

Егоров И.О.
Долгих В.С.
Лукьянов И.А.
Червяков Е.А.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БУРОВОГО РАСТВОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СТУПЕНЕЙ ОЧИСТКИ

Аннотация. В условиях роста глубин бурения и усложнения геолого-технических условий ключевое значение приобретает управление свойствами бурового раствора, напрямую определяющими устойчивость ствола, эффективность разрушения пород и экономику строительства скважины. В этой связи целью настоящей работы является научное обоснование рациональных методов регулирования параметров бурового раствора за счёт внедрения многоступенчатых схем механической и физико-химической очистки, позволяющих снизить концентрацию твёрдой фазы, обеспечить стабильность реологических характеристик и повысить технико-экономические показатели бурения.

Для достижения поставленной цели в работе предусматривается решение следующих задач:

- выявление и анализ механизмов накопления твёрдой фазы в буровом растворе и оценка её влияния на плотность, абразивность, структурно-механические и реологические свойства системы;
- рассмотрение и систематизация существующих технологий очистки буровых растворов, включая естественные, механические, гидравлические, физико-химические и комбинированные методы;

– изучение конструктивных особенностей и принципов функционирования оборудования, входящего в состав многоступенчатых систем очистки, таких как вибросита, гидроциклоны, центрифуги, а также блоки коагуляции и флокуляции;

– сравнительная оценка эффективности четырёхступенчатой системы очистки бурового раствора и обоснование её преимуществ по отношению к одно-, двух- и трёхступенчатым схемам;

– исследование влияния применения коагуляционно-флокуляционных блоков на глубину очистки бурового раствора и анализ возможности его повторного использования в замкнутых циркуляционных системах.

В качестве объекта исследования рассматривается циркуляционная система буровой установки, включающая совокупность технических средств, предназначенных для отделения выбуренной породы и регулирования свойств бурового раствора в процессе бурения.

Предметом исследования являются процессы управления параметрами бурового раствора, реализуемые посредством многоступенчатой механической и физико-химической очистки с использованием вибросит, песко- и илоотделителей, центрифуг, а также блоков коагуляции и флокуляции.

Ключевые слова. Бурение, скважина, буровой раствор, система очистки.

Egorov I.O.

Dolgikh V.S.

Lukyanov I.A.

Chervyakov E.A.

REGULATION OF DRILLING MUD PARAMETERS USING SEVERAL STAGES OF PURIFICATION

Annotation. In conditions of increasing drilling depths and increasing complexity of geological and technical conditions, the management of drilling fluid

properties is of key importance, which directly determine the stability of the trunk, the efficiency of rock destruction and the economics of well construction. In this regard, the purpose of this work is to scientifically substantiate rational methods for regulating the parameters of drilling mud through the introduction of multi-stage schemes of mechanical and physico-chemical purification, which reduce the concentration of the solid phase, ensure the stability of rheological characteristics and improve the technical and economic performance of drilling.

To achieve this goal, the work provides for the solution of the following tasks:

- identification and analysis of the mechanisms of accumulation of solid phase in drilling mud and assessment of its effect on density, abrasiveness, structural and mechanical*

and rheological properties of the system;

- review and systematization of existing technologies for cleaning drilling fluids, including natural, mechanical, hydraulic, physico-chemical and combined methods;*

- study of the design features and operating principles of equipment included in multi-stage cleaning systems, such as vibrating screens, hydrocyclones, centrifuges, as well as coagulation and flocculation units;*

- comparative evaluation of the effectiveness of a four-stage drilling mud purification system and justification of its advantages in relation to one-, two- and three-stage schemes;*

- investigation of the effect of the use of coagulation-flocculation units on the depth of drilling mud purification and analysis of the possibility of its reuse in closed circulation systems.*

The circulation system of a drilling rig is considered as an object of research, including a set of technical means designed to separate the drilled rock and regulate the properties of the drilling fluid during drilling.

The subject of the study is the processes of controlling the parameters of drilling mud, implemented through multi-stage mechanical and physico-chemical purification

using vibrating screens, sand and silt separators, centrifuges, as well as coagulation and flocculation units.

