

## Исследование влияния реологических свойств промывочных жидкостей на эффективность разрушения горных пород при бурении скважин шароструйным способом

Исаев Е. Д.<sup>1\*</sup>, Кушнер Л. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

\*e-mail: pelletdrilling@gmail.com

### Реферат

**Введение.** Шароструйный способ бурения, основанный на разрушении горных пород ударами шаров – объект изучения многих ученых. Несмотря на это, реологические свойства промывочной жидкости, применяемой при шароструйном бурении, не были исследованы. Все стендовые и полевые испытания проводились с применением технической воды. Применение промывочной жидкости, обладающей более высокой вязкостью, чем вода, способно потенциально расширить область применения шароструйного бурения. Поэтому актуальность приобретает исследование эффективности разрушения горных пород при использовании промывочных жидкостей, обладающих различными реологическими параметрами.

**Цель работы.** Исследовать эффективность разрушения горной породы в процессе бурения скважин шароструйным способом при различных реологических параметрах промывочной жидкости.

**Методология.** При проведении исследований использовался масштабированный лабораторный стенд. Стенд представлял собой замкнутую систему циркуляции промывочной жидкости (бурового раствора). Заготовка раствора осуществлялась отдельно на высокоскоростном миксере. Основная часть стенда представляла собой масштабированное шароструйное долото, находящееся в имитированной скважине. После проведения эксперимента замерялись объем выбуренной породы и реологические параметры промывочной жидкости. Проводилась серия экспериментов с постепенным увеличением вязкости промывочной жидкости. Для загущения промывочной жидкости использовался биополимер (ксантановая смола) в различной концентрации. Измерения реологических параметров бурового раствора производились при помощи восьмикоростного ротационного вискозиметра и воронки Марша.

**Результаты.** Впервые установлена зависимость между эффективностью разрушения горной породы при бурении шароструйным способом и реологическими параметрами применяемой промывочной жидкости. Установлено, что с ростом концентрации биополимера и ростом вязкости сначала происходит значительное увеличение объема выбуренной за единицу времени породы, а при дальнейшем увеличении концентрации – плавное снижение.

**Выводы.** Полученные результаты расширяют область применения шароструйного бурения. Улучшается достоверность прогнозирования механической скорости бурения скважин в зависимости от изменения свойств промывочной жидкости. На основании результатов сформированы рекомендации к подбору оптимальных параметров промывочной жидкости в зависимости от условий бурения.

**Ключевые слова:** разрушение горных пород; шароструйное бурение; промывочная жидкость; буровой раствор; условная вязкость; пластическая вязкость; твердые горные породы.

**Введение.** В Томском политехническом университете ведутся работы по развитию и совершенствованию шароструйного способа бурения скважин [1–8]. При реализации данного способа разрушение горной породы происходит под действием ударов металлических шаров, движущихся с большой скоростью.

Шароструйный способ бурения предложен в США в 1955 г. [9], свое развитие в СССР получил благодаря А. Б. Увакову [10] и С. А. Заурбекову [11]. Теорети-

ческим исследованием шароструйного бурения занимались в Украине [12–14]. В. В. Штрассер рассматривал возможность применения снаряда для шароструйного бурения в качестве устройства для диспергирования обломков горной породы [15].

Все исследования и промышленные испытания шароструйного способа бурения производились с использованием воды в качестве промывочной жидкости. Единственное упоминание о применении глинистого бурового раствора встречается в статье [9].

Исследователями установлено, что при использовании глинистого бурового раствора с условной вязкостью 36,5 с эффективностью бурения снизилась на 25 %. Другие значения условной вязкости не рассматривались. В статье отсутствует подробная методика проведения эксперимента. Стоит отметить, что показатель условной вязкости не дает исчерпывающей информации о реологических свойствах промывочной жидкости и по данному показателю нельзя однозначно судить о выносящих способностях раствора [16, 17].

Практикой бурения установлено, что вода во многих случаях не может обеспечить устойчивость ствола скважины. Пресная вода практически не обладает ингибирующей способностью. Динамическое напряжение сдвига (ДНС) воды равно нулю и обеспечивает минимально возможную выносящую способность шлама. При остановке циркуляции шлам не поддерживается во взвешенном состоянии. Из-за низкой вязкости отсутствует возможность утяжеления промывочной жидкости.

