

УДК 622.24.06

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПАЧЕК В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Королев Алексей Сергеевич¹,
korolev2818@gmail.com

Минаев Константин Мадестович¹,
minaevkm@tpu.ru

Сагитов Рашид Равильевич¹,
Sagitov_r@bk.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. В процессе бурения скважин часто прибегают к использованию различных пачек, выполняющих самые разные функции, такие как предотвращение контакта различных жидкостей в скважине, очистка ствола скважины, снижение сил трения, ликвидация осложнений. При этом в большинстве случаев используется преимущественно только один способ применения таких жидкостей – заблаговременное приготовление пачек в отдельных емкостях с последующей прокачкой в скважине. Данный способ отличается низкой технологичностью, привлечением дополнительного парка емкостей и повышенным расходом реагентов. С учетом широкой распространенности технологии прокачки пачек в процессе бурения даже незначительная оптимизация позволит сократить расходы на проведение этих операций. Слабая публикационная активность по этой теме дополнительно обуславливает необходимость более активного изучения и освещения в научной и обзорной литературе традиционных и альтернативных технологий приготовления и использования пачек в бурении скважин.

Цель: рассмотреть технологию использования шашек для приготовления пачек при бурении скважин, выделить область применения и ограничения данной технологии.

Объекты: шашки для приготовления пачек в процессе бурения скважин.

Методы: анализ разновидностей пачек, используемых при бурении скважин, для выделения требований к их применению и приготовлению, анализ и оценка традиционной технологии приготовления пачек, анализ и оценка технологии использования шашек для приготовления пачек.

Результаты. Авторами выделены основные разновидности пачек, применяемых при бурении скважин, преимущества и недостатки технологии использования шашек для приготовления пачек, а также области применения согласно обнаруженным ограничениям.

Ключевые слова:

буровой раствор, очистка скважины, буферная пачка, кольматирующая пачка, пачка с повышенным содержанием смазывающей добавки, пачка для очистки ствола скважины, пачка с волокнистым кольматантом, шашка.

Введение

Падение добычи нефти из-за истощения запасов на разрабатываемых месторождениях вынуждает недропользователей расширять территориальные границы своей деятельности. Привычные методы строительства скважин не могут быть применимы для любых геологических условий, в результате чего подрядчики могут столкнуться с разного рода трудностями. В результате формируется новый виток технологий, призванный решить имеющиеся проблемы и предотвратить возможные в будущем.

Так, при бурении зачастую возникают проблемные ситуации, которые невозможно эффективно решать с применением только бурового раствора. К ним относятся сложности в ориентировании инструмента при бурении в режиме слайдирования, подвешивание инструмента, недохождение нагрузки на долото, высокие значения крутящего момента и нагрузок на крюке, подлипание инструмента [1], неудовлетворительная очистка ствола скважины и т. д. [2]. Кроме того, при строительстве скважин не исключено возникновение

осложнений, связанных с поглощением бурового раствора, неустойчивостью стенок скважины, образованием сальников на инструменте и т. д.

Для решения подобных проблем прибегают к использованию специализированных пачек (англ. «pill»). Пачка – это относительно небольшой объем жидкости, который закачивается в скважину для выполнения технологических функций, которые не способен обеспечить используемый в текущий момент буровой раствор. С одной стороны, пачка может быть схожа с используемым буровым раствором с минимальными отличиями в технологических параметрах, например, могут различаться только вязкость или плотность. С другой стороны, пачка может иметь не только кардинально отличные технологические параметры, но и иметь в своей основе другой тип жидкости, например, углеводородную основу.

Выбор той или иной рецептуры пачки зависит от выполняемых задач. В процессе строительства одной скважины в программу промывки может быть заложено несколько рецептур пачек. Для выбора одной рецептуры из многих формируются алгоритмы, опре-

деляющие наиболее подходящую с учетом фактических данных. В целом, несмотря на широкое использование технологии прокачки пачек, исследователи отмечают малое количество упоминаний этой темы в научной литературе [3].

С учетом распространенности технологии использования пачек актуальным является вопрос оптимизации их приготовления и применения.

Разновидности пачек

На рис. 1 представлены основные разновидности пачек, применяемых при бурении скважин.

