

ГОРНОЕ ДЕЛО

МРНТИ 52.13.23

Б.Т. Ратов¹, М.Т. Билецкий¹, Д.Н. Деликешева¹

¹Казахский научно-исследовательский технический университет им. К. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан

АНАЛИЗ ЧАСТИЦ ШЛАМА, ВЫНОСИМЫХ БУРОВЫМ РАСТВОРОМ

Аннотация. Неполный вынос из скважины бурового шлама ведёт к осложнениям процесса бурения и нередко к трудно ликвидируемым авариям. Производительность бурового насоса рассчитывается исходя из анализа частиц шлама, которые могут отличаться размером и плотностью слагающего их материала. Публикации на тему анализа распределений частиц шлама основываются на создании и использовании специальных устройств, отличающихся сложностью конструкции и принципов функционирования, что затрудняет их широкое применение. Ниже рассматриваемый метод базируется на замерах плотности восходящего потока промывочной жидкости. Бурение останавливают и скважину промывают до выравнивания плотностей нисходящего и восходящего потоков. После этого бурение возобновляют и через установленные промежутки времени замеряют плотность, которая каждый раз возрастает, в связи с присоединением к потоку все более трудно выносимых частиц. Дан пример использования предложенного метода в условиях бурения скважин на урановое сырьё.

Ключевые слова: бурение скважин, удаление шлама, режим промывки, анализ частиц шлама, замеры плотности потока.

• • •

Түйіндеме. Бұрғылау шламын ұңғымадан толық алып тастамау бұрғылау процесінде көбінесе қиындықтарға және оңай жойыла қоймайтын апаттарға алып келеді. Бұрғылау сорғысының өнімділігі оларды құрайтын материалдың мөлшері мен тығыздығымен ерекшеленетін шлам бөлшектерін талдау негізінде есептеледі. Шлам бөлшектерінің таралуын талдау тақырыбындағы жарияланымдар олардың кең қолданылуын қиындататын құрылымы мен жұмыс істеу принциптерінің күрделілігімен ерекшеленетін арнайы құрылғыларды жасауға және қолдануға негізделген. Төменде қарастырылған әдіс шаю сұйықтығының жоғары бағыттағы ағынының тығыздығын өлшеуге негізделген. Бұрғылау тоқтатылып, ұңғыманы тазарту және жаңарту тығыздығы теңестірілгенге дейін жуылады. Осыдан кейін бұрғылау қайта жалғасады және белгіленген аралықтарда бұл ағынға тасымалдау қиынырақ болып келетін бөлшектердің қосылуына байланысты әр уақытта артып отыратын тығыздық

өлшенеді. Уранның шикізатына арналған ұңғымаларды бұрғылау жағдайында ұсынылған әдісті қолдану мысалы келтірілген.

Түйінді сөздер: ұңғыманы бұрғылау, шламды жою, шаю режимі, шлам бөлшектерін талдау, ағын тығыздығын өлшеу.

Abstract. An imperfect removal of drilled cuttings out of the drill bore brings about down-the-hole problems and often – heavy break downs, hard to cope with. The output of the drilling pump is calculated, based on analysis of drilled cuttings, which differ with their size and density of their material. The paper on the analysis of drilled cuttings distributions describe application of some special designs, which have complicated structures and working principles, which in turn makes their wide use at the rig sites hardly possible. The below stated method is based on measurements of the drilling fluid's ascending flow density. The drilling is suspended and the hole flushed until achieving the balance of the in and out flows densities. After that, drilling is resumed and, at set intervals, the density is measured, which increases each time due to the influx of particles which are more difficult to carry out from the flow. The article has an example of implementing the method of drilling on uranium ore.

Keywords: drilling wells, cuttings evacuation, flushing regime, cuttings analysis, ascending flow density measurements.