Keywords. *Drilling, borehole, drilling mud, cleaning system.*

Практика показывает, что надежная проводка скважин, особенно при реализации наклонно-направленных и горизонтальных профилей в осложнённых геолого-технических условиях, определяется совокупным эффектом характеристик бурового раствора и степенью совершенства системы его очистки. Буровой раствор представляет собой сложную полидисперсную коагуляционно-тиксотропную среду, внутренняя структура которой формирует его реологическое поведение и эксплуатационные параметры. Раствор, возвращающийся на поверхность после циркуляции в скважине, потенциально пригоден для повторного использования, однако это возможно лишь при условии эффективного удаления из него продуктов разрушения горных пород. Присутствие шлама в промывочной жидкости приводит к ухудшению её технологических характеристик, что влечёт за собой рост гидравлических сопротивлений, износ оборудования и снижение общей эффективности бурения.

Для удаления ультратонкодисперсной твёрдой фазы, размеры которой лежат за пределами эффективной работы традиционных механических устройств, на текущем уровне развития технологий не существует автономных чисто механических решений. По этой причине в практике бурения сформировался подход, основанный на целенаправленном физико-химическом воздействии на промывочную систему, реализуемый посредством блоков химического усиления центрифуг, широко известных как блоки коагуляции и флокуляции.

Функциональное назначение данных модулей заключается в предварительной химической модификации бурового раствора, направленной на дестабилизацию коллоидной системы и искусственное укрупнение тонкодисперсных частиц. За счёт этого создаются условия для их эффективного последующего отделения в центрифугах с формированием осветлённой жидкой

фазы. В компоновке циркуляционной системы такие блоки размещаются перед узлом регулирования содержания твёрдой фазы в строгом соответствии с проектными решениями по строительству скважины. На современном этапе именно четырёхступенчатая схема очистки, дополненная узлом коагуляционно-флокуляционного воздействия, рассматривается как наиболее результативный инструмент обеспечения глубокой очистки бурового раствора и поддержания стабильности его технологических параметров при интенсивных режимах бурения.

Для того чтобы установить эффективность применения флокулянтов в составе промывочной жидкости, на этапе исследований был проведён сравнительный анализ растворов, приготовленных с различными дозировками этих реагентов.

В соответствии с требованиями Временного регламента на приготовление и последующую обработку буровых растворов при сооружении эксплуатационных скважин в условиях Восточной Сибири был приготовлен базовый раствор, составленный по следующей рецептуре:

- кальцинированная сода Na_2CO_3 – 1,5 кг/м³;
- бентонитовый глинопорошок – 50 кг/м³.

Именно данный вариант бурового раствора применяется при бурении ствола под направление и кондуктор [8–10].

Порядок введения реагентов в бентонитовую суспензию имел следующий вид:

- вначале была произведена подготовка всех компонентов, включённых в состав раствора;
- в мерный стакан объёмом 800 см³ наливалась дистиллированная вода, после чего сосуд помещался под лабораторную мешалку;
- перемешивание начиналось при скорости 600 об/мин;
- все реагенты постепенно вводились в воду при работающей мешалке, поддерживая постоянный режим перемешивания;

- первыми вносились порции кальцинированной соды Na_2CO_3 , необходимой для связывания ионов кальция;
- затем, при интенсивном перемешивании, добавлялся бентонитовый порошок;
- процесс перемешивания продолжался до момента образования однородной суспензии;
- полученная смесь делилась на четыре идентичные части;
- три из этих образцов (№ 2, 3 и 4) обрабатывались исследуемым реагентом в концентрациях, приведённых в таблице 4.3, при постоянном перемешивании на лабораторной мешалке;
- далее образцы выдерживались в течение 2 ч при низких оборотах;
- после окончания указанного времени определялись параметры всех приготовленных образцов (№ 1–4), а результаты фиксировались в таблице 4.3. Для повышения достоверности измерения выполнялись дважды, так как сроки проведения эксперимента были ограничены. В таблицу заносятся усреднённые значения.