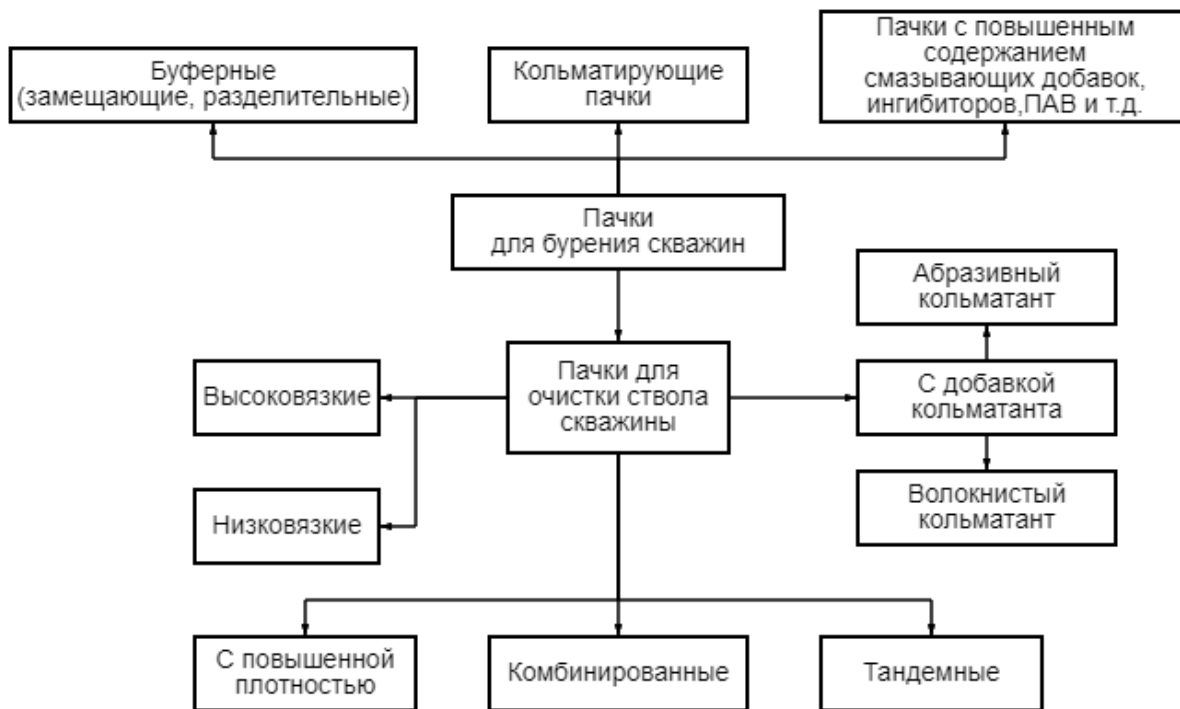


Рис. 1. Классификация пачек

Fig. 1. Pill classification

Пачки в зависимости от состава могут выполнять следующие функции:

- отделение систем буровых растворов друг от друга при замещении в скважине;
- изоляция интервалов ствола скважины от влияния других технологических жидкостей;
- удержание другой пачки в стволе скважины, предохранение ее от контакта с другими жидкостями;
- очистка ствола скважины;
- закупоривание каналов поглощения;
- снижение сил трения;
- удаление сальников с бурильного инструмента и т. д.

В случаях, когда перевод скважины на другую технологическую жидкость предполагает недопустимость смешения этих жидкостей, могут применяться буферные (замещающие, разделительные) пачки. Применение этих пачек наиболее оправданно при переводе скважины с раствора на водной основе (РВО) на раствор на углеводородной основе (РУО) и наоборот. Смешение в скважине РВО и РУО приведет к значительному изменению технологических свойств обеих жидкостей, что недопустимо с учетом как высокой стоимости самих компонентов, так и значительных затрат на утилизацию некондиционных жидкостей. Кроме того, буферные пачки обеспечивают

более качественное замещение жидкостей за счет вовлечения застойных зон [4].

