

УДК 544.77.032.1:62–837

## ПРИГОТОВЛЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУРОВОГО РАСТВОРА ТЕХНОЛОГИЕЙ И ОБОРУДОВАНИЕМ ВСМА

Данекер Валерий Аркадьевич<sup>1</sup>,  
vad@tpu.ru

Рикконен Сергей Владимирович<sup>2</sup>,  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки высокоэффективного и ресурсосберегающего оборудования, используемого для приготовления и коррекции бурового раствора в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Одним из путей решения данной проблемы является использование новой технологии виброструйной магнитной активации растворов и жидкостей. Указанная технология реализуется погружным электромагнитным преобразовательным устройством колебательного типа, работающим в резонансном или близких к нему режимах. Резонансный режим работы такого устройства обеспечивает высокое энергетическое воздействие на структуру бурового раствора в локальной зоне активации, что приводит к более высокой степени диспергации частиц дисперсной фазы. При этом резонансный режим работы электромагнитного преобразовательного устройства характеризуется наименьшим уровнем потребления электрической энергии.

**Цель работы:** получение и сравнение результатов исследований основных показателей качества буровых растворов, приготовленных на традиционных механических центробежных мешалках и на оборудовании виброструйной магнитной активации.

**Методы исследований.** Исследования проводились в лабораторных и натуральных условиях с использованием экспериментального лабораторного и промышленно выпускаемого оборудования. Оценка дисперсности приготовленных буровых растворов проводилась седиментационным методом. Энергосбережение оценивалось расчётным методом по длительности работы оборудования с установленной электрической мощностью.

**Результаты.** Основные показатели качества бурового раствора, приготовленного на оборудовании виброструйной магнитной активации, существенно выше, чем качество бурового раствора, приготовленного на традиционно применяемом оборудовании, что подтверждается меньшими размерами частиц дисперсной фазы. Время приготовления и коррекции бурового раствора при использовании оборудования виброструйной магнитной активации в несколько раз меньше по сравнению с традиционными механическими центробежными мешалками.

### Ключевые слова:

Буровой раствор, дисперсность, активация, резонанс, ресурсоэффективность, качество.

### Введение

Повышение ресурсоэффективности работ при бурении нефтяных и газовых скважин является актуальной задачей, особенно в условиях перехода на добычу трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья. Важным показателем успешности проведения указанных работ является обеспечение качества бурового раствора. Данное обстоятельство в равной степени относится как к процессу приготовления, так и к процессу коррекции показателей бурового раствора для своевременной реакции на возникающие изменения условий бурения.

Одним из важных показателей бурового раствора, являющегося дисперсной системой, является его устойчивость, характеризующая распределение частиц дисперсной фазы в объёме дисперсной среды, и их дисперсность. К основным способам диспергирования частиц дисперсной фазы в среде, которой в большинстве случаев приготовления буровых растворов является вода, можно отнести гидродинамическое, ультразвуковое, центробежное, вибрационное, пневматическое перемешивание [1–14]. Для усиления процесса диспергирования

используют дополнительные эффекты, такие как наложение электрического или магнитного полей, применение ПАВ и др. [15, 16].

Наиболее распространённым способом проведения завершающего этапа приготовления и коррекции буровых растворов при разведке и строительстве скважин является центробежное перемешивание, реализуемое лопастными мешалками типа ПЛМ, ПБРТ и др. [17]. Диспергирование частичек глины происходит под действием вращения лопастей мешалки с максимальной скоростью перемешивания до (3,0–3,5) м/с, наблюдаемой по периферии траектории вращения лопастей. При этом затраты электроэнергии составляют до 2,0 кВт на приготовление одного кубического метра раствора. Дисперсность бурового раствора, приготовленного данным способом, характеризуется тем, что частицы дисперсной фазы с размером более 10 мкм составляют более 50 %. Следует отметить, что приведённые показатели процесса приготовления бурового раствора не в полной мере удовлетворяют современным требованиям, как по энергоёмкости, так и по качественным показателям самого раствора. Высокая энергоёмкость и длительность

обработки для приобретения раствором необходимых показателей при корректировке с использованием указанного выше оборудования также далеки от возможно достижимых показателей.

Таким образом, исследование и поиск новых подходов к реализации процессов приготовления и корректировки параметров буровых растворов и в настоящее время актуальны.