На основе полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости свойств промывочной жидкости от концентрации добавленных реагентов в бентонитовую суспензию (рисунки 1-4). Влияние реагентов-флокулянтов на свойства бурового раствора представлены в таблице 1.

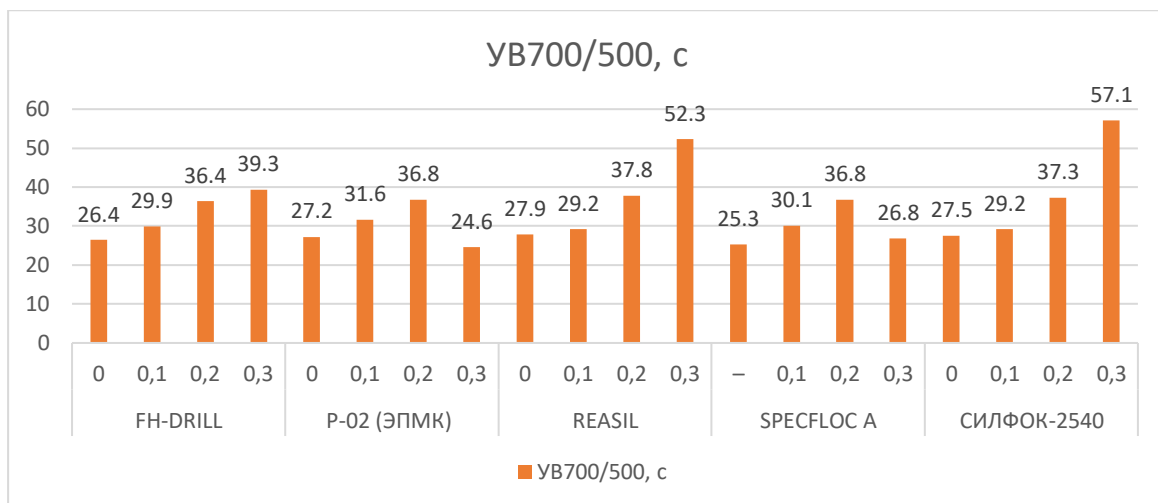
Таблица 1 – Влияние реагентов-флокулянтов на свойства бурового раствора

Номер раствора	Состав раствора	Показатель								
		Концентрация реагента, кг/м ³	ρ , г/см ³	УВ700/500, с	ПВ, сПз	ДНС, дПа	СНС10/10, дПа	Ф30 по АРІ, см3	К, мм	рН
1	Исходный раствор	0	1,026	26,4	6,8	87	75/127,5	20	2	10,7
	FH-DRILL	0,1	1,026	29,9	5,6	116	103/149	19	2	10,5
		0,2	1,026	36,4	7,9	136	91/85	21,5	2	10,6
		0,3	1,026	39,3	10,6	140	54,5/52	25,5	2	10,6
2	Исходный раствор	0	1,026	27,2	6,9	92,5	94/156	18,6	2	10,6
	P-02 (ЭПМК)	0,1	1,026	31,6	7,4	110	97/197	18	2	10,6
		0,2	1,026	36,8	8,4	121	75/78	19,8	2	10,6
		0,3	1,026	24,6	12,6	80	63/89,5	73	2	10,6
3	Исходный раствор	0	1,026	27,9	7	91,5	78/127,5	19,2	2	10,6
	REASIL	0,1	1,026	29,2	5,3	108,5	105/134	18	2	10,6
		0,2	1,026	37,8	7,1	129	101/104	17	2	10,7
		0,3	1,026	52,3	7,3	161	104/112	16,5	2	10,6
4	Исходный раствор	–	1,026	25,3	6,5	83,5	91/140	19	2	10,6
	SPECFLOC A	0,1	1,026	30,1	7,5	116,5	93/101	17,5	2	10,7
		0,2	1,026	36,8	10,8	103	40/41	62	2	10,5
		0,3	1,026	26,8	6,7	24,5	18/36	46	2	10,6
5	Исходный раствор	0	1,026	27,5	6,9	88	83/132	19	2	10,7
	СИЛФОК-2540	0,1	1,026	29,2	4,9	119	101/155	18	2	10,6
		0,2	1,026	37,3	6,7	145	100/89	16,5	2	10,7
		0,3	1,026	57,1	7,9	184	79/87	18,5	2	10,7

Из анализа лабораторных испытаний были сформулированы следующие выводы. Во-первых, ни один из исследованных реагентов не оказал заметного влияния на плотность или рН буровой жидкости.