Изоляция буровых растворов друг от друга достигается путем закачки в скважину буферных пачек, которые могут быть как на водной, так и на углеводородной основе, в зависимости от того, какой буровой раствор изначально находился в скважине. В случае замещения РВО на РУО в качестве буферных пачек может использоваться вода или последовательно закаченные вода и загущенный углеводород. При замещении РУО на РВО буферными жидкостями может выступать углеводород или последовательно закаченные углеводороды и загущенная вода (загущенный буровой раствор на водной основе) [5]. Например, при переводе скважины на РУО первый компонент буферной пачки – разделитель на водной основе – может содержать известь и ксантановый биополимер для достижения условной вязкости 80–100 с. Вторым компонентом буферной пачки – углеводородный буфер – может быть представлен жидкостью-основой РУО, дизельным топливом или газовым конденсатом [6].

При наличии в разрезе скважины интервалов с вероятностью возникновения поглощений в программу промывки скважины закладывается рецептура и алгоритм приготовления кольматирующих пачек. Такие пачки характеризуются высокими концентрациями

наполнителей (твердой фазы) и относительно широким спектром технологий их применения. Например, эффект от кольматирующей пачки может достигаться при помощи прокачки по циклу некоторого заданного объема бурового раствора с повышенным содержанием кольматанта; размещения кольматирующей пачки напротив интервала поглощения с последующей задавкой в пласт или без нее. Концентрации наполнителей в кольматационных пачках варьируются в широких пределах – от 40 до 200 кг/м³ – и зависят как от геологических условий – геометрические размеры трещин каналов поглощения, так и от используемой технологии применения пачки – прокачка через все элементы КНБК или с использованием циркуляционного переводника [7].

При бурении скважин большого диаметра, скважин со сложным профилем, большими величинами отхода от вертикали могут возникать проблемы неудовлетворительной очистки ствола скважины. В таком случае в зависимости от обстоятельств может применяться широкий спектр очищающих пачек. Выделяют следующие виды таких пачек:

- высоковязкие;
- низковязкие;
- с повышенной плотностью;
- комбинированные;
- тандемные;
- с добавкой кольматанта.

Основной отличительной чертой очищающих пачек является их реологическая характеристика, описываемая в основном такими параметрами, как пластическая вязкость (ПВ), динамическое напряжение сдвига (ДНС) и статическое напряжение сдвига (СНС) [8].

Каждая из этих перечисленных пачек имеет свою область применения, где она проявляет наибольшую эффективность. Так, высоковязкие пачки наиболее предпочтительно применять в интервалах скважины с невысокими значениями зенитного угла, обычно до 30°. Высоковязкие пачки характеризуются невысокими значениями ПВ, увеличенными значениями ДНС и СНС. В качестве контролируемого параметра часто выбирается условная вязкость, принимаемая в среднем в диапазоне от 80 до 140 с. За счет таких характеристик достигается высокая выносящая способность, обусловленная ламинарным течением пачки в затрубном пространстве. Наличие вращения буровой колонны в процессе прокачки пачки вызывает турбулизацию потока, поэтому прокачка таких пачек ведется преимущественно при отсутствии или низкой частоте вращения буровой колонны [9].

Низковязкие пачки, напротив, имеют повышенную эффективность при их использовании в наклонно-направленных скважинах с зенитным углом более 30°. Проблема неудовлетворительной очистки может быть вызвана не столько недостаточной выносящей способностью бурового раствора, сколько наличием шламовой подушки на стенке скважины, формирующейся при зенитных углах от 30 до 60° [5]. Эксцентриситет буровой колонны также негативно сказывается на

очистке, поскольку приводит к перераспределению скоростей восходящего потока бурового раствора в сечении ствола скважины. Наиболее критичная ситуация возникает, когда буровая колонна лежит на нижней образующей стенки скважины, что усугубляет формирование шламовой подушки за счет уменьшения скорости восходящего потока в этой зоне. Удаление шлама низковязкой пачкой достигается путем формирования турбулентного потока, который способствует эрозии шламовой подушки и поднимает шлам из зоны низких скоростей восходящего потока в зону наибольших скоростей. Отсюда следует, что в случае использования высоковязких пачек в скважинах с большими зенитными углами очистка не будет достигаться, так как не будет формироваться турбулентного потока. Кроме того, высоковязкая пачка будет иметь тенденцию перемещаться в области наибольших скоростей восходящего потока, не затрагивая шламовую подушку.