Введение. Важнейшим условием эффективности процесса бурения является обеспечение чистоты ствола скважины [1]. Удовлетворению этого условия препятствует неполное удаление частиц разбуренной породы – бурового шлама. Причинами этого может быть недостаточная производительность бурового насоса и особенно при прохождении слабых легко буримых пород, когда в единицу времени образуется максимальное количество шлама [2]. Широко распространенными отрицательными последствиями некачественной очистки ствола скважины от шлама, являются такие явления, как образование затрудняющих спускоподъемные операции и проведение каротажных работ шламовых пробок. При остановках подачи промывочной жидкости, вследствие отказов бурового насоса, и даже при наращивании бурильной колонны могут возникать такие тяжелые аварии как прихваты забойной компоновки осевшим шламом [3]. Чтобы избежать подобных осложнений необходимо либо увеличить подачу промывочной жидкости буровым насосом либо повысить шламовыносящую способность раствора (его плотность и вязкость), а при невозможности осуществления этих мер – искусственно сдерживать процесс углубки вплоть до его периодических остановок с проведением промывок.

Количественные показатели перечисленных мероприятий – необходимая величина подачи раствора, его требуемая плотность, продолжительность остановок бурения с целью промывки ствола при отсутствии поступления новых объемов шлама, – зависят как от общего содержания шлама в восходящем потоке промывочной жидкости, так и от распределения его частиц по размерам, форме и степени их выносимости [4,5]. Известен способ анализа частиц бурового шлама [6] в растворе, который реализуется путём использования специальной установки. Заливаемую в неё пробу раствора разбавляют до объема, когда жидкость становится прозрачной, и после этого твердые частицы фотографируют в луче света. Фотографию подвергают автоматической обработке, в ходе которой частицы вписываются в двумерные шаблоны, соответствующие заданной линейке размеров. Чтобы учесть размеры по третьей координате (фотография дает расположение частиц на плоскости), содержащую частицы жидкость подвергают вращению и снова обрабатывают описанным способом. После этого с помощью специальной программы производят подсчет шаблонов со вписанными в них частицами и на этой основе определяют содержание частиц каждого диаметра из предусмотренных в установленной линейке размеров.

Рассмотренная установка для анализа распределения частиц шлама по их размерам является сложной по устройству и соответственно, дорогостоящей. Процедура её использования предъявляет высокие требования к квалификации осуществляющего ее персонала. Всё это затрудняет использование этого способа для анализа содержащегося шлама в промывочном растворе непосредственно на буровых установках [7]. Кроме того, этот способ обеспечивает учёт только размеров частиц шлама, тогда как для оценки эффективности очистки данной конкретной скважины от шлама необходим комплексный критерий способности частиц к выносу, учитывающий как факторы, относящихся к самим частицам, так и параметры бурового раствора, и геометрические параметры скважины. В университете им. К. Сатпаева проводятся исследования методов анализа частиц бурового шлама. *Ниже описанный метод прост и пригоден для широкого применения на буровых установках. Он учитывает не только размеры частиц, но и, их способность к выносу в конкретных условиях бурения данной скважины.*

Метод заключается в следующем: бурение останавливают и скважину промывают до наступления равенства плотностей очищенного нисходящего и выносящего шлам восходящего потоков промывочной жидкости. После того как это равенство достигнуто, бурение возобновляют с теми же режимами (осевая нагрузка на долото, частота его вращения, подача буровым насосом раствора и качественные параметры последнего), и соответственно с той же скоростью углубки. Через установленные постоянные интервалы времени производят замеры плотности выходящего из устья скважины раствора. Периодические замеры плотности каждый раз демонстрируют её увеличение на некоторую величину, которая характеризует содержание вновь присоединившихся частиц данного класса выносимости. Естественно, что для каждого последующего замера выносимость соответствующих частиц шлама хуже, чем для предшествующего замера, т.к. этим частицам потребовалось больше времени для достижения устья. Замеры прекращают, когда плотность раствора достигнет того значения, которое имело место в момент остановки бурения.