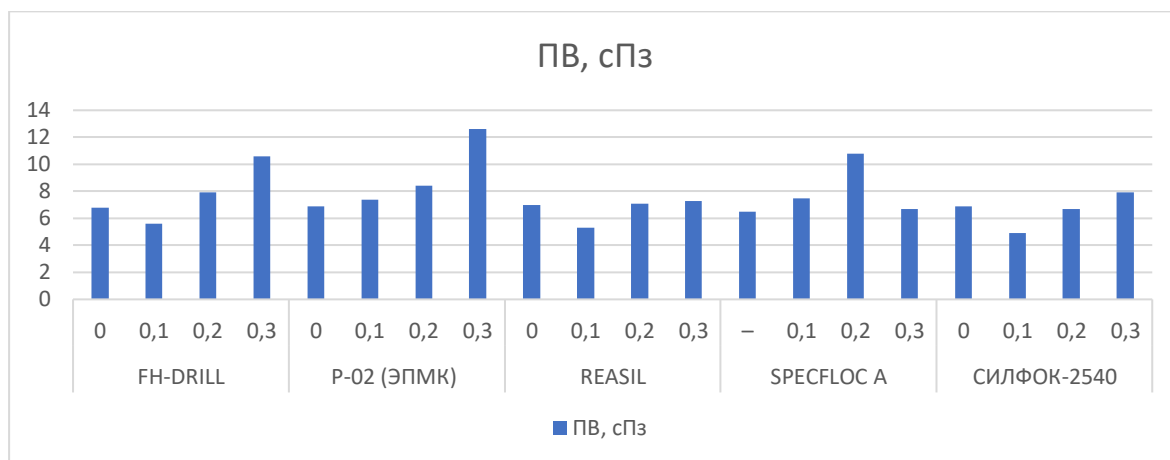
Во-вторых, добавки REASIL и P-02 (ЭПМК) в первую очередь предназначены для улучшения технологических характеристик суспензии на основе бентонита.

Реагент REASIL полностью подтвердил заявленные свойства: при его введении отмечалось повышение реологических характеристик и условной вязкости, а также лёгкое снижение фильтрации. В концентрации 0,3 % вещество проявляло незначительные флокулирующие свойства. Диаграмма изменения представлены на рисунках 1-4.



