ламинарном режиме течения жидкости коэффициент  $k_0$  следует принимать больше единицы, как рекомендовано номограммами в работе [6]. В работе [9] авторы, ссылаясь на А.С. Денисова, считают, что значение коэффициента  $k_0$  должно быть равно от 1,13 до 1,14. В этом случае скорость проскальзывания определяется в неподвижной жидкости, а коэффициент  $k_0$  считается зависящим от площади поперечного сечения восходящего потока, вращения буровой колонны и т.д.

В работе [10] предлагается учитывать условия равновесия твердых частиц в движущемся потоке коэффициентом  $k_1$  и коэффициентом  $k_2$ , учитывающим вращение колонны буровых труб. В этом случае коэффициент  $k_0$  будет равен произведению коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ . При этом коэффициент  $k_1$  предлагается брать равным 1,14, а коэффициент  $k_2$  в диапазоне от 0,79 до 0,83.

Скорость витания (проскальзывания) в неподвижной жидкости в общем случае определяется по формуле (3) [6]:

$$w = k_c \sqrt{\frac{(\rho_n - \rho) \cdot d}{\rho}} \quad (3),$$

где  $k_c$  — эмпирический коэффициент сопротивления движению, зависящий от формы частиц;  $d$  — диаметр частицы шлама по миделеву сечению (наибольшее по площади поперечное сечение шлама);  $\rho_n$  и  $\rho$  — плотность соответственно частиц породы и промывочной жидкости. Для сферической формы частицы коэффициент  $k_c$ , который определяется по формуле (4) [6]:

$$k_c = \sqrt{\frac{4g}{3c}} \quad (4).$$

Буровой шлам в ряде случаев принято считать имеющим сферическую форму. Вообще для частиц неправильной формы используют так называемый эквивалентный диаметр — диаметр сферы, имеющий тот же объем и плотность, что и рассматриваемая частица. Коэффициент  $c$  зависит от формы, диаметра и шероховатости твердой частицы, от свойств жидкой среды и скорости обтекания [6].

Подставив выражение (4) в выражение (3) получим известную формулу Риттингера для определения скорости витания шара в потоке жидкости.

В этом случае скорость проскальзывания определяется по формуле Риттингера (5):

$$w = \sqrt{\frac{4g}{3c}} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_n - \rho) \cdot d}{\rho}} \quad (5).$$

Для ньютоновской жидкости в ламинарном режиме коэффициент  $c$  при малых числах Рейнольдса ( $Re$ ) возможно определить по формуле (6) [6]:

$$c = \frac{24}{Re} \quad (6).$$

Если подставить выражение (6) в уравнение (5), получим формулу Стокса:

$$w = \frac{(\rho_n - \rho) \cdot d^2}{18\eta} \cdot g \quad (7),$$

где  $\eta$  — вязкость жидкости.

Как известно, при турбулентном течении вязкость уже не играет значительной роли, коэффициент  $c$  практически постоянен и для частиц сферической формы равен 0,44. Для переходного режима предлагаются различные эмпирические соотношения, например, формула Аллена (8) [6]:

$$w = \frac{30}{Re^{0,625}} \quad (8).$$

Для неньютоновских жидкостей, к которым относится большее количество буровых растворов, скорость витания также определяется по формуле Риттингера, в этом случае для значения коэффициента

$k_c$  вносится эмпирическая поправка в зависимости от типа жидкости. Так, для бингамовской жидкости значение  $k_c$  можно определить по графику Р.И. Шищенко и Б.И. Есьмана [3].

В общем случае турбулентный режим течения жидкости считается более предпочтительным для выноса бурового шлама, чем ламинарный [8]. Что касается удаления шлама с забоя скважин, в перечисленных работах показано, что жидкости пониженной вязкости обеспечивают лучшую очистку забоя по сравнению с более вязкими, именно из-за турбулентного режима движения, который наступает при меньших значениях чисел  $Re$ . Вместе с тем существует мнение, что турбулентный режим потока может стать и негативным фактором, ухудшающим транспортирование шлама [6]. Подобные противоречия показывают, что как ламинарный, так и турбулентный режимы движения промывочной жидкости имеют не только определенные преимущества, но и недостатки.