Пачки с повышенной плотностью используются так же, как и низковязкие, в наклонно-направленных скважинах с большим зенитным углом и горизонтальных скважинах. Эти пачки реализуют несколько иной подход при очистке ствола скважины. Основным механизмом воздействия на частицы шлама – сила Архимеда, которая позволяет шламовой подушке разрушаться при приложении меньших усилий даже без значительной турбулизации потока. За счет разности плотностей бурового раствора и пачки с повышенной плотностью последняя будет перемещаться преимущественно по нижней образующей стенки скважины, где находится шламовая подушка. Препятствием к применению таких пачек могут выступать ограничения по величине забойного давления для предотвращения поглощений. Согласно накопленным сведениям [5], для создания значимого эффекта различие плотностей пачки с повышенной плотностью и исходного бурового раствора должно составлять не менее 0,1 кг/л. На основании этих рекомендаций можно провести оценочный расчет необходимого количества утяжелителя: для увеличения плотности бурового раствора от 1,1 до 1,2 кг/л с использованием барита необходимо довести концентрацию утяжелителя минимум до 140 кг/м³, в зависимости от влажности.

К комбинированным пачкам относятся высоковязкие и низковязкие пачки с повышенной плотностью. Каждая из этих пачек обладает своими преимуществами и областями применения. Так, низковязкая пачка с повышенной плотностью, обладая преимуществами пачки с повышенной плотностью, такими как повышенная выталкивающая сила и тенденция двигаться в области шламовой подушки, обеспечивает дополнительную турбулизацию потока, которая приводит к более существенному разрушению шламовой подушки. Высоковязкая пачка с повышенной плотностью обладает более высокой транспортирующей способностью, что может быть использовано при значительном количестве скопившегося шлама в скважинах с невысокими значениями зенитного угла [8].

Под tandemными пачками подразумевают последовательную закачку пачек с различными характеристиками, например, производится закачка низковязкой пачки, следом за которой закачивается высоковязкая пачка. Данная комбинация с помощью низковязкой пачки обеспечивает предварительную турбулизацию потока, разрушение шламовой подушки и поднятие частиц шлама в область наибольших скоростей восходящего потока. Затем высоковязкая пачка, обладая более высокой выносящей способностью, обеспечивает перемещение и вынос взвешенных частиц шлама. Аналогичный эффект может быть достигнут при последовательной закачке низковязкой пачки и пачки с повышенной плотностью [10].

Каждая из вышеперечисленных пачек может быть дополнительно обработана кольматантом, который в зависимости от разновидности может оказывать различный эффект. К реагентам, увеличивающим несущую способность жидкости, относятся кольматирующие материалы волокнистой структуры, называемые «sweeping agents». Добавление волокнистого материала в пачку значительно увеличивает транспортирующую способность без существенного увеличения вязкости самой пачки [11]. Волокнистые наполнители способствуют удалению из скважины наиболее крупных частиц шлама, а мелкие частицы – основная составляющая шламовой подушки – остаются преимущественно нетронутыми. Для решения этой проблемы могут быть использованы абразивные кольматанты, например, ореховая скорлупа. При прокачивании таких пачек шламовая подушка разрушается за счет абразивного воздействия, а наличие турбулентного потока только усиливает эффект [12].

Кроме вышеперечисленных могут также использоваться в зависимости от потребностей смазывающие пачки, пачки с повышенным содержанием детергентов, гидрофобизаторов, других поверхностно-активных веществ (ПАВ), ингибиторов и т. д. Так, смазывающие пачки применяются при бурении наклонно-направленных скважин, для облегчения ориентирования инструмента на забое при бурении в режиме слайдирования, для снижения величины крутящего момента в целом, для облегчения спуска обсадных колонн. Также смазывающие пачки могут прокачиваться при возникновении подлипания инструмента. Концентрация смазывающей добавки в пачке может достигать 5–10 %. Зачастую предполагается приготовление комбинированной пачки, например, высоковязкой или кольматационной с повышенным содержанием смазочной добавки [13]. Пачки с повышенным содержанием гидрофобизаторов и детергентов могут прокачиваться для профилактики сальникообразования при бурении интервалов активных глин. Содержание активных веществ в этих пачках может достигать 3 кг/м^3 .