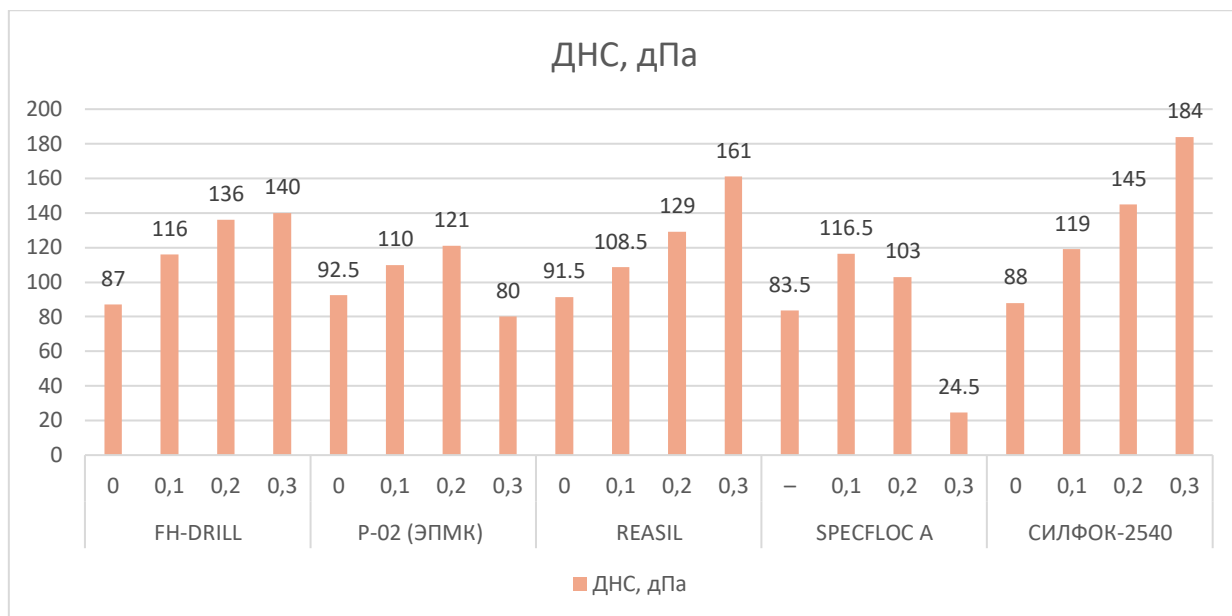
1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³

Рисунок 1 – Диаграмма изменения условной вязкости в зависимости от концентрации химреагента



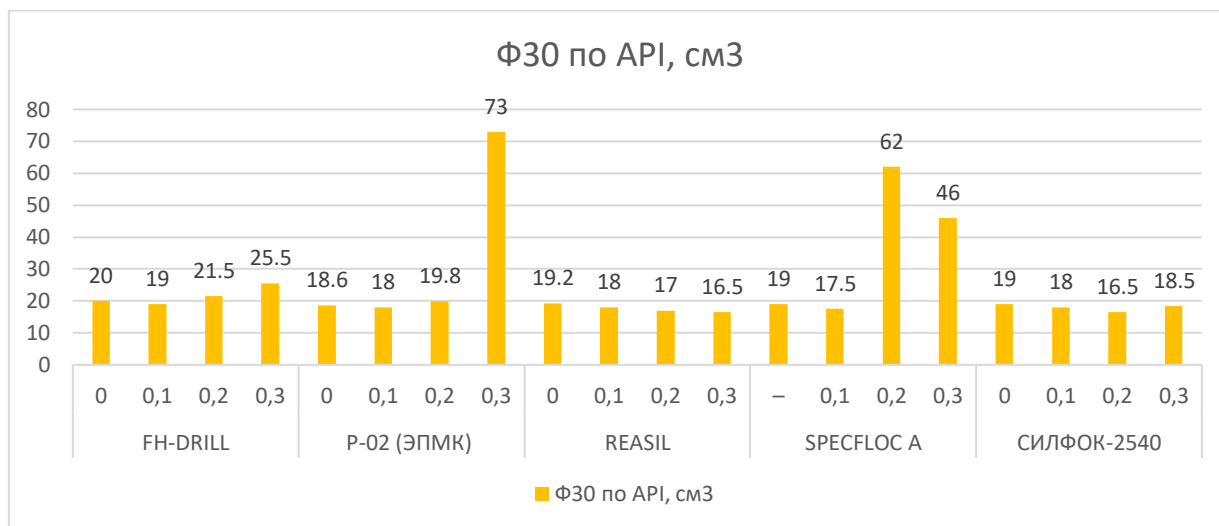
1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³

Рисунок 2 – Диаграмма изменения пластической вязкости в зависимости от концентрации химреагента



1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³

Рисунок 3 – Диаграмма изменения динамического напряжения сдвига в зависимости от концентрации химреагента



1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³

Рисунок 4 – Диаграмма изменения фильтрации в зависимости от концентрации химреагент

Использование Р-02 (ЭПМК) показало, что при дозировках (0,1–0,2) кг/м³ происходит улучшение свойств бентонитовой суспензии, однако при увеличении количества до 0,3 кг/м³ раствор начинал расслаиваться, реологические показатели снижались, а фильтрация существенно возрастала (рисунок 4.18). Таким образом, при применении данного реагента оптимальная дозировка не должна превышать 0,2 кг/м³.