Использование воды в качестве промывочной жидкости потенциально способно вызвать следующие осложнения:

- зашламование ствола скважины из-за низкой выносящей способности раствора;
- осыпание стенок скважины из-за гидратации пород вследствие высокой фильтратоотдачи воды;
- проявление пластового флюида и осыпание стенок скважины из-за отсутствия возможности использования инертных утяжелителей (барит, гематит, мел и др.);
- поглощение промывочной жидкости из-за высокой фильтратоотдачи, отсутствия фильтрационной корки и отсутствия возможности применения кольматирующих составов.

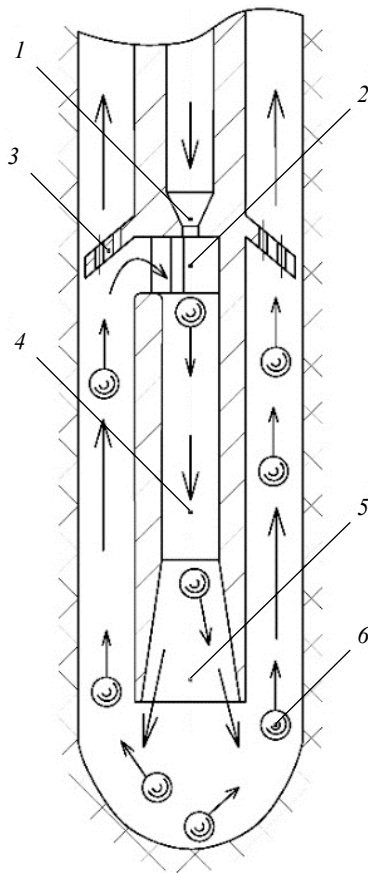


Рисунок 1. Снаряд для шароструйного бурения:

1 – сопло; 2 – впускные окна; 3 – задерживающее устройство; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – шары

Figure 1. Pellet impact drilling bit:  
1 – nozzle; 2 – inlet ports; 3 – guide sleeve; 4 – mixing chamber; 5 – diffuser; 6 – pellets

Перечисленные проблемы и осложнения могут наблюдаться и при шароструйном бурении. Поэтому в ряде случаев при шароструйном бурении необходимо использовать буровой раствор, отвечающий требованиям, предъявляемым горно-геологическими условиями и технологией строительства скважины. Актуальность приобретает исследование влияния реологических свойств промывочной жидкости на разрушение горных пород при шароструйном бурении.

Имеется большое количество публикаций о влиянии различных параметров раствора на эффективность разрушения горной породы при вращательном бурении. Согласно информации, представленной в публикациях, вязкость бурового раствора влияет на эффективность разрушения горных пород главным образом за счет очистки забоя скважины. С ростом вязкости улучшается очистка забоя от шлама, что способствует большей глубине внедрения резцов долота, особенно в более мягких породах. Кроме того, скорость разрушения горных пород может возрастать за счет гидродинамического эффекта [16–19]. При шароструйном бурении вязкость будет влиять не только на вынос породы, но и на кинематику движения шаров. Поэтому зависимости, подтвержденные для вращательного бурения, нельзя однозначно переносить на шароструйное бурение.

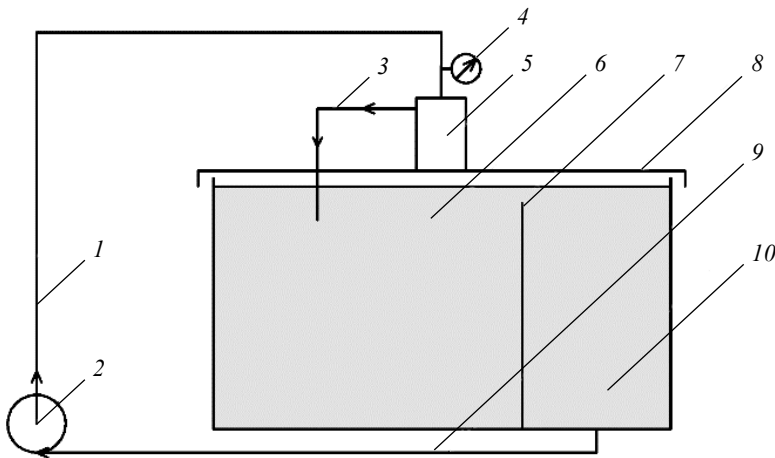


Рисунок 2. Циркуляционная система лабораторного стенда:  
1 – нагнетательная линия; 2 – насос; 3 – линия сброса; 4 – манометр; 5 – стакан, имитирующий стенки скважины; 6 – отсек для сброса жидкости вместе со шламом (отстойник); 7 – перегородка; 8 – основание стенда; 9 – питающая линия; 10 – отсек для подачи на буровой насос

Figure 2. Circulation system of laboratory bench:  
1 – discharge line; 2 – pump; 3 – fault line; 4 – pressure gage; 5 – a glass simulating the borehole walls; 6 – compartment for dumping liquid together with sludge (mud sump); 7 – partition; 8 – bench base; 9 – supply line; 10 – compartment for feeding the mud pump

**Цель работы** – исследовать эффективность разрушения горной породы в процессе бурения скважин шароструйным способом при различных реологических параметрах промывочной жидкости.

