УДК 62-133:622.79

РАЗРАБОТКА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

Г.Б.ФЕДОРОВ, О.Л.ДУДЧЕНКО, Д.С.КУРЕНКОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Проблемным является вопрос о многократном использовании бурового раствора. Для повторного использования необходимо раствор качественно очистить от твердых шламов по классу 0,04-0,07 мм. Анализ существующих технологий и оборудования показал, что схемы регенерации бурового раствора достаточно сложны в эксплуатации и дороги. В мировой практике наметилась тенденция по созданию универсального оборудования, позволяющего за один цикл обработки наиболее полно очищать буровой раствор по тонким классам.

В работе предложен инновационный виброакустический модуль для очистки буровых растворов от шламов. Креативным элементом предложения является воздействие виброакустических колебаний на буровой раствор, проходящий через сетчатый элемент. При этом около сетки возникают специфические эффекты, за счет которых повышаются производительность и эффективность процесса. Представлена конструкция виброакустического аппарата и принцип его работы. Важным элементом предложения является то, что колебание создается поршнями, соединенными между собой тягами и расположенными по разные стороны от сетки. Данная дипольная система обеспечивает возбуждение переменных давлений разной полярности от сетки и после нее.

Приведены результаты промышленных испытаний виброакустического модуля при обслуживании буровой установки БУ-75-БрЭ. Обнаружена зависимость производительности и эффективности установки от амплитуды колебаний. Определен оптимальный динамический диапазон воздействия (от 5,5 до 6,5 мм). Анализы показали, что в составе очищенного бурового раствора максимальный размер частиц твердой фазы не превышал 0,04 мм. Проведенные промышленные испытания подтвердили возможность применения виброакустического модуля для очистки промывочной жидкости и разработки на его основе безамбарной технологии бурения.

Ключевые слова: виброакустическое фильтрование; регенерация бурового раствора; дипольное возбуждение колебаний

Как цитировать эту статью: Федоров Г.Б. Разработка виброакустического модуля для тонкой очистки буровых растворов / Г.Б.Федоров, О.Л.Дудченко, Д.С.Куренков // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 647-651. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.647

Введение. В настоящее время остро стоит вопрос о многократном использовании бурового раствора при проходке скважин. Это связано с высокой стоимостью бурового раствора и сложностью его утилизации. Для повторного использования раствор необходимо очистить от твердых шламов по классу 0,04-0,07 мм. Для очистки буровых растворов от выбуренных пород используются вибрационные сита, разработанные компанией SWACO Geolograph и фирмой Derrick, центрифуги [2-4, 7] и флотационные процессы [8, 9]. Для эффективной очистки необходимо дополнительное оборудование. В отечественной буровой практике применяется трехстадийная система очистки, состоящая из вибросита, батареи гидроциклонов-пескоотделителей, батареи гидроциклонов-илоотделителей. Однако указанные схемы регенерации бурового раствора достаточно сложны и дороги в эксплуатации.

Постановка проблемы. В мировой практике наметились следующие основные направления оптимизации существующих циркуляционных систем:

- максимальное сокращение и упрощение технологической схемы очистки;
- повышение эффективности и производительности очистки на первой ступени – виброситах;
- создание универсального оборудования, позволяющего наиболее полно очищать буровой раствор по тонким классам за один цикл обработки.

Известно применение виброакустических колебаний для интенсификации и повышения эффективности различных технологических процессов (классификация твердых частиц, очистка сточных вод от взвесей и т.д.) [1, 5, 6]. На базе этих исследований были проведены научно-технические и опытно-конструкторские работы по созданию технических средств для разделения полидисперсных суспензий с использованием виброакустических технологий. Одно из направлений данных работ – разработка многофункциональных аппаратов для тонкой очистки и дегазации буровых растворов.