Таким образом, среди перечисленных пачек можно выделить две группы по концентрации действующего вещества. К пачкам с высокой концентрацией (более 40 кг/м^3) будут относиться кольматационные пачки и пачки с повышенной плотностью (в т. ч. комбинированные с повышенной плотностью), а к пач-

кам с низкой концентрацией (менее 40 кг/м^3) – все остальные.

Приготовление и применение пачек

Пачки могут готовиться на основе используемого бурового раствора, требуемый объем которого отсекается в отдельной емкости для обработки, либо на основе свежеприготовленного раствора, когда, например, необходимо обеспечить минимальное количество твердой фазы в пачке или получить реологические свойства, значительно отличающиеся от таковых в используемом буровом растворе.

Для изменения реологических характеристик пачек на основе используемого бурового раствора прибегают к химической или физико-химической обработке. Увеличение вязкости достигается путем добавления полимеров в используемый буровой раствор, а разжижение может быть достигнуто разбавлением, например, водой, или химической обработкой. Пример использования полимер-глинистого бурового раствора (плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 45–50 с) в качестве основы для приготовления tandemной пачки:

- низковязкая пачка (объем 5 м^3 , плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 35–40 с): SAPP – 2 кг/м^3 , Праестол 2540 – $3\text{--}4 \text{ кг/м}^3$;
- высоковязкая пачка (объем 8 м^3 , плотность $1,16 \text{ г/см}^3$, условная вязкость 120–150 с): ПАЦ-В – 4 кг/м^3 .

После приготовления пачка продолжает находиться в емкости до момента ее закачки в скважину. В обозначенный момент времени пачка подается насосами из емкости в скважину. Схематическое изображение процесса прокачки высоковязкой пачки с целью очистки скважины приведено на рис. 2.

К минусам данного способа приготовления можно отнести требование наличия на буровой отдельной емкости, необходимость задействования персонала буровой установки, а также затраты времени, не позволяющие максимально оперативно произвести прокачку требуемой пачки. К преимуществам относится максимальный контроль за процессом приготовления, контроль качества полученной пачки.

Известен способ приготовления пачек непосредственно в бурильной колонне [14]. Для реализации используется специальный контейнер, способный хранить действующее вещество пачки и выпускать его при контакте с жидкостью. Данные контейнеры сбрасываются в бурильную колонну при наращивании в количестве, требуемом для приготовления необходимого объема пачки с заданной концентрацией действующего вещества. После завершения наращивания и запуска циркуляции контейнер под воздействием жидкости разрушается, а его содержимое распределяется в турбулентном потоке внутри бурильной колонны. Таким образом непосредственно в бурильной колонне формируется пачка.

Зарубежные производители используют термин «stick» для обозначения контейнера, содержащего реагент и предназначенного для подачи в скважину в процессе ее бурения или эксплуатации [15]. В рос-

сийской литературе известен термин «шашка», используемый при реализации адресной доставки реагента и обозначающий технологию, подразумевающую подачу контейнера с реагентом в скважину, находящуюся в эксплуатации [16]. С учетом уже существующей терминологии для обозначения техно-

логии доставки контейнера с реагентом в скважину в процессе бурения далее будет использоваться термин «шашка».

Схематическое изображение процесса прокачки высоковязкой пачки с использованием шашек приведено на рис. 3.