В-третьих, реагенты SPECFLOC А и СИЛФОК-2540 относятся к классу флокулянтов, но имеют разные функциональные группы, тогда как FH-DRILL классифицируется как селективный флокулянт. Согласно литературным данным, селективные флокулянты должны обеспечивать флокуляцию выбуренной породы без повышения вязкости бентонитового раствора [9; 10].

Тем не менее в ходе испытаний введение FH-DRILL во все исследуемые концентрации сопровождалось ростом условной вязкости за счёт увеличения размеров образующихся флоккул. При повышении дозировки до 0,3 кг/м³ агрегаты становились ещё крупнее, что приводило к усилению фильтратоотдачи в результате роста количества свободной воды. Что касается реагентов SPECFLOC А и СИЛФОК-2540, то в дозировке 0,1 кг/м³ они оказывали идентичное действие: реологические свойства повышались, а фильтрация, наоборот, снижалась. Однако дальнейшее увеличение концентрации SPECFLOC А до (0,2–0,3) кг/м³ вызывало расслоение раствора с появлением осветлённой жидкости на поверхности. При 0,3 кг/м³ процесс флокуляции выражался особенно сильно, что сопровождалось резким ростом фильтрации и ухудшением реологических параметров. При введении реагента СИЛФОК-2540 в дозировке (0,2–0,3) кг/м³ фиксировалось повышение условной вязкости и рост динамического напряжения сдвига (ДНС). Однако одновременно наблюдалось заметное снижение статического напряжения сдвига (СНС) промывочной жидкости. Подобное сочетание параметров свидетельствует о том, что реагент начинает проявлять свойства, характерные для флокулянтов. Более того, низкие показатели СНС способны привести к ухудшению удерживающей способности раствора, то есть к потере его основной функции – сохранению выбуренной

породы во взвешенном состоянии [11–15]. На основании представленных данных можно сделать следующие обобщения:

- применение реагентов REASIL, P-02 (ЭПМК) и FH-DRILL допустимо для повышения вязкостных свойств глинистого раствора, при этом необходимо учитывать ограничение: концентрации добавок P-02 (ЭПМК) и FH-DRILL не должны превышать 0,2 кг/м³;

- использование флокулянта SPECFLOC A допустимо лишь в концентрации до 0,1 кг/м³, однако перед его внедрением требуется проведение дополнительных исследований. Целью таких работ должно быть формирование бурового раствора с заданным комплексом технологических параметров за счёт варьирования исходных дозировок базовых компонентов. При увеличении концентрации до (0,2–0,3) кг/м³ данный реагент начинает проявлять себя преимущественно как флокулянт, снижая СНС и одновременно увеличивая фильтратоотдачу;

- при условии, что в процессе бурения ключевым параметром контроля является именно ДНС, добавка СИЛФОК-2540 может быть рекомендована для применения. В противных случаях требуется проведение дополнительных лабораторных испытаний, уточняющих его влияние на комплексные свойства раствора.

Выводы

Четырехступенчатая система очистки с блоком коагуляции и флокуляции позволяет добиться:

- увеличения долговечности долот, ресурса забойных двигателей, бурильного инструмента;
- увеличения проходки на долото; – уменьшения количества СПО;
- снижения расхода хим. реагентов;
- уменьшения износа буровых насосов;
- уменьшения времени на профилактические и ремонтные работы оборудования;
- снижения вероятности аварийных работ и их ликвидации.

В целом итоги исследования подтверждают значительное влияние реагентов-флокулянтов на свойства глинистой суспензии.