Опираясь на данные, приведенные выше, можно сделать вывод о том, что основные моменты, связанные с транспортированием шлама на вертикальных участках ствола скважин, изучены в достаточно хорошей степени. Сложившаяся обширная практика показывает, что для надежного удаления шлама по вертикальному стволу скважины скорость восходящего потока должна находиться в пределах от 0,5 до 1,0 м/с в зависимости от состава и свойств разбуриваемых пород.

Подобный подход в целом можно считать применимым к вопросам выноса шлама как в горизонтальном, так и в наклонном участке ствола скважины, с той разницей, что силы, действующие на частицу, следует рассматривать с учетом положения частицы как относительно направления силы тяжести, так и относительно направления потока.

В вертикальной скважине скорость восходящего потока, скорость витания, скорость выноса частиц шлама, а также сила Архимеда и сила тяжести направлены вдоль одной оси. В наклонно-направленной скважине между направлением скорости витания и скоростью выноса существует угол так же, как и между силами тяжести и Архимеда. Поэтому для наклонного ствола уравнение (1) следует записывать в векторной форме. При записи уравнения в векторном виде возможно его использование при аналитическом описании процессов выноса шлама по стволу наклонно-направленной скважины.

Кроме того, при движении частицы в промывочной жидкости, со стороны последней, на нее действует сила лобового сопротивления среды  $F_{лс}$ , направленная в сторону движения потока, и определяемая по формуле Ньютона (9) [1, 7]:

$$F_{лс} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot S_m \cdot \rho \cdot w^2 \quad (9),$$

где  $S_m$  — площадь миделевого сечения,  $\rho$  — плотность жидкости,  $w$  — скорость движения частицы в неподвижной жидкости.

Несмотря на понимание того, что силы, действующие на частицу шлама, распределяются именно таким образом, самым распространенным мероприятием по улучшению выноса частиц шлама остается, чаще всего, увеличение расхода очистного агента и, как следствие, увеличение скорости потока. Также с целью улучшения выноса шлама может быть изменена рецептура бурового раствора, что приведет к изменению его характеристик (плотность, вязкость и т.д.), которые влияют на его выносную способность.

Но, как показывает практика, увеличение скорости потока приводит к ряду негативных последствий, которые условно можно разделить на 3 группы:

- на забое скважины — возникновение гидравлического подпора, прижатие частиц шлама к забою струей потока, промыв породоразрушающего инструмента;
- по стволу скважины — размыв ствола скважины, увеличение динамического воздействия потока в месте локального искривления, промывание элементов колонны труб и бурового инструмента;
- технические — повышение давления в промывочной системе и, как следствие, больший износ оборудования, увеличение энергозатрат и металлоемкости.

Следовательно, увеличение скорости потока (расхода) промывочной жидкости нецелесообразно, поскольку это повлечет за собой нежелательные последствия. Необходимо найти способ более эффективного удаления шлама без существенного увеличения расхода промывочной жидкости.

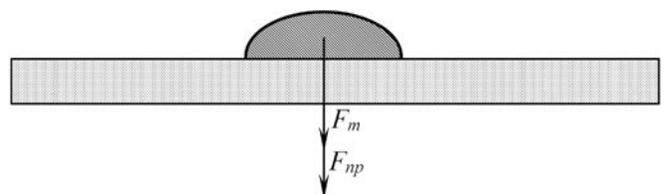
Для понимания путей решения данной задачи необходимо сначала понять механизм движения потока промывочной жидкости и ее взаимодействие со шламом. Для этого рассмотрим взаимодействие частицы шлама и потока.

Начнем с частицы шлама, имеющей плоскую грань и покоящуюся на нижней стенке горизонтального участка ствола скважины (рис. 1).

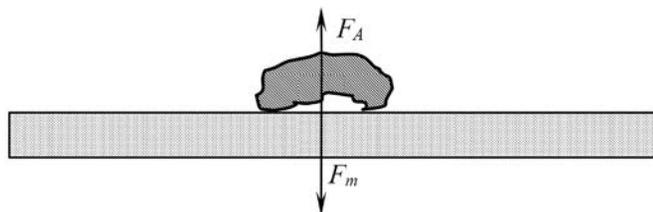
Силы, действующие на частицу, находящуюся на стенке и не имеющую под собой прослойки жидкости, две — это сила тяжести  $F_m$  и сила прижатия  $F_{np}$ . Сила тяжести, как известно, определяется из соотношения (10):

$$F_m = m \cdot g \quad (10),$$

где  $m$  — масса частицы;  $g$  — ускорение свободного падения.