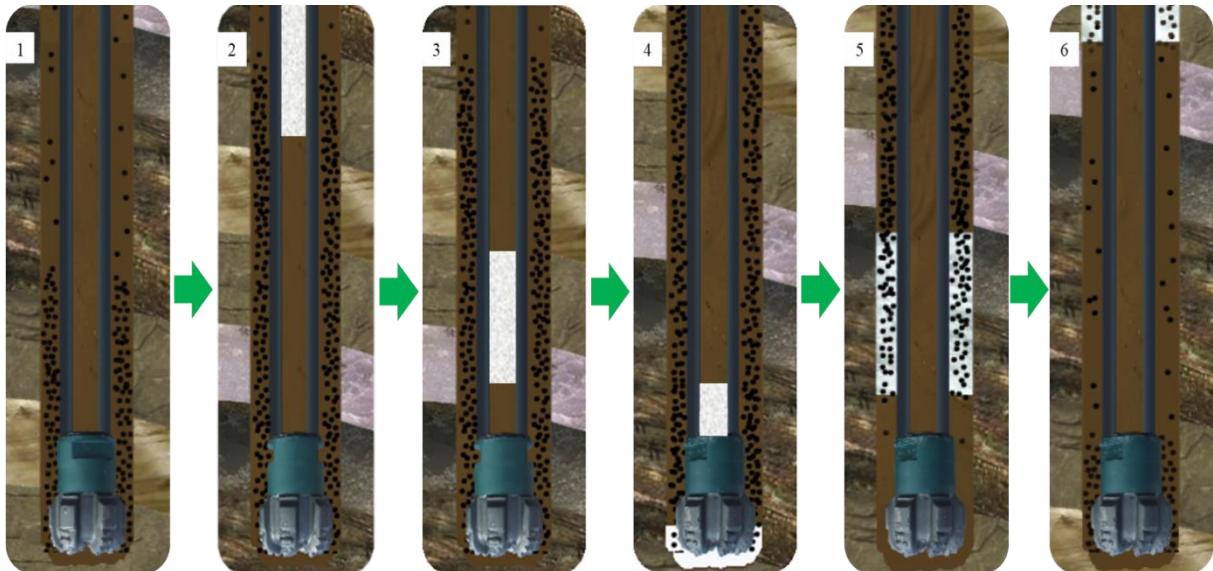


Рис. 2. Порядок прокачки высоковязкой пачки: 1) состояние скважины до прокачки пачки; 2, 3) пачка насосами подается в бурильную колонну и движется в сторону забоя; 4) пачка выходит в затрубное пространство и увлекает частицы шлама; 5, 6) пачка с частицами шлама движется к устью скважины по затрубному пространству

Fig. 2. Procedure of Hi-Vis pill pumping: 1) state of the well before pill pumping; 2, 3) the pill is fed into the drill string by pumps and moves towards the bottomhole; 4) the pill enters the annulus and entrains cuttings; 5, 6) the pill with cuttings moves to the wellhead along the annulus