Рис.1. Виброакустический модуль для очистки буровых растворов

1 – устройство для отвода готового продукта; 2 – тяги; 3 – металлический корпус; 4 – камера готового продукта; 5 – сетчатая перегородка; 6 – поршень с отверстиями; 7 – устройство для подачи исходного продукта; 8 – камера приема исходного продукта; 9 – устройство для отвода шлама; 10 – поршень в виде усеченного конуса; 11 – коромысло; 12 – рама аппарата; 13 – вибровозбудитель

Результаты и обсуждение. Созданный виброакустический модуль (ВАМ) является принципиально новым видом оборудования для очистки буровых растворов. Принцип действия модуля основан на гидроакустическом воздействии низкочастотных колебаний на поток жидкости. Поток жидкости, получая колебательную энергию, становится многофункциональным рабочим механизмом, повышающим производительность и эффективность процесса. Весь процесс очистки буровых растворов, в отличие от ранее разработанных систем, осуществляется в одну стадию. Принципиальная схема виброакустического аппарата представлена на рис.1.

Виброакустический аппарат имеет две секции с общим вибровозбудителем. Каждая секция выполнена в виде металлического корпуса, верхняя часть кото-

рого приварена к раме. В торцах каждой секции расположены поршни: верхний – плоский с системой отверстий, нижний в виде усеченного конуса. Поршни соединены между собой тягами и связаны с вибровозбудителем коромыслом. Поршни, соединенные тягой, образуют дипольную колебательную систему, которая обеспечивает возбуждение давлений по обе стороны от сетчатой перегородки разной полярности.

Каждая секция разделена сетчатой перегородкой на две камеры: верхнюю – тонкого готового продукта и нижнюю – приема исходного продукта. Камера готового продукта оснащена кольцевым устройством для отвода готового продукта. В камере приема исходного продукта имеется устройство для подачи продукта. Имеется также устройство для отвода шлама, расположенное в центре конического поршня. За счет колебания конического поршня происходит уплотнение отводимого шлама.

Сетчатая перегородка – основной рабочий элемент разделения частиц по крупности. В виброакустическом аппарате используются сетки Pyramid Plus фирмы Derrick, изготовленные из сеточной перегородки типа сэндвич, представляющий собой два тонкоячеистых слоя и матрицу из грубой сетки. Три слоя сетки, соединенные вместе, графированы и приклеены к перфорированной основе. Перфорированные сетки имеют толщину фильтрования 45-50 мкм, возможно использование шпальтовых сит.

Конструкция виброакустического модуля обеспечивает смену сетчатой перегородки при ее выходе из строя без разборки самого аппарата, чем и достигается легкость замены. Выполнение устройства для отвода шлама в виде колеблющегося усеченного поршня обеспечивает надежное удаление шлама из аппарата. Отдельные элементы корпуса (верхняя и нижняя камеры, перегородка) жестко связаны между собой и со станиной аппарата. Верхний и нижний поршни соединены с корпусом при помощи эластичной мембраны. Все разъемные соединения частей ВАМ герметизированы. В аппарате предусмотрены изменение частоты и амплитуды колебаний поршней. Регулировка этих параметров обеспечивает надежную работу аппарата при различных физико-механических свойствах очищаемого бурового раствора (гранулометрического состава, плотности взвесей и т.д.).

Процесс разделения осуществляется следующим образом: после запуска вибровозбудителя и включения шнека в камеру приема исходного продукта подают буровой раствор, который заполняет все камеры. В буровом растворе возбуждают низкочастотные упругие колебания. Воздействие осуществляется с двух сторон. Буровой раствор разделяется на пески и очищенный буровой раствор. Очищенный раствор поступает в камеру готового продукта. Пески накапливаются в камере исходного продукта.

За счет колебания системы поршней происходит регенерация поверхностей, разрушение на них осадка, оттеснение твердых частиц к середине камеры и транспортировка их потоком вниз в устройство для отвода шлама, где пески подвергаются перемешиванию. Проходя через осадительные пластины, твердые частицы образуют осадок на днище камеры. Далее осадок уплотняется и удаляется шнеком. Выбранная амплитудно-частотная характеристика работы фильтра позволила изменить роль сита в процессе фильтрации. Создание противотоков оттесняет саму зону фильтрации от сетки в направлении середины потока раствора. Благодаря этому также увеличивается ресурс работы сетки фильтра и качество очистки. Сам процесс очистки представляет тонко увязанную систему, где каждая последующая операция вытекает из предыдущей и усиливает ее.