**Рис. 1.** Силы, действующие на частицу шлама, покоящуюся на нижней стенке горизонтального участка ствола скважины (без прослойки жидкости под ней)



**Рис. 2.** Силы, действующие на частицу шлама покоящуюся на горизонтальной стенке ствола скважины (с прослойкой жидкости под ней)

Сила прижатия частицы к нижней стенке горизонтального участка ствола скважины будет равна силе гидростатического давления, оказываемого столбом жидкости на частицу. В силу того, что размеры частицы много меньше высоты столба жидкости, находящегося над ней, градиентом давления можно пренебречь, и тогда  $F_{np}$  можно найти, пользуясь следующим выражением (11):

$$F_{np} = \rho \cdot g \cdot h \cdot S \quad (11),$$

где  $\rho$  — плотность промывочной жидкости;  $h$  — высота столба промывочной жидкости;  $S$  — площадь проекции частицы на горизонтальную плоскость.

Этот случай относится к шламу, в основном получающемуся при разбуривании пород, имеющих в своем составе преимущественно минералы с весьма совершенной и совершенной спайностью.

Рассмотрим второй случай, когда частица не «прилипает» к стенке в силу своей неровности или по иным причинам. В этом случае распределение сил, действующих на частицу, будет иное (рис. 2).

На частицу все также продолжит действовать сила тяжести  $F_m$ , исчезнет сила прижатия  $F_{np}$ , но зато вследствие того, что частица перестанет быть частью стенки скважины (по сути дна) появится сила Архимеда  $F_A$ . Сила Архимеда будет равна (12):

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V \quad (12),$$

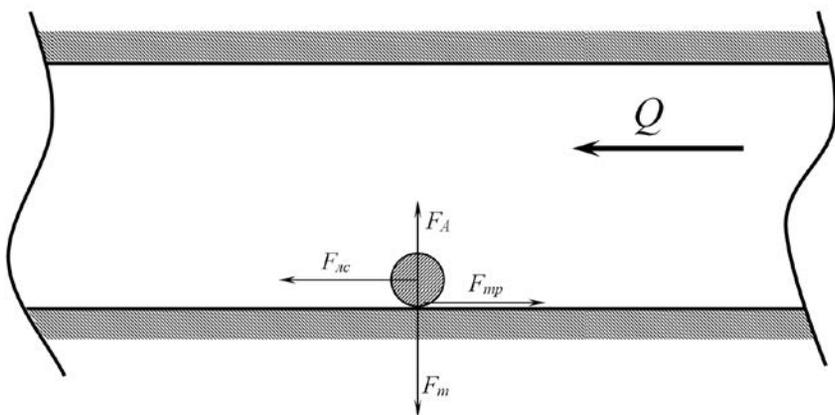
где  $V$  — объем частицы шлама.

В первом и во втором случае результирующая сила, действующая на частицу, будет направлена вниз, т.е. будет прижимать частицу к забою, причем в первом случае эта сила будет увеличиваться с глубиной погружения, а во втором с плотностью частицы эти два фактора и окажут решающую роль при попытках сдвинуть частицу шлама.

До сих пор мы полагали, что частица шлама покоится на горизонтальной стенке скважины и поток промывочной жидкости отсутствует. Рассмотрим, как поменяется картина распределения сил, если появится движение потока промывочной жидкости.

На горизонтальном участке ствола частицы, как правило, находятся на нижней стенке скважины из-за действия на них силы тяжести  $F_m$  (рис. 3). Как известно, скорость потока у стенок значительно ниже, чем в центре потока, вследствие этого воздействие потока на частицу невелико, сила лобового сопротивления  $F_{лс}$  мала по сравнению с силой трения  $F_{мп}$ , поэтому результирующая сила, необходимая для транспортирования частицы шлама, недостаточна.