Как правило, анализ частиц производится применительно к некоторому известному пласту породы, представляющему собой опасность с точки зрения зашламования скважины. Это может быть мощный пласт представленный слабой легкобуримой породой, либо пласт сложенный породой повышенной плотности. В каждом конкретном случае плотность пласта, при его прохождении и вплоть до его смены следующим пластом с иными физико-механическими свойствами остаётся постоянной, поэтому распределение частиц шлама по выносимости зависит только от их размеров. Для оценки размера частиц каждого класса используется ниже приведенный алгоритм. Согласно формуле Риттингера [8] скорость падения частицы в неподвижной жидкости:

$$U = K \sqrt{d_{\text{ч}} \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}}{\rho_{\text{жс}}}} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность материала частицы; $\rho_{\text{жс}}$ – плотность жидкости, $d_{\text{ч}}$ – эквивалентный диаметр частицы (диаметр шара объема, равного объему частицы), K – коэффициент формы частицы. Для округлых частиц он равен 4.0-4.5 м^{0.5}/с, для частиц плоской формы 2 – 4.0 м^{0.5}/с.

Отсюда размер частицы при замере номер i (частицы i -того класса выносимости):

$$d_{чi} = \frac{U_i^2 \rho_{жi}}{K^2 (\rho_ч - \rho_{жi})}, \quad (2)$$

где $\rho_{жi}$ – плотность раствора, полученная при i -том замере.

В формуле (2) скорость падения частицы можно определить как:

$$U_i = (\mathcal{G} - C_i) \cos \theta, \quad (3)$$

где \mathcal{G} – скорость восходящего потока в кольцевом пространстве скважины; C_i – скорость подъема (выноса) частицы, θ – средний зенитный угол скважины. У большинства эксплуатационных скважин, буримых на нефть, газ, воду и уран, угол θ близок к нулю, а его косинус – к единице.

Скорость восходящего потока:

$$\mathcal{G} = \frac{L_c}{T_{ж}}, \quad (4)$$

где L_c – длина скважины; $T_{ж}$ – время движения жидкости от забоя до устья скважины:

$$T_{ж} = \frac{V}{Q}, \quad (5)$$

где Q – расход жидкости (подача насоса), V – объем кольцевого пространства между скважиной и бурильными трубами;

$$V = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\pi}{4} (D_j^2 - d_j^2) L_j \right) \quad (6)$$

где D – диаметр ствола скважины; d – наружный диаметр бурильных или утяжеленных (УБТ) труб; J – номер участка ствола, отличающегося диаметрами D_j и d_j либо одним из них; L_j – длина соответствующего участка; n – количество участков кольцевого пространства с разными диаметрами.

Часто скважину можно представить как содержащую только два участка, с одинаковыми диаметрами ствола, причем d_1 есть диаметр УБТ, d_2 – диаметр бурильных труб и соответственно L_1 – длина УБТ и L_2 – длина бурильной колонны. Это допущение может быть оправдано в случае выхода последней обсадной колонны на поверхность, т.к. внутренний диаметр обсадки близок к диаметру ниже расположенного открытого ствола, особенно ввиду “разработки” последнего т.е.

расширения под влиянием вращения бурильной колонны и размыва потоком жидкости.

Согласно предложенному методу скорость выноса частиц каждого класса:

$$C_i = \frac{L_C}{T_i}, \quad (7)$$

где T_i – время подъема частицы при очередном i -том замере, т. е. частицы i – того класса выносимости. Общее число классов:

$$m = \frac{\rho_B - \rho_{нп}}{\Delta_\rho}, \quad (8)$$

где ρ_B – плотность раствора в момент остановки бурения; $\rho_{нп}$ – плотность нисходящего (очищенного) потока; Δ_ρ – установленный интервал плотностей. Для различимости плотностей соседних классов необходимо, чтобы соблюдалось условие:

$$\Delta_\rho \geq 0.25 \zeta, \quad (9)$$

где ζ – цена деления измерителя плотности

Время подъема (выноса), частицы каждого класса

$$T_i = T_{ж} + \Delta_T * i \quad (10)$$

где; Δ_T – интервал времени между замераи. Необходимо чтобы:

$$\Delta_T \geq \frac{T_0}{m} \quad (11)$$

где T_0 – время очищения раствора (т. е. время от остановки бурения с промывкой скважины до появления “чистого ” раствора с плотностью $\rho_{нп}$). Это время близко к времени проведения замеров после возобновления бурения, т.к. в обоих случаях имеет место распределение частиц по выносимости, хотя и в обратном порядке (при промывке самые крупные частицы пропадают в первую очередь, а при замерах они последними появляются). Несоблюдение этого условия приведет к невозможности охвата классификацией наиболее трудно выносимых частиц.