**Материалы и методы исследования.** Исследования производились на масштабируемом лабораторном стенде. Конструкция снаряда для шароструйного бурения, используемого в стенде, представлена на рис. 1.

При работе снаряда для шароструйного бурения струя жидкости, истекающая из сопла 1, передает энергию шарам 6. Шары 6, проходя через камеру смешения 4, ускоряются и ударяются о горную породу, осуществляя ее разрушение. Шары циркулируют в скважине замкнуто, при соударении с задерживающим устройством 3 проходят через впускные окна 2, расположенные в конструкции бурового снаряда под соплом.

Схема лабораторного стенда для проведения исследований изображена на рис. 2. Промывочная жидкость, подаваемая насосом 2, движется по нагнетательной линии 1 и поступает к снаряду для шароструйного бурения. Давление в линии подачи фиксируется манометром 4. Стенки скважины имитирует металлический

стакан 5. Отвод жидкости происходит через линию 3. После прохождения через снаряд для шароструйного бурения и стакан сброс жидкости с выбуренной породой осуществляется в отсек 6, где происходит гравитационное осаждение шлама. По верхнему перетоку над перегородкой 7 жидкость попадает в отсек 10, откуда повторно забирается насосом 2 по питающей линии 9.

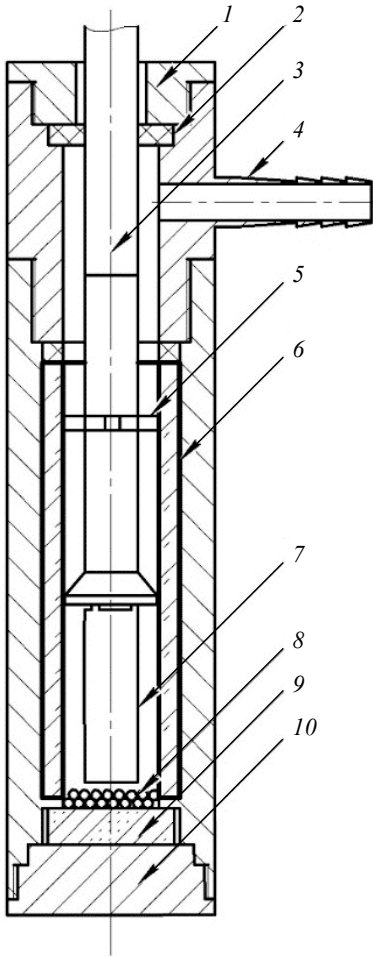


Рисунок 3. Стакан, имитирующий скважину:

1 – фиксатор герметизирующего элемента; 2 – герметизирующий элемент; 3 – бурильная колонна; 4 – отвод жидкости; 5 – центратор; 6 – трубка из оргстекла; 7 – шароструйный буровой снаряд; 8 – шары; 9 – разрушаемый материал; 10 – фиксатор разрушаемого материала

Figure 3. Glass simulating the well:  
1 – retainer of the sealing element; 2 – sealing element; 3 – drill string; 4 – liquid outlet; 5 – centralizer; 6 – plexiglass tube; 7 – pellet impact drilling bit; 8 – pellets; 9 – destructed material; 10 – destructed material retainer

#### Методика проведения эксперимента.

В циркуляционную систему лабораторного стенда набирается пресная вода с общей жесткостью не более 200 мг/л. Для улучшения работы полимера производилась обработка промывочной жидкости каустической содой в концентрации 1 кг/м<sup>3</sup> для повышения pH до 11. Для предотвращения ферментации биополимера использовался бактерицид.

В стакан, имитирующий скважину (рис. 3), устанавливается разрушаемый при бурении материал 9. Материал закрепляется фиксатором 10. В рамках данного лабораторного исследования в качестве разрушаемого материала выступала керамическая плитка. Внутри трубки из оргстекла высыпается порция металлических шаров 8 и спускается шароструйный буровой снаряд 7. Шароструйный снаряд 7 прикручивается к бурильной трубе 3. Через бурильную трубу предварительно продеты герметизирующий элемент 2 и его фиксатор 1. Фиксатор 1 прикручивается к стакану.