Одним из возможных путей решения задачи повышения ресурсоэффективности процессов приготовления и коррекции бурового раствора является использование технологии и оборудования виброструйной магнитной активации (ВСМА) растворов [18–20]. В основе технологии ВСМА лежит многокомпонентное физическое воздействие на сложные жидкие системы, создаваемое погружным резонансным электромагнитным устройством (ПРЭМУ) колебательного типа. Принцип работы ПРЭМУ поясняется рис. 1. Возмущающая сила ПРЭМУ колебаний создаётся электромагнитным приводом. При подаче переменного напряжения на обмотку электромагнитного привода рабочий орган ПРЭМУ (активатор) под действием электромагнитной силы совершает в жидкой среде колебательные движения. При колебательном движении активатора за счёт разности гидравлических сопротивлений формируется затопленная струя. Определённым подбором значений массы активатора и жёсткости пружинного подвеса можно обеспечить резонансный режим работы ПРЭМУ. Работа устройства в резонансном или близких к нему режимах позволяет получить высокие значения амплитуды колебаний активатора и, соответственно, механической работы в зоне активации при минимальном потреблении электроэнергии. Зона активации растворов ПРЭМУ, размеры которой определяются размерами активатора и в которой происходит диспергация частиц дисперсной фазы, характеризуется следующими параметрами:

- сдвиговое воздействие со скоростью более  $10^4 \text{ с}^{-1}$ ;
- ускорение рабочего органа до 100 g;
- скорость затопленных струй до 20 м/с;
- индукция магнитного поля до 0,7 Тл;
- перепад давления до 3 атм.

Одновременное действие перечисленных факторов с высокими индивидуальными значениями позволяет сделать предположение о возможности реализации оборудованием ВСМА процессов приготовления и коррекции бурового раствора с более высокими качественными показателями по сравнению с механическими мешалками.

### Исследования

С целью определения перспективности применения оборудования ВСМА для приготовления бурового раствора были проведены сравнительные лабораторные исследования степени диспергации частиц дисперсной фазы при использовании традиционных, наиболее широко применяемых устройств центробежного типа и устройств ВСМА.

Лабораторная лопастная механическая мешалка М-1, используемая при проведении экспериментов, имеет следующие характеристики:

- объём обрабатываемой жидкости 1 л;
- мощность двигателя 0,2 кВт;
- скорость вращения мешалки 1000 об/мин;
- диаметр лопастей мешалки 0,06 м;
- количество лопастей 4 шт.

Основным фактором диспергирующего воздействия механических мешалок является линейная скорость на окончании лопастей. Линейная скорость на периметре лопастей лабораторной механической мешалки в соответствии с приведёнными выше данным составляет 3,93 м/с, что несколько превышает аналогичный параметр для некоторых промышленных образцов мешалок 3,4 м/с.

Технические характеристики лабораторной установки ВЛ-1, реализующей технологию ВСМА, имеют следующие значения:

- объём обрабатываемой жидкости 1 л;
- мощность электропривода 0,03 кВт;
- амплитуда колебаний активатора 0,006 м;
- частота колебаний активатора 50 Гц;
- количество активаторов 1 шт.;
- габариты активатора (длина, ширина) 0,08×0,06 м.

Степень диспергации оценивалась по распределению размеров частиц дисперсной фазы, определяемых седиментационным методом. В качестве дисперсной фазы использовалась глина Долматовского карьера. Для усиления эффекта диспергации использовались ПАВ: карбонат натрия  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и гидроксид натрия  $\text{NaOH}$ . Длительность обработки определялась по готовности бурового раствора, оцениваемой визуально. Также проводились измерения значений динамического напряжения сдвига (ДНС) для дисперсных систем, приготовленных на указанных выше установках.

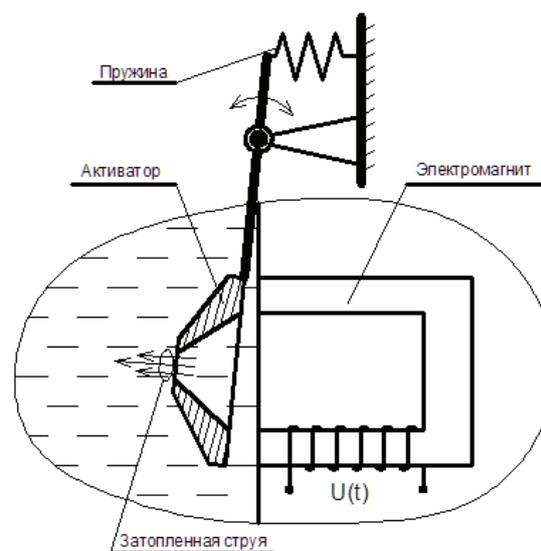


Рис. 1. Схема работы ПРЭМУ

Fig. 1. Diagram of SREMD (submersible resonance electromagnetic device) operation