При таком распределении сил движение частиц шлама по горизонтальной стенке будет отсутствовать и начнет происходить его накопление вследствие того, что те частицы, которые в начальный момент времени отделения от забоя находились во взвешенном состоянии, начнут оседать на стенку под действием силы тяжести. С увлечением расхода промывочной жидкости, то есть скорости потока, сила лобового сопротивления  $F_{лс}$  начнет возрастать и при некоторой скорости потока начнутся первые подвижки зерен шлама. Некоторые зерна шлама начнут вибрировать и срываться с места, перекатываясь при этом, так как ни одна из действующих на них пока сил не сможет перевести эти частицы во взвешенное состояние. Первыми начнут такое движение те частицы шлама, которые находились в неустойчивом равновесии и те, на которые поток оказывает наибольшее воздействие. Эти частицы шлама, как правило, находятся в верхней части осадка, нижняя же часть осадка шлама так и останется лежать на горизонтальной стенке скважины. Дальнейшее увеличение скорости потока приведет к тому, что часть частиц, которая будет выведена из равновесия, начнет все же вовлекаться в поток и двигаться скачкообразно на некоторое расстояние и опять же при этом осесть под действием силы тяжести  $F_m$ , занимая более устойчивое положение, и снова находясь в покое. Еще большее увеличение расхода промывочной жидкости, скорости потока приведет к более массовому вовлечению частиц шлама в движение, однако переход к движению частиц всей шламовой подушки потребует весьма значительного увеличения скорости потока. Но и при высоких скоростях потока шламовая подушка, скорее всего, начнет образовывать дюны, а, как известно,



**Рис. 3.** Силы, действующие на частицу шлама, находящуюся на нижней стенке скважины

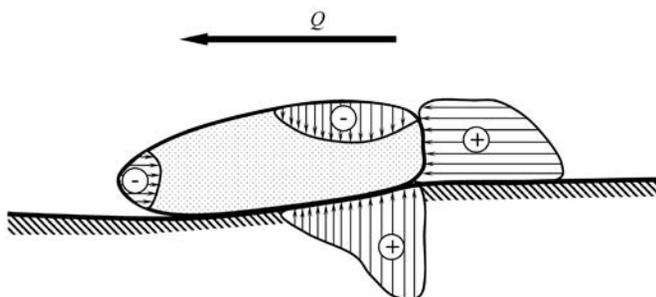


Рис. 4. Эпюры сил, действующих на частицу шлама, обтекаемую потоком промывочной жидкости

скорость перемещения дюн сравнительно невысока. В случае дюн частица шлама начнет перекаатываться, достигая верха дюны, и скатываться вниз, попадая в застойную зону, ожидая там следующую частицу, и так далее до того момента, пока на этом месте не скопится такое количество частиц, которое позволит образовать вместо впадины новое возвышение. Подобное перемещение как раз и будет являться передвижением дюны. Наконец, следующий этап увеличения скорости потока приведет к тому, что частица, перекаатываясь к вершине дюны, приобретет такую скорость, что не успеет под действием силы тяжести  $F_m$  осесть в застойной зоне, а попадает в подвижную зону следующей дюны. Такой переход очень важен, так как в этом случае дюны начинают постепенно сглаживаться, а частицы шлама переходить во взвешенное состояние. Скорость потока, при которой будут отсутствовать дюны, а частицы шлама, находящиеся на горизонтальной стенке скважины, начнут устойчиво переходить во взвешенное состояние, и будет минимально необходимой для устойчивого транспортирования частиц шлама на горизонтальном участке скважины. Назовем в данном случае эту скорость минимальной  $v_{min}$ . Следует отметить, что минимальная скорость  $v_{min}$  должна быть тем выше, чем больше концентрация взвешенных частиц в потоке [4].

Считается, что на частицы, расположенные на нижней стенке скважины, со стороны потока действует только сила лобового сопротивления  $F_{лс}$ . Как было показано выше, при таком подходе устойчивое движение частиц может начаться только при весьма большой скорости потока. Однако практика показывает, что поскольку частицы имеют несимметричную форму, то при обтекании потоком из-за разности скоростей, вызванных асимметрией частицы, возникает подъемная сила [12].