После сборки снаряд устанавливается на определенном расстоянии от разрушаемого материала. Включается насос, и в течение фиксированного времени в скважине осуществляется циркуляция шаров, разрушающих горную породу. После проведения эксперимента снаряд разбирается, фиксируются объем разрушенного материала путем создания и взвешивания слепка. Отбирается проба раствора для измерения реологических параметров. Измерения реологических параметров бурового раствора производились при помощи восьмикоростного ротационного вискозиметра и воронки Марша.

Эксперимент при одной и той же концентрации полимера производился не менее трех раз. При необходимости число экспериментов увеличивалось. Во время проведения экспериментов поддерживался фиксированный расход промывочной жидкости.

Для изменения вязкости раствора из циркуляции отбиралась проба объемом 3 л и обрабатывалась биополимером при непрерывном перемешивании на высокоскоростной мешалке. Необходимая концентрация биополимера пересчитывалась на объем циркуляции. После приготовления порции раствора осуществлялся

ее ввод в циркуляционную систему. Далее запускался насос, и циркуляция осуществлялась не менее 10 мин. При выравнивании параметров раствора циркуляция осуществлялась в обход шароструйного снаряда.

Постоянные параметры при проведении эксперимента: диаметр бурового снаряда – 16 мм; длина камеры смещения – 8 мм; диаметр сопла – 2 мм; конусность задерживающего устройства – 40°; высота технологических окон – 4,2 мм; длина камеры смещения – 60 мм; угол конусности диффузора – 10°; расстояние между долотом и забоем – 10 мм; диаметр шаров – 3 мм; расход промывочной жидкости – 0,6 л/с; время проведения опыта – 20 с; образец, разрушаемый материал – керамическая плитка; масса порции шаров – 5 г.

**Таблица 1. Сводные данные по исследованию реологических параметров раствора при различных концентрациях биополимера**

**Table 1. Summary data on the rheological parameters of the solution at various concentrations of the biopolymer**

Концентрация биополимера, кг/м <sup>3</sup>	Условная вязкость, с	Объем разрушения, см <sup>3</sup>	ПВ, дПа · с	ДНС, дПа	СНС за 10 с, дПа	СНС за 10 мин, дПа
0	26	0,842	1,0	0	0	0
0,75	27	1,005	1,5	1,0	0	0
1,50	30	1,017	2,5	2,5	0,5	0,5
2,00	32	0,957	3,0	4,5	1,5	2,0
3,00	37	0,910	4,0	10,0	5,0	7,0
4,00	42	0,869	4,5	16,0	9,0	11,0
5,00	50	0,840	5,0	22,0	11,0	15,0

ПВ – пластическая вязкость, ДНС – динамическое напряжение сдвига, СНС – статическое напряжение сдвига.

**Полученные результаты и их обсуждение.** Все полученные результаты сведены в табл. 1. Концентрация биополимера была ограничена значением 5 кг/м<sup>3</sup>, так как при дальнейшем увеличении вязкости происходила заклинка шаров над задерживающим устройством, что приводило к остановке их циркуляции.

Как видно из табл. 1, с ростом условной вязкости промывочной жидкости сначала происходит значительное увеличение объема выбуренной за единицу времени породы, а при дальнейшем увеличении концентрации – плавное снижение. Наибольший объем разрушения наблюдается при достаточной низкой условной вязкости (30 с) и концентрации биополимера 1,5 кг/м<sup>3</sup>.

Рассмотрим формулу, характеризующую эффективность бурения скважины шароструйным способом [10]:

$$V_{\text{скв}} = V_{1\text{ш}} Q_{\text{кс}}^m t \gamma, \quad (1)$$

где  $V_{\text{скв}}$  – объем скважины, пробуренной шароструйным способом;  $V_{1\text{ш}}$  – объем воронки в горной породе, образующийся при единичном ударе шара, который зависит от горной породы, объема, массы, материала и скорости шара, м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{кс}}^m$  – число ударов шаров о забой в единицу времени, ш/с;  $t$  – время бурения, с;  $\gamma$  – коэффициент, который учитывает падение скорости бурения из-за соударения шаров между собой, 1/ш.