### Результаты исследований

Лабораторные исследования выявили, что время работы используемого оборудования, обеспечивающего готовность бурового раствора, существенно отличается. Время работы механической мешалки М-1 для приготовления бурового раствора сравнительно одинакового качества составляет не менее 6 часов, тогда как для установки ВЛ-1 это время составляет не более 2 часов. При этом затраты электроэнергии составляют для установки М-1 1,2 кВт·ч, а для установки ВЛ-1 всего 0,06 кВт·ч.

На рис. 1 приведены графики изменения ДНС в зависимости от времени хранения для буровых растворов, приготовленных на лабораторных установках М-1 и ВЛ-1. Как видно из представленных на рис. 2 данных, значения ДНС бурового раствора, приготовленного на установке ВЛ-1, во всём диапазоне времени хранения значительно выше, чем для установки М-1. Более высокие значения ДНС бурового раствора свидетельствуют о его лучшей способности выносить шлам на поверхность при бурении скважин. Следует отметить, что достаточное значение ДНС для эффективного удержания шлама буровой раствор, приготовленный на установке ВЛ-1, приобретает уже после 30 минут после приготовления, тогда как для раствора, приготовленного на установке М-1, аналогичное явление наблюдается только по истечении 3 часов после его приготовления.

На рис. 3–5 приведены результаты оценки дисперсности растворов, полученных на лабораторных установках М-1 и ВЛ-1.

Для бурового раствора, приготовленного на установке М-1 (рис. 3) частицы глины с радиусом от 8 до 13 мкм составляют более 90 % от общего количества. Время приготовления такого раствора на установке М-1 составляет не менее 6 часов.

Использование установки ВЛ-1 для приготовления бурового раствора позволяет получать частички глины с преобладающими радиусами от 2 до 7 мкм в течение уже 2 часов работы установки (рис. 4).

Из представленных выше данных следует заключить, что качество бурового раствора, приготовленного на установке ВЛ-1 и имеющего более мелкие размеры частиц дисперсной фазы, несомненно, выше, чем для раствора, приготовленного на установке М-1.

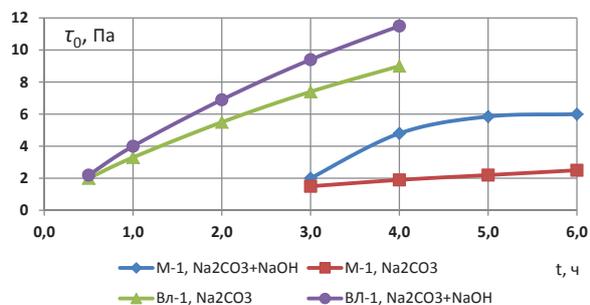


Рис. 2. Изменение значений динамического напряжения сдвига

Fig. 2. Changing the values of shift dynamic pressure

К факторам, обеспечившим полученный позитивный эффект, очевидно, следует отнести комплекс физических воздействий технологии ВСМА, действующих на дисперсную систему и обеспечивающих в совокупности синергетический эффект: высокие сдвиговые скорости, магнитное и декомпрессионное воздействия. Последнее физическое воздействие с большой степенью вероятности предполагает наличие факторов кавитационного процесса.

Совместное использование ПАВ карбоната натрия и гидроксида натрия при приготовлении бурового раствора на установке ВЛ-1 позволило сократить время приготовления ещё в два раза (рис. 5). Причём следует отметить, что зона приоритетного распределения частиц глины смещается в зону от 2 до 4 мкм, что свидетельствует о более высоком качестве бурового раствора. Значения ДНС буровых растворов, приготовленных на установке ВЛ-1, как для отдельного, так и для совместного использования ПАВ отличаются незначительно.