Путём изменения исходных концентраций данных добавок появляется возможность получать промывочные жидкости с заданными технологическими характеристиками, обеспечивающими устойчивость бурового раствора при различных горно-геологических условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Шерстнев, Н.М. Применение физических полей для регулирования свойств буровых растворов и тампонажных материалов / Н.М. Шерстнёв, С.П. Шандин, С.И. Толоконский, Н.О. Черская, А.В. Уголева // Российский химический журнал. – 1995. – № 5. – С. 22–26.
- 2 Чихоткин, В.Ф. Буровой раствор и управление его реологическими свойствами при бурении скважин в осложненных условиях / В.Ф. Чихоткин, А.Я. Третьяк, Ю.М. Рыбальченко, М.Л. Бурда // Бурение на нефть. – 2007. – № 7–8. – С. 58–60.
- 3 Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties / P.I. Reid, G.H. Meeten, P. Clark, B.D. Chambers, A. Gilmour, M.W. Sanders // SPE Drilling & Completion. – June 2000. – V. 15. – № 15 (2). – P. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA.
- 4 Пат. 2708849 Российская Федерация. Наноструктурированный, высокоингибированный буровой раствор [текст] / Гончаренко Д.К: заявл. 24.01.19; опубл. 12.12.19. Бюл. № 35. – 8 с.
- 5 Можжерин А.В. Исследование остаточной проводимости алюмосиликатных и магнезиально-кварцевых пропантов при циклических нагрузках / А.В. Можжерин. Бурение и нефть. – 2017. – № 5. – С. 42–45.
- 6 Можжерин, А.В. Керамический пропант или песок / А.В. Можжерин. //Сфера. Нефть и газ. – 2018. – № 1. – С. 92–95.

- 7 Bouse E.E. Drilling Mud Solids Control and Waste Management / E.E. Bouse, J.E. Carrasquero // The Second Latin American Petroleum Engineering Conference. Caracas, 1992. Pp. 207–213. // SPE 23660.
- 8 Алексанян Г.Р. Очистка бурового раствора от шлама и пути ее совершенствования / Г.Р. Алексанян. //Техника и технология бурения. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. -2011. № 12. - С. 29–34.
- 9 Alum, Moses A. Semi-Analytical Models on the Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration (ROP) / Moses A. Alum, F. Egbon // Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Abuja, 2011. P. 1–13 // SPE 150806.
- 10 Rupert J.P. The Effects of Weight Material Type and Mud Formulation on Penetration Rate Using Invert Oil Systems / J.P. Rupert, C.W. Padro, S.R. Blattel // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, 1981. P. 1–4(11) // SPE 10102.
- 11 Blattel, Steve R. The Effect of Weight Material Type on Rate of Penetration Using Dispersed and Non-Dispersed Water-Base Muds / Steve R. Blattel, J. Paul Rupert // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, 1982. Pp. 1–5(14) // SPE 10961.
- 12 Beck F.E. The Effect of Rheology on Rate of Penetration / F.E. Beck, J.W. Powell, Mario Zamora // SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, 1995. Pp. 333–341 // SPE 29368.
- 13 Черныш, В.Ф. Очистка высоковязких буровых растворов / В.Ф. Черныш. //Территория нефтегаз. 2009. № 8. С. 25–28.
- 14 Петров, Н.А. Исследование свойств бурового раствора и эффективности систем очистки в процессе проводки нефтяных скважин / Н.А. Петров. //Нефтегазовое дело. 2008. Т.6. № 2. С. 40–45.
- 15 Chemical monitoring of mud products on drilled cuttings / T.L. Hughes, T.G.J. Jones, P.G. Tomkins, A. Gilmour, O.H. Houwen, M. Sanders // First

International Conference on Health, Safety and Environment held in the Hague.
The Netherlands, 1991. Pp. 391–402. // SPE 23361.

- 16 BP p.l.c Statistical Review of World Energy 2019. 68th ed. – UK: Pureprint Group Limited, 2019. – 61 p.
- 17 Prospects for the use of drilling slurries for the synthesis of aluminosilicate propants / E. Yatsenko, A. Tretyak, A. Chumakov, D. Golovko // Materials Today: Proceedings. – 2021. – V. 38. – P. 4. – P. 1886–1888. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.575.