Можно предположить, что резкое повышение эффективности бурения с увеличением концентрации биополимера связано с тем, что шару сообщается

большая кинетическая энергия. При ударе шара о забой с большей кинетической энергией увеличивается объем воронки разрушения после единичного удара. Дальнейшее увеличение скорости шара может привести к тому, что дополнительная энергия будет расходоваться не на разрушение породы, а на отскок шара. С ростом вязкости раствора снижается коэффициент эжекции шароструйного снаряда, представляющий собой отношение эжектируемого потока к рабочему. Эжектируемым потоком является раствор, поступающий в камеру смешения из затрубного пространства через спускные окна вместе с шарами, а рабочим потоком – смешанный поток внутри камеры смешения. Из-за снижения расхода рабочего раствора снижается расход шаров в единицу времени, что приводит к падению эффективности бурения согласно формуле (1). Данное предположение подтверждается появлением заклинок шаров перед впускными окнами при увеличении вязкости раствора, что происходит из-за снижения коэффициента эжекции.

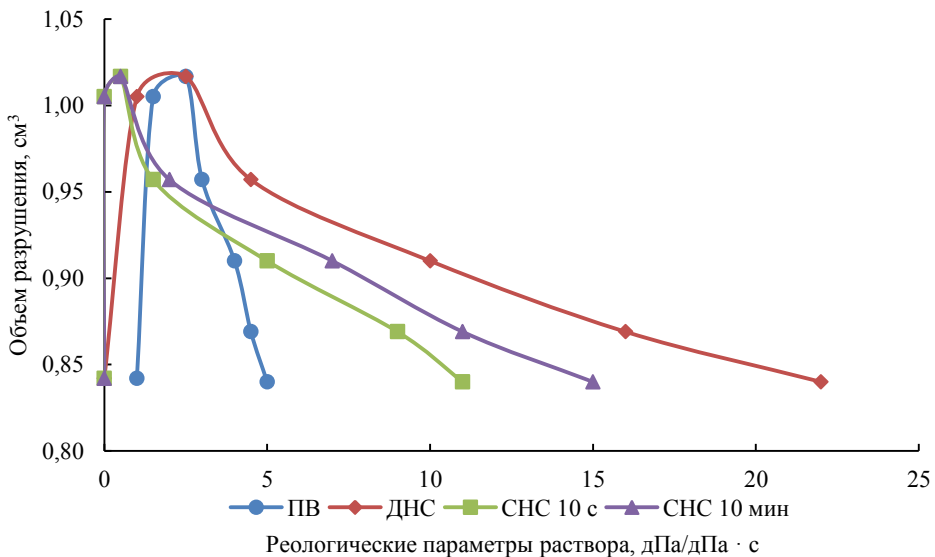


Рисунок 4. Зависимость объема разрушения от реологических свойств бурового раствора  
Figure 4. Dependence of the volume of destruction on the rheological properties of the drilling fluid

Помимо условной вязкости замерялась динамическая вязкость раствора при различных скоростях вращения шпинделя ротационного вискозиметра. По полученным данным вычислялись ДНС – величина, которая характеризует выносящую способность раствора, пластическая вязкость (ПВ) и статическое напряжение сдвига (СНС) после истечения 10 с и 10 мин, определяющее удерживающую способность раствора в отсутствии циркуляции. Пластическая вязкость существенно не влияет на выносящую способность раствора и зависит от количества инертных частиц, находящихся в нем. Во всех опытах пластическая вязкость была минимальна, так как в растворе присутствовало минимальное число инертной твердой фазы. В полевых условиях рост данного параметра также будет приводить к росту условной вязкости [17, 18]. Полученные данные в графическом виде представлены на рис. 4.

Характер изменения объема разрушения от величины ДНС повторяет зависимость от условной вязкости, так как пластическая вязкость была минимальна. Пластическая вязкость имеет минимальные значения. В полевых условиях при наработке раствора пластическая вязкость будет увеличиваться. В этих случаях

рекомендуется руководствоваться значением ДНС. Наибольший объем разрушенного материала наблюдается при достаточно низком значении СНС, которого недостаточно для поддержания выбуренной породы во взвешенном состоянии при остановке циркуляции.

В производственных условиях, при использовании бурового раствора требования к его реологическим параметрам могут быть различны, но, как правило, значение ДНС рекомендуется поддерживать не ниже 38 дПа и СНС не ниже 14/24 (10 с/10 мин) дПа. Данному критерию соответствует концентрация биополимера 3 кг/м<sup>3</sup>. При данной концентрации биополимера объем разрушенного материала все равно остается на 12 % выше, чем при использовании воды, но на 6 % ниже, чем при концентрации биополимера 1,5 кг/м<sup>3</sup>.

На основании полученных результатов можно сформулировать рекомендации к подбору реологических параметров раствора.