Рассмотрим частицу шлама, которая покоится на нижней стенке скважины и ее обтекает поток промывочной жидкости (рис. 4).

Как известно, в общем случае подъемная сила пропорциональна квадрату скорости потока и определяется давлением. Подъемную силу можно определить, например, из выражения (13):

$$F_n = \rho \cdot k \cdot \Omega \cdot v^2 \quad (13),$$

где  $\rho$  — плотность промывочной жидкости;  $v$  — скорость потока промывочной жидкости вблизи частицы шлама;  $\Omega$  — площадь миделевого сечения;  $k$  — коэффициент, учитывающий форму частиц (для частиц неровной формы от 0,3 до 0,4; для шара 0,13).

При этом величину подъемной силы для множества частиц можно найти из соотношения (14):

$$F_n = \rho \cdot k \cdot v^2 \cdot \omega \cdot n \cdot c \quad (14),$$

где  $n$  — число частиц на единицу поверхности дна;  $\omega$  — площадь проекции частицы на поверхность дна;  $c$  — отношение площади, на которую действует подъемная сила, к суммарной площади проекции частиц на дно.

Таким образом, можно считать, что  $n = \frac{\Omega_d}{\omega} \cdot m$ , где:  $\Omega_d$  — площадь дна (нижняя часть ствола скважины с распределенными на ней частицами шлама),  $m$  — коэффициент, определяющий плотность размещения частиц шлама на дне. Подставляя в выражение (14) зависимость для  $n$ , получим, полагая, что  $\Omega_d = 1$  (15):

$$F_n = \rho \cdot k \cdot v^2 \cdot m \cdot c \quad (15),$$

где  $\rho$  — плотность промывочной жидкости;  $v$  — скорость потока промывочной жидкости вблизи частицы шлама;  $k$  — коэффициент, учитывающий форму частиц (для частиц неровной формы от 0,3 до 0,4; для шара 0,13);  $m$  — коэффициент, определяющий плотность размещения частиц шлама на дне;  $c$  — отношение площади, на которую действует подъемная сила, к суммарной площади проекции частиц на дно.

Ясно, что условия сдвига поверхностного слоя частиц шлама будут определяться из выражения (16):

$$(G - F_n) \cdot f \geq F_n \quad (16),$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $G$  — вес шлама на единице поверхности при плотности его размещения  $m$ , то есть  $G = \gamma m d$ ,  $\gamma$  — удельный вес частицы шлама в промывочной жидкости.

Тогда уравнение (16) можно записать в следующем виде (17):

$$\frac{\gamma_{жс}}{g} \cdot v^2 \left( \frac{\lambda}{m \varphi^2} + k \cdot f \cdot c \right) = \gamma \cdot d \cdot f \quad (17),$$

где  $\varphi$  — есть отношение скорости у дна к средней скорости потока промывочной жидкости;  $\gamma_{жс}$  — удельный вес промывочной жидкости;  $\lambda$  — коэффициент сопротивления, зависящий от относительной шероховатости поверхности стенки скважины и вязкости (ввиду довольно больших скоростей потока, а, следовательно, и чисел Рейнольдса, влияние вязкости можно не учитывать).

Следовательно, скорость потока для удаления частиц шлама в горизонтальном стволе возможно определить из соотношения (18):

$$v = \sqrt{g \cdot d \frac{\gamma \cdot f}{\gamma_{ж} \left( \frac{\lambda}{m \varphi^2} + k \cdot f \cdot c \right)}} \quad (18).$$

Видно, что необходимая скорость потока промывочной жидкости для удаления частиц шлама с горизонтальной поверхности ствола скважины зависит от большего числа факторов, нежели чем скорость потока, необходимая для транспортировки шлама по вертикальному участку ствола скважины.

Так, при расчете скорости потока для транспортировки шлама на горизонтальном участке ствола скважины необходимо принимать во внимание условия накопления шлама на этом участке, учитывать вероятность возникновения процесса дюнообразования. Необходимая скорость потока в первую очередь будет зависеть от плотности размещения частиц на нижней части стенки скважины (дне). Также в формулу входит отношение скорости потока у дна к средней скорости потока, которое в общем случае зависит от шероховатости поверхности и стесненных условий течения потока. На выбор скорости потока будут оказывать влияние и удельный вес частиц шлама (породы) и коэффициент трения.