Промышленные испытания разработанного ВАМ. Проводились работы по промышленному испытанию виброакустического модуля ВАМ. Обслуживалась буровая установка БУ-75-БрЭ. Параметры промывочной жидкости в интервалах глубины бурения: интервал 260-1724 м – естественная водная суспензия; интервал 1724-1826 м – глинистый раствор плотностью 1140 кг/м³. Расход промывочной жидкости $Q = 0,036$ м³/с. Бурение велось шарошечными долотами диаметром 215,9 мм, турбинным и роторным способами.

Виброакустический модуль ВАМ был включен в циркуляционную систему буровой установки БУ-75-БрЭ взамен блока выбросит ВС-1 и гидроциклона. В процессе бурения буровой раствор подавался в виброакустический модуль, где и осуществлялась его регенерация. Очищенный буровой раствор вновь подавался в скважину. Сушеный шлам удалялся из нижней части аппарата разгрузочным шнеком. Процесс очистки проводился при перепаде давления 0,3 атм. Использовались сетчатые перегородки с классом очистки 0,071 и 0,094 мм. В процессе эксперимента измерялась производительность установки и эффективность очистки в зависимости от амплитуды колебаний и частоты. Амплитуда колебаний изменялась от 2 до 8 мм, а частота колебаний от 10 до 25 Гц. Выбор частотного диапазона обусловлен тем, что результаты предварительно проведенных лабораторных исследований по очистке бурового раствора при изменении частоты от 5 до 100 Гц показали наибольшую эффективность протекания процесса в указанном диапазоне.

В качестве критерия эффективности очистки был выбран коэффициент полноты фильтрования, который рассчитывался по формуле

$$\varphi = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100 \%,$$

где n_0 и n – массовое содержание взвесей в исходной и обработанной суспензии.

Результаты промышленных испытаний ВАМ представлены на рис.2, 3.

Из полученных результатов видно, что производительность и эффективность очистки зависят от амплитуды колебаний. Имеется динамический диапазон воздействия (от 5,5 до 6,5 мм), в котором параметры установки максимальны, что соответствует наибольшей производительности ВАМ при перепаде давления 0,3 атм и использовании сеток с тонкостью фильтрования 45-50 мкм. Зависимости этих параметров от частоты в диапазоне частотных исследований обнаружено не было. Анализы показали, что в составе очищенного бурового раствора максимальный размер частиц твердой фазы не превышал 0,04 мм. Влажность сгущенного продукта составляла 15-20 %. Наличие максимума эффективности очистки от амплитуды колебаний объясняется следующим образом. При амплитудах колебаний меньше 5,5 мм не происходит полного разрушения фильтровального слоя, в нем задерживаются час-

Рис.2. Зависимость производительности установки от амплитуды колебаний при $f = 15$ Гц
Класс очистки 0,094 (1); 0,071 (2)

Рис.3. Зависимость эффективности очистки от амплитуды колебаний при $f = 15$ Гц и $Q = 20$ л/с
Класс очистки 0,094 (1); 0,071 (2)

тицы с размерами меньше ячеек фильтра. При больших амплитудах не все мелкие частицы успевают проходить через фильтр.

Испытания показали, что производительность ВАМ с запасом (не возникало необходимости системы перелива) обеспечивала необходимый расход промывочной жидкости ($0,036 \text{ м}^3/\text{с}$) для осуществления технологических процессов, связанных с бурением скважин.

Проведенные промышленные испытания подтвердили возможность применения виброакустического модуля для очистки промывочной жидкости и разработки на его основе безамбарной технологии бурения. Качественные и количественные показатели очистки бурового раствора с применением ВАМ соответствуют показателям трехстадийной технологии очистки буровых растворов при значительном (7-10 раз) сокращении потребления электроэнергии.

Конструкция ВАМ проста, надежна в работе и не требует дорогостоящего оборудования. По своим технико-экономическим характеристикам виброакустический модуль превосходит лучшие из известных трехстадийных систем очистки, например, фирмы «СВАКО». В таблице приведены характеристики очистки «СВАКО» и ВАМ.