*Вариант 1.* Если при бурении отсутствует возможность задействовать систему очистки (вибросита, песко- и илоотделители), при этом к раствору не предъявляется особых требований, то рекомендуется осуществлять бурение на технической воде. Для очистки промывочной жидкости может быть достаточно гравитационного осаждения шлама в отдельной емкости (отстойнике).

*Вариант 2.* Главным требованием является высокая механическая скорость бурения, при этом не предъявляются дополнительных требований к свойствам промывочной жидкости. В этом случае рекомендуется начать бурение с минимальной концентрацией биополимера, примерно 0,5 кг/м<sup>3</sup>, с постепенным увеличением концентрации. При снижении механической скорости остановить увеличение концентрации биополимера. При необходимости осуществить разбавление водой.

*Вариант 3.* Если не обеспечивается достаточно эффективный вынос шлама и существует вероятность осыпания стенок скважины, а также при других ситуациях, когда необходимо обеспечить особые требования к буровому раствору, необходимо произвести обработку раствора до достижения требуемых параметров. При этом снижением эффективности бурения следует пренебречь.

При высокой вязкости раствора или при увеличении расхода раствора может наблюдаться заклинка шаров перед впускными окнами. Возможным решением этой проблемы является увеличение коэффициента эжекции. Требуется установить к компоновке шароструйного снаряда проходное сопло меньшего диаметра. При этом возрастет устьевое давление.

**Выводы.** Впервые установлена зависимость между вязкостью бурового раствора и эффективностью разрушения горной породы при бурении шароструйным способом. Сформированы рекомендации по подбору оптимальных реологических параметров промывочной жидкости в зависимости от задач, ставящихся при бурении.

Полученные результаты расширяют область применения шароструйного бурения, а также улучшают качество прогнозирования эффективности бурения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев А. В., Рябчиков С. Я., Алиев Ф. Р., Якушев Д. А., Горбенко В. М. Проблемы гидродинамических способов бурения скважин и основные направления их решения // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 3. С. 6–12.
2. Ковалев А. В., Рябчиков С. Я., Горбенко М. В., Горбенко В. М., Саруев Л. А. Расчет технологических процессов шароструйного бурения в оптимальном режиме разрушения горных пород // Георесурсы. 2016. Т. 18. № 1. С. 102–106. DOI: 10.18599/grs.18.2.5
3. Kovalyov A. V., Ryabchikov S. Ya., Isaev Ye. D., Ulyanova O. S. Modeling pellet impact drilling process // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. Vol. 33. Art. 012030. DOI: 10.1088/1755-1315/33/1/012030
4. Урниш В. В., Ковалев А. В., Горбенко М. В., Саруев Л. А. Разработка конструкции задерживающего устройства для шароструйного бурения скважин с применением улавливаю-

подпитывающего устройства // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XX Междунар. симп. студентов и молодых ученых им. акад. М. А. Усова, Томск, 4–8 апреля, 2016. Томск: ТПУ, 2016. Т. 2. С. 786–788.

5. Ваганов А. Р., Исаев Е. Д. Испытание шароструйно-эжекторного бурового снаряда на лабораторном стенде на базе станка СКБ-4 // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXI Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова, Томск, 3–7 апреля, 2017. Томск: ТПУ, 2017. Т. 2. С. 460–461.

6. Горбенко М. В. Выявление эффективной области применения шароструйно-эжекторных буровых снарядов // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XXI Междунар. симп. студентов и молодых ученых им. акад. М. А. Усова, Томск, 3–7 апреля, 2017. Томск: ТПУ, 2017. С. 568–569.

7. Урнш В. В., Саруев Л. А., Саруев А. Л. Оптимизация режимов шароструйного бурения регулированием расстояния от снаряда до забоя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 4. С. 162–170.

8. Исаев Е. Д. К вопросу перспектив развития шароструйного бурения // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XX Междунар. симп. им. акад. М. А. Усова, Томск, 6–10 апреля, 2020. Томск: ТПУ, 2020. Т. 2. С. 451–452.

9. Eckel I. E., Deily F. H., Ledgerwood L. W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits // Transaction AIME. 1956. Vol. 207. P. 15.

10. Уваков А. Б. Шароструйное бурение. М.: Недра, 1969. 207 с.

11. Заурбеков С. А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Алматы, 1995. 18 с.

12. Вяткин С. С. Современное состояние и проблемы развития физических способов бурения // Бурение: матер. докл. XI Всеукр. науч.-техн. конф. студентов, Донецк, 28–29 апреля, 2011. С. 20–22.