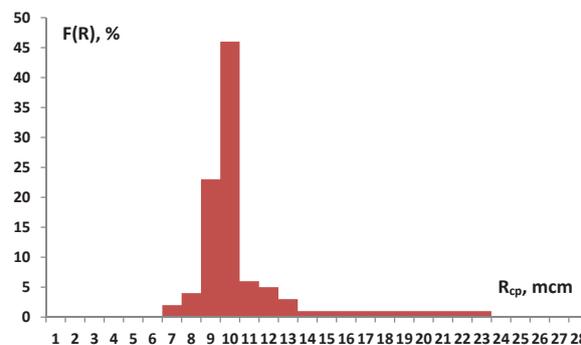


Рис. 3. Распределение частиц глины раствора на мешалке М-1 (обработка 6 ч, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Fig. 3. Mud particle distribution in solution on the stirrer M-1 (processing time is 6 hrs, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

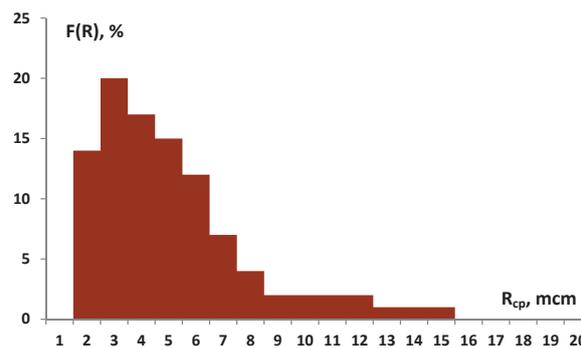


Рис. 4. Распределение частиц глины раствора на мешалке ВЛ-1 (обработка 2 ч, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Fig. 4. Mud particle distribution in solution on the stirrer VL-1 (processing time is 2 hrs, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Оценка эффективности применения оборудования ВСМА при коррекции буровых растворов проводилась в процессе утяжеления раствора с использованием промышленных образцов оборудования ВСМА вибраторов типа ВСП-1,0 и штатных мешалок на блоке-модуле БМ12 одной из скважин морского базирования. Вибратор ВСП-1,0 имеет

полный аналог – вибратор ВЭМА-0,3, также выпускаемый промышленно.

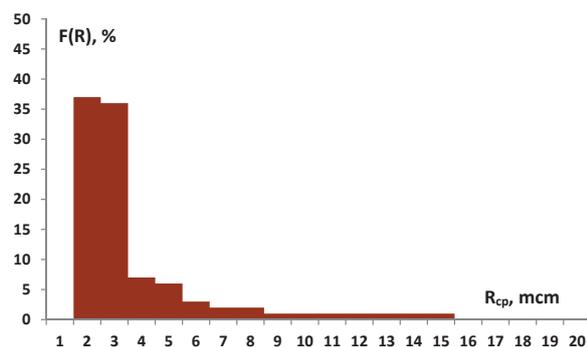


Рис. 5. Распределение частиц глины раствора на мешалке ВЛ-1 (обработка 1 ч,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$ )

Fig. 5. Mud particle distribution in solution on the stirrer VL-1 (processing time is 1 h,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$ )

Испытания проводились в процессе перевода (коррекции) бурового раствора плотностью 1,16–1,19 г/см<sup>3</sup> на буровой раствор плотностью 1,7–1,73 г/см<sup>3</sup> в двух ёмкостях объёмом 32 м<sup>3</sup> каждая. Процесс утяжеления бурового раствора осуществлялся из расчёта одна тонна барита на один кубический метр раствора. В испытываемой ёмкости к двум штатным механическим мешалкам дополнительно были установлены четыре вибратора ВСП-1,0. В контрольной ёмкости использовались две штатные механические мешалки. Установленная суммарная мощность двух механических мешалок составляет 15,0 кВт. Суммарная мощность четырёх ВСП-1,0 составляет 1,2 кВт.

Максимальная линейная скорость вращения лопастей штатной механической мешалки равна 3,14 м/с. Скорость потока бурового раствора при использовании вибратора ВСП-1,0 достигает значений до 4 м/с.

Результаты процесса утяжеления бурового раствора в двух ёмкостях приведены в таблице.

Из данных, приведённых в таблице, следует сделать два важных вывода. Во-первых, при совместном использовании штатных мешалок и вибраторов ВСП-1,0 существенно сократилось время коррекции параметров бурового раствора. Сокращение составило более 2 часов. Указанное сокращение времени коррекции привело к существенному снижению затрат электроэнергии. Затраты электроэнергии в контрольной ёмкости составили 90 кВт·ч, а для испытательной ёмкости – 68,0 кВт·ч. Во-вторых, качество бурового раствора после его коррекции в испытательной ёмкости значительно выше. Об этом свидетельствует значение условной вязкости бурового раствора, которое для испытательной ёмкости в 1,8 раза меньше, чем для контрольной ёмкости. Также отмечается некоторое

улучшение и других параметров бурового раствора в испытательной ёмкости.