Из всего вышесказанного следует сделать вывод, что задача выбора скорости движения потока промывочной жидкости для транспортирования шлама по стволу скважины в горизонтальной его части и в вертикальной решается по-разному. Помимо влияния разных факторов на расчет скорости потока, следует выделить принципиальное различие. Этим принципиальным различием является тот факт, что при расчете необходимой скорости для транспортирования шлама по вертикальному стволу скважины влиянием частиц шлама, рассеянных (взвешенных) в потоке, друг на друга, как

правило, пренебрегают ввиду их малой концентрации. При расчете же необходимой скорости потока для удаления шлама на горизонтальном участке скважины следует обязательно учитывать плотность распределения частиц шлама, лежащих на нижней стенке скважины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Булатов, А.И. Справочник по креплению нефтяных и газовых скважин / А.И. Булатов. — М.: Недра, 1981. — 240 с.
2. Гукасов, Н.А. Справочное пособие по гидравлике и гидродинамике в бурении / Н.А. Гукасов. — М.: Недра, 1982. — 302 с.
3. Есьман, Б.И. Практическая гидравлика в бурении / Б.И. Есьман, Р.И. Шищенко. — М.: Недра, 1966. — 286 с.
4. Кнороз, В.С. Движение гидросмесей в напорных трубопроводах и метод их расчета / В.С. Кнороз. — Известия ВНИИГ. — Т. XXX. — 1941.
5. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика 3-е изд., испр. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с. (т. VI).
6. Маковой, Н. Гидравлика бурения / Н. Маковой. — М.: Недра, 1986. — 536 с.
7. Панфилов, Г.А. Разработка научно-методических основ применения колебательных процессов для интенсификации бурения горизонтальных скважин / Г.А. Панфилов: Дисс... канд. техн. наук: 05.15.10. — Тюмень, 2000. — 297 с.
8. Пеньков, А.И. Справочник по промывке скважин / А.И. Пеньков, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. — М.: Недра, 1984. — 317 с.
9. Стронский, Н.М. Типовые задачи и расчеты в бурении / Н.М. Стронский, Я.М. Орсуляк. — М.: Недра, 1974. — 505 с.
10. Султанов, Б.З. Бурение наклонных и горизонтальных скважин / Б.З. Султанов, А.Г. Калинин, Б.А. Никитин, К.М. Солодкий. — М.: Недра, 1997. — 650 с.
11. Филатов, Б.С. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом / Б.С. Филатов, Н.С. Макурин, М.Г. Абрамсон, А.И. Кирсанов. — М.: Недра, 1964. — 248 с.
12. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974. — 713 с.
13. Siferman, T.R. Drill-cutting transports in full-scale vertical annually J. Petr. Tech. November 1974: 1295-302 / T.R. Siferman, G.M. Myers, E.L. Haden.

© Тунгусов С.А., 2021

Тунгусов Сергей Александрович // SS SS tungusov\_sa@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 553.042

Кушнарев П.И. (ФГБУ «ВИМС»)

### АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Работа посвящена определению фактических погрешностей оценки запасов на разведанных золоторудных месторождениях. Для их расчета предложен алгоритм, базирующийся на анализе характеристик изменчивости содержаний компонента в разведочных пробах. Оценка погрешности проведена для запасов кат. С<sub>1</sub>. Результаты исследований показывают, что относительная стандартная ошибка определения средних содержаний

в блоках, сопоставимых с годовой производительностью предприятия, для крупных и средних месторождений составляет 10–15 %; для мелких объектов она может увеличиваться до 30 %. **Ключевые слова:** изменчивость содержаний, категории запасов, погрешность оценки, годовая производительность.

Kushnarev P.I. (VIMS)

### ANALYSIS OF THE ERROR IN ESTIMATING THE RESERVES OF GOLD DEPOSITS

The work is devoted to determining the actual errors in the estimation of reserves in the explored gold deposits. For their calculation, an algorithm based on the analysis of the characteristics of the variability of the grade of the component in the exploration samples is proposed. The margin of error was