13. Давиденко А. Н., Игнатов А. А. Абразивно-механическое ударное бурение скважин. Днепропетровск: НГУ, 2013. 110 с.

14. Ярошенко А. В. Резерв повышения производительности физических способов бурения // Форум студентов-буровиков: сб. докл. Всеукр. студ. науч.-техн. конф. Днепропетровск, 2017. С. 7–9.

15. Штрассер В. В., Стаханов Д. В., Попов А. И. Водоструйный рециркулятор: вопросы теории и практики применения // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2016. № 4. С. 159–171.

16. Mi Swaco. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов. Ред. 2.1. США, 2009. 992 с.

17. Митчелл Дж. Безаварийное бурение: пер. с англ. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. 344 с.

18. Евсеев В. Д. Физика разрушения горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин. Томск: ТПУ, 2008. 151 с.

19. Бруй Л. К., Шемлей Н. В., Аткинская Т. В. Буровые и тампонажные растворы. Гомель: ГГТУ, 2019. 135 с.

Поступила в редакцию 4 августа 2021 года

#### Сведения об авторах:

**Исаев Евгений Дмитриевич** – аспирант отделения нефтегазового дела Томского политехнического университета. E-mail: pelletdrilling@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3694-0307>

**Кушнер Лев Евгеньевич** – студент отделения нефтегазового дела Томского политехнического университета. E-mail: lek4@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8202-0926>

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-25-34

## The influence of flushing fluids rheological properties on rock breaking efficiency when drilling wells by pellet impact drilling method

Evgenii D. Isaev<sup>1</sup>, Lev E. Kushner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

#### Abstract

**Introduction.** Pellet impact drilling method which is basically the destruction of rocks by blows of pellets, has been studied by many researchers. Despite this, the rheological properties of the drilling fluid used in pellet impact drilling have not been investigated yet. All bench and field tests were carried out using service water. The use of a drilling fluid with a higher viscosity than water has the potential to expand the field of application of pellet impact drilling. Therefore, it becomes urgent to study the effectiveness of destruction of rocks when using flushing fluids with different rheological parameters.

**Objective of this research** is to investigate the efficiency of rock destruction in the process of drilling wells using the pellet impact drilling method at various rheological parameters of the drilling fluid.



**Methods of research.** A scaled laboratory bench was used in the research. The bench was a closed system of circulation of the drilling fluid (drilling mud). The solution was prepared separately on a high-speed mixer. The main part of the bench was a scaled pellet drill bit located in a simulated well. After the experiment, the destructed rock volume and the rheological parameters of the flushing fluid were measured. A series of experiments was carried out with a gradual increase in the viscosity of the flushing fluid. A biopolymer (xanthan gum) in various concentrations was used to thicken the flushing fluid. Drilling fluid rheological parameters were measured using an eight-speed rotary viscometer and a Marsh funnel.

**Results.** For the first time, a relationship has been established between the efficiency of rock destruction during pellet impact drilling and the rheological parameters of the drilling fluid used. It was found that with an increase in the concentration of biopolymer and an increase in viscosity, at first, there was a significant increase in the volume of drilled rock per unit time, and with a further increase in concentration, a gradual decrease occurs.

**Conclusions.** The results obtained expand the field of application of pellet impact drilling. The reliability of predicting the drilling speed is improved depending on changes in the properties of the drilling fluid. Based on the results, recommendations were made for the selection of the optimal parameters of the drilling fluid, depending on the drilling conditions.

**Keywords:** rock destruction; pellet impact drilling; flushing fluid; drilling mud; conditional viscosity; plastic viscosity; solid rocks.