Приведенный алгоритм обуславливает тот факт, что скорость C_i выноса частицы шлама данного класса i тем выше, чем меньше

размер d_{ci} частицы, и соответственно ниже их скорость падения в неподвижной жидкости (формула (2)). В первую очередь поверхности достигают наиболее мелкие частицы, затем к ним присоединятся более крупные и т.д.

Процентное содержание частиц класса i определяется по формуле:

$$\Pi_{Ti} = 100\% \frac{\rho_{жi} - \rho_{жi-1}}{\rho_B - \rho_{НП}} \quad (12)$$

То есть из плотности, (числитель формулы), полученной при данном замере номер i , вычитается плотность предшествующего замера номер $i - 1$ и эта разница соотносится с общим (суммарным) увеличением плотности, связанным с бурением скважины по данной породе с данной скоростью углубки (знаменатель скважины). Формула даёт содержание частиц в зависимости от задаваемого времени T_i (формула (10)) их выноса, положенного в основу классификации.

При неизменной плотности пород возможно от классификации частиц по их способности к выносу перейти к классификации по их размерам. Накопленное содержание [9] для частицы, размер которой соответствует времени её выноса T_i , при $i = k$

$$H_{Ti} = \sum_{i=1}^k \Pi_{Ti} \quad (13)$$

Накопленное содержание, соответствующее некоторой частице размера d_p , принадлежащей к интервалу замеров плотности от номера $i - 1$ до i определяется, путём интерполяции:

$$H_{dp} = \frac{H_{Ti} - H_{Ti-1}}{d_{ci} - d_{ci-1}} (d_p - d_{ci-1}) + H_{Ti-1} \quad (14)$$

где d_{ci} определен по формуле (2)

По формуле (14) определяется накопленное содержание для частиц размером d_{pi} , соответствующим концу каждого i – того интервала установленного ряда размеров. Величина интервала этого ряда определяется по формуле:

$$\Delta_{dp} \geq \frac{d_{cj \max}}{m} \quad (15)$$

Содержание частиц в каждом интервале:

$$\Pi_{dPi} = H_{dPi} - H_{dPi-1} \cdot \quad (16)$$

Таблица 1 - Величины, определяемые предварительными расчетами

Параметр	Значение	Формула
Объем кольцевого пространства, V, м ³	18.3	(6)
Время движения жидкости от забоя к устью, T _ж , ч	1.02	(5)
Скорость восходящего потока жидкости, Q, м/с	0.272	(4)
Время промывки, T _о	3.2	Данные опыта
Число классов частиц, m	5	(8), (9)
Период замеров, Δ _т , ч	0.5	(11)

Таблица 2 - Результаты анализа частиц бурового раствора

Параметр	Формула	Класс частиц i					
		0	1	2	3	4	5
		Классификация частиц по времени выноса					
Время выноса частицы T _i , ч	(10)	1.02*	1.52	2.02	2.52	3.02	3.52
Плотность раствора. ρ _ж , кг/м ³	Результат замера	1050	1070	1100	1130	1145	1150
Скорость выноса C _т , м/с		(7)	0.272*	0.183	0.137	0.110	0.092
Скорость падения U _п , м/с	(3)	0	0.089	0.135	0.162	0.180	0.193
Наибольший размер d _ч , мм	(2)	0	0.403	0.995	1.444	1.828	2.118
Содержание частиц П _{Т_i} , %	(12)	0	20	30	30	15	5
Накопленное содержание Н _{Т_i} , %	(13)	0	20	50	80	95	100
Классификация частиц по размерам							
Размеры частиц от d _{рi-1} до d _{рi} , мм	(15)**	0	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5
Средний размер частиц, мм		0	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25
Их накопленное содержание Н _{дрii}	(14)	0	24.9	50	82.2	97.8	100
Содержание частиц П _{дрi} , %	(16)	0	24.9	25.1	32.2	15.8	2.2

* Относится к чистому раствору (без шлама) – приведено для сравнения.