Таблица. Утяжеление бурового раствора

Table. Weighting drilling mud

Параметр бурового раствора Option of drilling mud	До начала испытаний Before testing	После испытаний в контрольной ёмкости After tests in the control tank	После испытаний в испытательной ёмкости After tests in a test tank
Время коррекции, ч Correction time, h	–	6,0	4,2
Плотность, г/см <sup>3</sup> Density, g/cm <sup>3</sup>	1,19	1,73	1,72
Условная вязкость, с Conditional viscosity, s	50	61	34
Водоотдача, см <sup>3</sup> Water loss, cm <sup>3</sup>	4,5	4,5	4,0
Корка, мм Cork, mm	1,0	1,0	1,0
СНС, 1/10, Па Pressure shift static (PSS), Pa	20/50	35/71	20/40
pH	10,5	9,5	9,0

#### Выводы

Таким образом, технология и оборудование ВСМА демонстрируют неоспоримые преимущества по сравнению с существующим оборудованием приготовления и коррекции бурового раствора. Это проявилось как в лабораторных исследованиях, так и при работе оборудования ВСМА в промышленных условиях бурения скважин. Основными показателями преимущества технологии и оборудования ВСМА в процессе приготовления и коррекции бурового раствора являются:

1. Высокая диспергация частиц дисперсной фазы. Радиус преобладающего количества частиц дисперсной фазы при использовании оборудования ВСМА находится в диапазоне от 2,0 до 7,0 мкм.
2. Сокращение времени приготовления бурового раствора. Время приготовления бурового раствора при использовании оборудования ВСМА сокращается в три раза по сравнению с механическими мешалками.
3. Энергоёмкость оборудования ВСМА в процессе приготовления бурового раствора высокого качества существенно ниже, чем при использовании традиционных механических мешалок.
4. Совместное использование оборудования ВСМА и штатных механических мешалок обеспечивает более высокое качество бурового раствора при его коррекции, сопровождаемой существенным сокращением затрат электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайдаров М.М.-Р., Кравцов С.А. Дезинтеграторная технология приготовления буровых растворов и технологических жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ВНИИОЭНГ, 2007. – № 10. – С. 29–33.
2. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article / S.C. Magalhães, C.M. Scheid, L.A. Calçada, L.M.M. Lutterbach, R.S. Rezende, A.T.A. Waldmann // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – March 2016. – V. 30. – P. 164–175.
3. Косоруков П.А. Повышение дисперсности ильницкого бейделита путем химического модифицирования // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2008. – Т. 6. – № 2. – С. 433–441.
4. Маслов В.В., Коновалов Е.А., Плаксин Р.В. Исследование кавитационной технологии приготовления буровых технологических жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 6. – С. 38–40.
5. Surface chemistry and rheological properties of API bentonite drilling fluid: pH effect, yield stress, zeta potential and ageing behavior. Original Research Article / Weian Huang, Yee-wong Leong, Ting Chen, Pek-Ing Au, Xianhua Liu, Zhengsong Qiu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – October 2016. – V. 146. – P. 561–569.
6. Червяков В.М., Юдаев В.Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
7. The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability. Original Research Article / Shu He, Lixi Liang, Yinjin Zeng, Yi Ding, Yongxue Lin, Xiangjun Liu // Petroleum. – March 2016. – V. 2. – Iss. 1. – P. 61–66.
8. Effect of drilling fluid hydraulics on drill stem vibrations. Original Research Article / Mohammed F. Al Dushaishi, Runar Nygaard, Daniel S. Stutts // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – September 2016. – V. 35. – P. A. – P. 1059–1069.
9. Fattah K.A., Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. Original Research Article // Journal of African Earth Sciences. – May 2016. – V. 17. – P. 345–357.
10. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling. Original Research Article / Ning Liu, Huiwen Xu, Yang Yang, Lili Han, Lili Wang, Pavel Talalay // Cold Regions Science and Technology. – September 2016. – V. 129. – P. 45–50.
11. Salaheldin Elkatatny, zeshan Tang, Mohamed Mahmoud. Real time prediction of drilling fluid rheological properties using Artificial Neural Networks visible mathematical model (white box). Original Research Article // Journal of Petroleum Science and Engineering. – October 2016. – V. 146. – P. 1202–1210.
12. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С. Ультратруйные технологии жидкостей и суспензий. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 250 с.
13. Khamehchi E., Tabibzadeh Sh., Alizadeh A. Rheological properties of Aphron based drilling fluids. Original Research Article // Petroleum Exploration and Development. – December 2016. – V. 43. – Iss. 6. – P. 1076–1081.
14. Константинов Г.Г., Розинкин И.С. Малая гидроэнергетика // Мат. Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. – Иркутск: ИРНТУ, 2016. – С. 360–365.
15. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг, В. Линдман. – М.: Бином, 2007. – С. 178–185.
16. Механизм действия ПАВ как деэмульгаторов нефтяных эмульсий / С.И. Борисов, М.В. Катеев, Е.С. Калинин, О.С. Калинина, Н.П. Мелошенко, В.В. Сорокин // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 4. – С. 74–77.
17. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. – Оренбург: Летопись, 2005. – 663 с.
18. Изменение реологических свойств высокопарафинистых нефтей под воздействием виброструйной магнитной активации / Ю.В. Лоскутова, И.В. Прозорова, Н.В. Юдина, В.А. Данекер, С.В. Рикконен // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77. – № 5. – С. 146–150.
19. Способ вибрационной струйной магнитной декомпрессионной акустической активации растворов: пат. РФ № 2203862; заявл. 20.09.1999; опубл. 10.05.2003.
20. Расчёт гидравлических сопротивлений затопленного вибрирующего конфузора электромагнитного вибратора / А.В. Азин, Е.П. Богданов, С.В. Пономарёв, С.В. Рикконен // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 67–75.