#### REFERENCES

1. Kovalev A. V., Riabchikov S. Ia., Aliev F. R., Iakushev D. A., Gorbenko V. M. Problems of hydrodynamic methods of wells drilling and the main directions in their solution. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2015; 326(3): 6–12. (In Russ.)
2. Kovalev A. V., Riabchikov S. Ia., Gorbenko M. V., Gorbenko V. M., Saruev L. A. Calculation of ball jet drilling processes in the optimal mode of rock destruction. *Georesursy = Georesources*. 2016; 18(1): 102–106 (In Russ.). Available from: doi: 10.18599/grs.18.2.5
3. Kovalyov A. V., Ryabchikov S. Ya., Isaev Ye. D., Ulyanova O. S. Modeling pellet impact drilling process. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2016. Vol. 33. Art. 012030. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/33/1/012030
4. Urnish V. V., Kovalev A. V., Gorbenko M. V., Saruev L. A. Developing the design of a time-delay device for pellet impact drilling of well with a catching and backup device. In: *Problems of geology and subsurface development: Proceedings of the 20th Internat. Sci. Symp. for Students and Young Scientists in honor of Academician M. A. Usov, Tomsk, 4–8 April, 2016*. Vol. 2. Tomsk: TPU Publishing; 2016. 786–788. (In Russ.)
5. Vagapov A. R., Isaev E. D. Testing a pellet impact ejector drill stem using a test bench based on the SKB-4 bench. In: *Problems of geology and subsurface development: Proceedings of the 21st Internat. Sci. Symp. in honor of Academician M. A. Usov, Tomsk, 3–7 April, 2017*. Vol. 2. Tomsk: TPU Publishing; 2017. 460–461. (In Russ.)
6. Gorbenko M. V. Searching for an effective scope for pellet impact ejector drill stems. In: *Problems of geology and subsurface development: Proceedings of the 21st Internat. Sci. Symp. in honor of Academician M. A. Usov, Tomsk, 3–7 April, 2017*. Vol. 2. Tomsk: TPU Publishing; 2017. 568–569. (In Russ.)
7. Urnish V. V., Saruev L. A., Saruev A. L. Optimization of pellet impact drilling regimes by regulation of spacing between a drill bit and a hole bottom. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018; 329(4): 162–170. (In Russ.)
8. Isaev E. D. Regarding the prospects of pellet impact drilling development. In: *Problems of geology and subsurface development: Proceedings of the 20th Internat. Sci. Symp. in honor of Academician M. A. Usov, Tomsk, 6–10 April, 2020*. Vol. 2. Tomsk: TPU; 2020. p. 451–452. (In Russ.)
9. Eckel I. E., Deily F. H., Ledgerwood L. W. Development and testing of jet pump pellet impact drill bits. *Transaction AIME*. 1956. Vol. 207, p. 15.
10. Uvakov A. B. *Pellet impact drilling*. Moscow: Nedra Publishing; 1969. (In Russ.)
11. Zaurbekov S. A. *Improving the efficiency of hydrodynamic processes near a face in the course of pellet impact drilling: PhD in Eng. abstract of diss.* Almaty; 1995. (In Russ.)
12. Viatkin S. S. Current state and problems of physical drilling methods. In: *Drilling: Proceedings of the 11th All-Ukrainian Sci.-to-Pract. Conf for Students, Donetsk, 28–29 April, 2011*. p. 20–22. (In Russ.)
13. Davidenko A. N., Ignatov A. A. *Abrasive-mechanical impact drilling of wells*. Dnipropetrovsk: NSU Publishing; 2013. (In Russ.)
14. Iaroshenko A. V. Room for physical drilling methods efficiency improvement. In: *Forum for drilling students: Proceedings of the All-Ukrainian Sci. and Tech. Conf.* Dnipropetrovsk; 2017. p. 7–9. (In Russ.)
15. Shtrasser V. V., Stakhanov D. V., Popov A. I. Water-jet recirculator: theory and practice of application. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2016; 4: 159–171. (In Russ.)
16. *M-I SWACO. Engineering drilling fluid manual*. Ed. 2.1. USA; 2009.
17. Mitchel J. *Trouble-free drilling: translation from English*. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Sciences; 2017. (In Russ.)

18. Evseev V. D. *Physics of rock breaking when drilling oil and gas wells*. Tomsk: TPU Publishing; 2008. (In Russ.)

19. Brui L. K., Shemlei N. V., Atvinovskaia T. V. *Grout and drilling fluid*. Gomel: GSTU Publishing; 2019.

Received 4 August 2021

#### Information about authors:

**Evgenii D. Isaev** – PhD student, Oil and Gas Engineering Department, Tomsk Polytechnic University. E-mail: [pelletdrilling@gmail.com](mailto:pelletdrilling@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-3694-0307>

**Lev E. Kushner** – student, Oil and Gas Engineering Department, Tomsk Polytechnic University. E-mail: [lek4@tpu.ru](mailto:lek4@tpu.ru); <https://orcid.org/0000-0001-8202-0926>

**Для цитирования:** Исаев Е. Д., Кушнер Л. Е. Исследование влияния реологических свойств промывочных жидкостей на эффективность разрушения горных пород при бурении скважин шароструйным способом // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 7. С. 25–34. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-25-34

**For citation:** Isaev E. D., Kushner L. E. The influence of flushing fluids rheological properties on rock breaking efficiency when drilling wells by pellet impact drilling method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 7: 25–34 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-25-34