** Число интервалов соответствует числу замеров плотности.

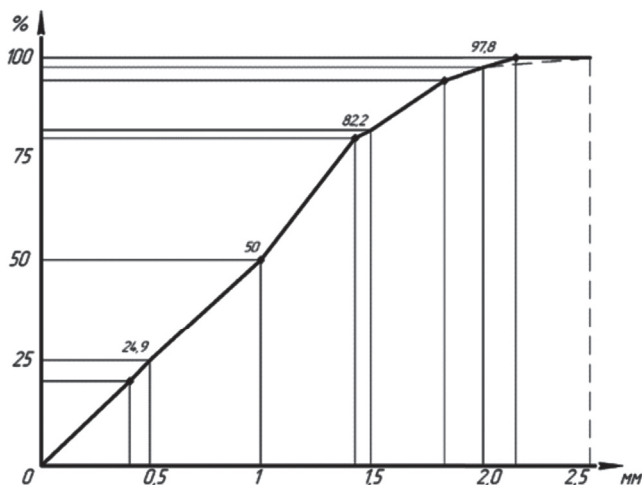


Рисунок 1 - Классификация частиц по их размерам

Классификацию частиц по их размерам можно также осуществлять графически с помощью графика накопленного содержания частиц с различной выносной способностью. (таблица 2, рисунок 1).

Осуществимость предложенного метода демонстрируется следующим примером (приведенные в примере условия являются типичными для бурения скважин на урановое сырье в южном Казахстане) [10]:

Имеется вертикальная скважина глубиной $L_c = 1000$ м; ствол скважины не обсажен и имеет один и тот же диаметр по всей длине: $D = 161$ мм; наружный диаметр бурильных труб $d = 50$ мм. Колонна утяжелённых бурильных труб имеет диаметр 108 мм и длину 15 м. Плотность нисходящего потока раствора $\rho_{\text{нп}} = 1050$ кг/м³; плотность восходящего потока в момент остановки бурения $\rho_{\text{б}} = 1150$ кг/м³ (что соответствует скорости углубки порядка 20 м/ч); плотность частиц шлама $\rho_{\text{ч}} = 2800$ кг/м³; коэффициент формы частицы $K = 3.5$ м^{0.5}/с; цена деления измерителя плотности раствора $\zeta = 10$ кг/м³ [8]. Подача насоса $Q = 300$ л/мин;

В ходе осуществления рассмотренного метода анализа частиц шлама производят следующие операции:

– Останавливают процесс бурения с фиксацией времени момента остановки. Начинается процесс промывки. При этом продолжается работа насоса с той же подачей;

– Фиксируется момент времени начала выхода “чистого” раствора. Возобновляют процесс бурения с теми же режимами, которые имели место до его остановки и, начиная с этого момента, осуществляются периодические замеры плотности выходящего из устья скважины бурового раствора;

– Измерения прекращают, когда плотности соседних замеров становятся одинаковыми (либо принимают то значение, которое имело место при остановке бурения).

В таблице 1 приведены результаты выполненных на основе исходных данных предварительных расчетов, необходимых для обработки замеров. В таблице 2 показаны результаты обработки замеров плотности бурового раствора с целью классификации частиц шлама: а) – по времени их выноса; б) – по их размерам. На рисунке 1 кружками показаны накопленные содержания (таблица 2, седьмая строка), соответствующие размерам d_{ci} (пятая строка). По ним построен график накопленных содержаний. Содержание Π_{dpi} (нижняя строка таблицы 2) частиц определяется как разность значений ординат, соответствующих верхней и нижней границам каждого данного интервала установленного ряда размеров.