Поступила 29.05.2017 г.

## Информация об авторах

**Данекер В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рикконен С.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 544.77.032.1:62–837

## PREPARATION AND CORRECTION OF DRILLING MUD BY TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF VIBRO-JET-MAGNETIC ACTIVATION

Valery A. Daneker<sup>1</sup>,  
vad@tpu.ru

Sergey V. Rikkonen<sup>2</sup>,  
rikk2@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research is caused by the need to develop high-performance and resource-saving equipment, used to prepare and to correct drilling mud for well-drilling. One of techniques to solve the problem is using new technology of vibro-jet-magnetic activation of muds. The technology is realized by submersible electromagnetic vibrational device, operating in resonance mode. Resonance operation mode of such device ensures high energy impact on drilling mud structure in local activation area, which results in higher dispersion degree of dispersed particles. At the same time the resonance operation mode of the device is characterized by the lowest energy consumption level.

**The aim** of the research is to get and to compare the quality factors of drilling muds prepared on traditional mechanical centrifugal stirrers and on equipment of vibro-jet-magnetic activation.

**Research methods.** The studies were carried out in laboratory and in the field by means of pilot laboratory and industrial equipment. Dispersion of the prepared drilling muds was estimated by sedimentation method. Energy saving was evaluated by calculation according to operation time of the equipment with the set electric capacity.

**The results.** Quality of drilling mud prepared using equipment of vibro-jet-magnetic activation is considerably higher than the quality of the drilling mud prepared using traditional equipment, which was confirmed by smaller sizes of dispersed particles. Preparation and correction time of drilling mud by means of equipment of vibro-jet-magnetic activation are 3–6 times smaller as compared to traditional mechanical centrifugal stirrers.

### Key words:

Drilling mud, dispersion, vibro-jet-magnetic activation, resonance, resource efficiency, quality.