Сравнительные технико-экономические характеристики «СВАКО» и ВАМ

Параметр	Трехстадийная система очистки «СВАКО»	Виброакустический модуль
Пропускная способность, не менее, $\text{м}^3/\text{с}$ (л/с)	0,045 (45)	0,045
Наименьший размер частиц, удаленных из бурового раствора на 90 % и более, м (мм)	0,00005 (0,05)	0,00005 (0,05)
Потери бурового раствора, не более, % от пропускной способности	3,0	2,5
Масса, т	3,5	2,8
Занимаемая площадь, м^2	35	15
Потребление электроэнергии, кВт/ч	50	6,5
Стоимость общая, тыс. дол.	150	15
Стоимость комплектации и техналадки ежегодно, тыс. дол.	20-30	3-4

Виброакустический модуль на 2 т легче системы «СВАКО» при одинаковой производительности, занимает площадь в 2,3 меньшую, а его стоимость в 10 раз ниже. Аппарат конструктивно прост и надежен в эксплуатации. Ежегодные техналадки и комплектации обойдутся в 10 раз дешевле, чем для традиционной системы очистки. Виброакустический модуль, предназначенный для очистки неутяжеленных буровых растворов от выбуренной породы, является принципиально новым оборудованием, обладает очевидными преимуществами по сравнению с традиционными схемами и технологиями и аналогов в буровой практике не имеет.

Заключение. Можно сделать следующие выводы. Виброакустический модуль предназначен для очистки буровых растворов от твердых шламов по классу 0,04-0,07 мм и обеспечивает:

- высокую производительность и гарантированную очистку буровых растворов на ситах и фильтровальных материалах;
- разработку и внедрение безотходных технологий;
- эффективное сгущение и утилизацию шламов;
- решение задач очистки бурового раствора за один цикл;
- конструктивную простоту и надежность в эксплуатации.

Применение виброакустической технологии открывает широкие возможности не только для очистки буровых растворов, но и для решения целого ряда сложных задач, связанных с тонким разделением суспензий, и, в первую очередь, для создания высокоэффективных локальных установок для очистки оборотных и шахтных вод, фильтрации промышленных стоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агафонов Ю.Г. Инфразвуковая техника и технология – инновационное направление в интенсификации процессов горного производства / Ю.Г.Агафонов, О.Л.Дудченко, Г.Б.Федоров // Наук. вісник національного гірничого університету. 2014. № 2. С. 99-104.
2. Козлов В.А. Методика расчета влаги осадка угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Уголь. 2016. № 6. С. 12-15. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-6-12-15
3. Козлов В.А. Процесс обезвоживания мелкоугольного угля и угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Уголь. 2016. № 5. С. 91-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-5-91-93

4. Козлов В.А. Теория фильтрации в приложении к фильтрующим центрифугам // Уголь. 2016. № 7. С. 76-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2016-7-76-78
5. Agafonov J.G. Infrasonics for intensification of mining practices / J.G.Agafonov, O.L.Dudchenko, G.B.Fedorov // Scientific Reports on Resource Issues Innovations in Mineral Resource Value Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management. Freiberg, 2014. Vol. 1. P. 176-183.
6. Drebenstedt C. Research and development of waste waters vibroacoustic purification methods for mining enterprises / C.Drebenstedt, J.G.Agafonov, G.B.Fedorov // Proc. IMWA. Mining Meets Water – Conflicts and Solutions. 2016. P. 859-866
7. High-gradient magnetic separation of ultrafine particles with rod matrix / L.Chen, Z.Qian, S.Wen, S.Huang // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2013. Vol. 34 (5). P. 340-347. DOI: 10.1080/08827508.2012.695304
8. Lima N.P. Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic flotation of iron ore / N.P.Lima, G.E.S.Valadao, A.E.C.Peres // Minerals Engineering. 2013. Vol. 45. P. 80-84. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.03.001
9. MSWI boiler fly ashes: magnetic separation for material recovery / A.D.Boom, M.Degrez, P.Hubaux, C.Lucion // Waste Management. 2011. Vol. 31. P. 1505-1513

Авторы: **Г.Б.Федоров**, канд. техн. наук, доцент, gbfedorov1947@gmail.com (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), **О.Л.Дудченко**, канд. техн. наук, доцент, dionis_4444@mail.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), **Д.С.Куренков**, аспирант, kurenkov@mis.ru (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Статья поступила в редакцию 28.03.2018.

Статья принята к публикации 18.10.2018.