Выводы. Анализ частиц бурового шлама играет важную роль в предупреждении осложнений и аварий при бурении скважин. Известные методы анализа частиц шлама связаны с использованием сложных и дорогих устройств, мало приспособленных к широкому применению непосредственно на буровых установках. Упомянутые методы, дают распределение частиц шлама по их размерам, и не связаны непосредственно с условиями бурения скважины: ее геометрией, подачей раствора и его параметрами. Предложенный метод ориентирован на способность частиц шлама к удалению из скважины, в качестве критерия которой принято время подъема частицы от забоя до устья с потоком промывки. Метод сводится к периодическим замерам плотности восходящего потока, проводимым, начиная с возобновления углубки после промывки скважины с достижением очистки раствора от шлама. Замеры плотности осуществляются широко распространенными на буровых работах пикнометрами, стоимость которых во много раз ниже, чем стоимость устройств. На основе распределения частиц шлама по их способности к выносу предложенный метод также позволяет получить их распределение по размерам. Для получения окончательных результатов значения

замеров плотности вводятся в последовательность несложных формул, расчеты по которым могут проводиться вручную или с помощью переносного компьютера. Описанный метод требует приостановки процесса углубки для осуществления промывки скважины, которая может занять несколько часов; однако в условиях зашламованной скважины такая промывка должна периодически проводиться независимо от применения рассматриваемого метода.

Список литературы

1 *Naegel, M. et al*, 1998. Cuttings Flow Meters Monitor Hole Cleaning in Extended Reach Wells. Paper SPE 50677 presented at the European Petroleum Conference, The Hague, 20–22 October. oi: 10.2118/50677-MS.

2 *Билецкий М.Т и др.* Использование компьютерной модели для предотвращения зашламования скважин при высокоскоростном бурении// Новости науки Казахстана, 2009.- № 3 [Biletskij M.T. Ispol'zovanie komp'yuternoj modeli dlya predotvrashheniya zashlamovaniya skvazhin pri vy`sokoskorostnom burenii. // Novosti nauki Kazakhstana, 2009.- N3]

3 *Biletskiy M.T., Ratov B.T., Kasenov A.K.* Problem analysis of geotechnical well drilling in complex environment. Scientific and Technical Chelenges in the Well Drilling Progress. IOP Conf. Series: Earth and Environment. Science 24 (2015) 012026. IOP Publishing

4 *Rangi Han et al.* Real time 3D Computer Vision Shape Analysis of Cuttings and Cavings. SPE 191634 . Society of Petroleum Engineers 2018

5 *Allen, T.* Particle Size Measurement, Volume 1: Powder Sampling and Particle Size Measurement, fifth edition. Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, 1999.

6 *Saasen A. et al.* Automatic Measurement of Drilling Fluid and Drill cuttings Properties. IADC/SPE 112687 USA march 2008

7 *Spelta A. et al.* Real Time Mud Monitoring System Improves Drilling Efficiencies. 13-th Offshore Meditterrenian Conference in Ravena Italy March 2017

8 *Ивачев Л.М.* Промывка и тампонирование геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1989.- с. 247 [Ivachev L.M. Promy`vka I tamponirovaniye geologorazvedochny`kh skvazhin, M: Nedra, 1989.- s.247]

9 Венецкий И.Г., Вененцкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе, М., Статистика, 1979 .- с. 447. [Venetskij I.G., Venetskaya V.I. Osnovny`ye matematiko-statisticheskiye ponyatiya i formuly` v e`konomicheskom analize, M., Statistika, 1979.- s.447]

10 Методика сооружения скважин для разведки и добычи урана методом ПСВ: Алматы АО НАК Казатомпром, ТОО ИВТ, Алматы, 2007.- с.211. [Metodika sooryzheniya skvazhin dlya razvedki i doby`chi urana metodom PSV: Almaty` AO NAK Kazatomprom, TOO IVT, Almaty` , 2007.-s.211]

Ратов Б.Т. - доктор технических наук, профессор
Билецкий М.Т. - кандидат технических наук, доцент
Деликешева Д.Н. - докторант PhD