### REFERENCES

- Gaydarov M.M.-R., Kravtsov S.A. Dezintegrirrovannaya tekhnologiya prigotovleniya burovnykh rastvorov i tekhnologicheskikh zhidkostey [Disintegrated technique for preparing drilling and process fluids]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas wells on land and sea]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2007. No. 10, pp. 29–33.
- Magalhães S.C., Scheid C.M., Calçada L.A., Lutterbach L.M.M., Rezende R.S., Waldmann A.T.A. Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. Review Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, March 2016, vol. 30, pp. 164–175.
- Kosorukov P.A. Povyshenie dispersnosti ilnitskogo beydellita putem khimicheskogo modifitsirovaniya [Increase of dispersive capacity of ilnitsk beydellite by chemical modification]. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 433–441.
- Maslov V.V., Kononov E.A., Plaksin P.V. Issledovanie kavitatsionnoy tekhnologii prigotovleniya burovnykh tekhnologicheskikh zhidkostey [Studying the cavitation technique of preparing drilling fluids]. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2007, no. 6, pp. 38–40.
- Weian Huang, Yee-wong Leong, Ting Chen, Pek-Ing Au, Xianhua Liu, Zhengsong Qiu. Surface chemistry and rheological properties of API bentonite drilling fluid: pH effect, yield stress, zeta potential and ageing behavior. Original. Research Article. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, October 2016, vol. 146, pp. 561–569.
- Chervyakov V.M., Yudaev V.F. *Gidrodinamicheskie i kavitatsionnye yavleniya v rotornykh apparatakh* [Hydrodynamic and cavitation phenomena in rotor devices]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 128 p.
- Shu He, Lixi Liang, Yinjin Zeng, Yi Ding, Yongxue Lin, Xiangjun Liu. The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability. Original Research Article. *Petroleum*, March 2016, vol. 2, Iss. 1, pp. 61–66.
- Mohammed F. Al Dushaishi, Runar Nygaard, Daniel S. Stutts. Effect of drilling fluid hydraulics on drill stem vibrations. Original Research Article. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, September 2016, vol. 35, P. A, pp. 1059–1069.
- Fattah K.A., Lashin A. Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. Original Research Article. *Journal of African Earth Sciences*, May 2016, vol. 17, pp. 345–357.
- Ning Liu, Huiwen Xu, Yang Yang, Lili Han, Lili Wang, Pavel Talalay. Physicochemical properties of potential low-temperature drilling fluids for deep ice core drilling. Original Research Article. *Cold Regions Science and Technology*, September 2016, vol. 129, pp. 45–50.
- Salaheldin Elkatatny, zeshan Tang, Mohamed Mahmoud. Real time prediction of drilling fluid rheological properties using Artificial Neural Networks visible mathematical model (white box). Original Research Article. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, October 2016, vol. 146, pp. 1202–1210.
- Barzov A.A., Galinovsky A.L., Puzakov V.S. *Ultrastruynye tekhnologii zhidkostey i suspenziy* [Ultra-jet techniques of liquids and suspensions]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2009. 250 p.
- Khamehchi E., Tabibzadeh Sh., Alizadeh A. Rheological properties of Aphron based drilling fluids. Original Research Article. *Petroleum Exploration and Development*, December 2016, vol. 43, Iss. 6, pp. 1076–1081.

14. Konstantinov G.G., Rozinkin I.S. Malaya gidroenergetika [Small hydropower]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proc. of All-Russian scientific conference]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. Vol. 2, pp. 360–365.
15. Kholmberg K., Yensson B., Kronberg B., Lindman V. *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva i polimery v vodnykh rastvorakh* [Surface-active reagents and polymers in water solutions]. Moscow, Binom Publ., pp. 178–185.
16. Borisov S.I., Kateev M.V., Kalinin E.S., Kalinina O.S., Meloshenko N.P., Sorokin V.V. Mekhanizm deystviya PAV kak deemulgatorov neftyanykh emulsiiy [Mechanism of SAS as demulsifiers of oil emulsions]. *Neftyanoe khozyastvo*, 2004, no. 4, pp. 74–77.
17. Ryazanov Ya.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia in drilling liquids]. Orenburg, Letopis Publ., 2005. 663 p.
18. Loskutova Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V., Daneker V.A., Rikkonen S.V. Izmenenie reologicheskikh svoystv vysokoparafinistykh neftey pod vozdeystviem vibrostruynoy magnitnoy aktivatsii [Change in rheological properties of high-paraffinic oils under vibro-jet magnetic activation]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2004, vol. 77, no. 5, pp. 146–150.
19. Guzeev S.P., Daneker V.A., Rikkonen S.V., Teplov A.I., Khorikov A.K. *Sposob vibratsionnoi struynoy magnitnoy dekompressionnoy akusticheskoy aktivatsii rastvorov* [Method of vibration jet magnetic decompression acoustic activation of solutions]. Patent RF no. 2203862, 2003.
20. Azin A.V., Bogdanov E.P., Ponomarev S.V., Rikkonen S.V. Calculation of hydraulic resistances of a submerged vibrating confuser of an electromagnetic vibrator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 2, pp. 67–75. In Rus.

Received: 29 May 2017.

#### Information about the authors

**Valery A. Daneker**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey V. Rikkonen**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.