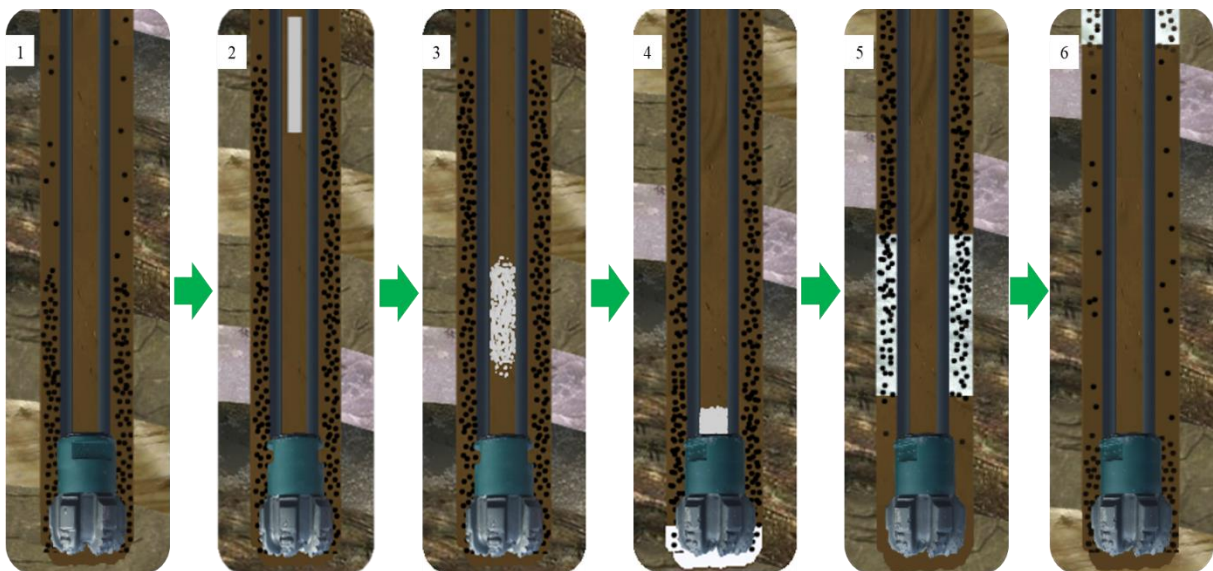


Рис. 3. Порядок формирования высоковязкой пачки при использовании шашки: 1) состояние скважины до прокачки пачки; 2) шашка подается в бурильную колонну; 3) оболочка шашки разрушается, содержимое шашки смешивается с буровым раствором и формирует пачку внутри бурильной колонны; 4) сформированная пачка выходит в затрубное пространство и увлекает частицы шлама; 5, 6) пачка с частицами шлама движется к устью скважины по затрубному пространству

Fig. 3. Procedure of Hi-Vis pill formation using a stick: 1) state of the well before pill pumping; 2) a stick is inserted into the drill string; 3) a stick shell is destroyed, stick content mixes with the drilling fluid and forms a pill inside the drill string; 4) completed pill goes into the annulus and entrains cuttings; 5, 6) a pack of cuttings particles moves to the wellhead along the annulus

Наибольшее распространение за рубежом получили шашки, содержащие:

- смазывающие добавки [17, 18];
- акриловые сополимеры (наиболее распространен частично гидролизованный полиакриламид (ЧПЛАА) [19, 20];
- ПАВ (наиболее распространен SAPP) [21, 22].

На российском рынке шашки представлены достаточно узким ассортиментом. Так, компания ООО «НЭСТ», реализующая продукцию компании M-I Swaco, имеет в своем ассортименте шашки для формирования в буровой колонне пачки на основе вязкоупругого состава (ВУС) для буровых растворов как на водной, так и на углеводородной основе [23].

В настоящее время разработкой технологий адресной доставки химических реагентов занимаются со-

трудники Томского политехнического университета, совместно с малым инновационным предприятием ООО НПО «ХОС» [24]. На данный момент производятся различные варианты шашек для применения в эксплуатируемых скважинах, а также проводятся испытания шашек для применения в процессе бурения скважин. Пример изготавливаемой продукции представлен на рис. 4. Содержимое шашки и оболочка могут быть подобраны под предполагаемые условия применения по согласованию с заказчиком. Возможно изготовление шашек как с быстрорастворимой оболочкой для наиболее быстрого высвобождения содержимого, так и с оболочкой, обеспечивающей определенную временную задержку.

Схема водорастворимой шашки производства ООО НПО «ХОС» в разрезе представлена на рис. 5.



Рис. 4. Пример продукции компании ООО Научно-производственное объединение «ХОС»

Fig. 4. LLC Scientific and production Association «OCC» product example

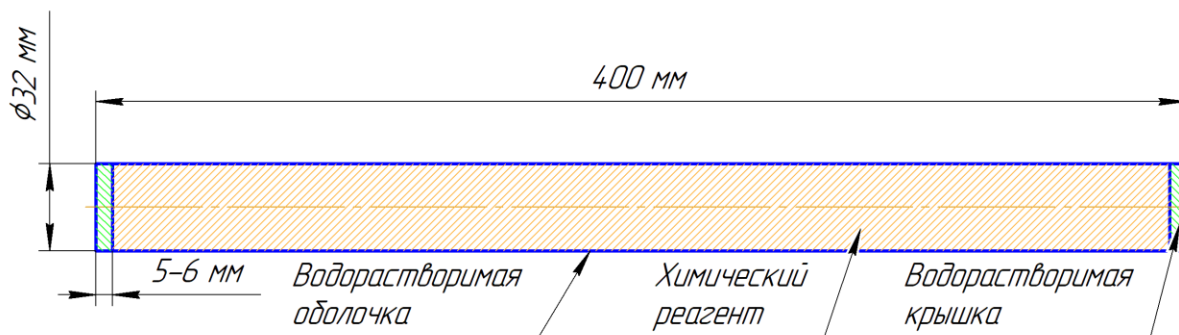


Рис. 5. Схема водорастворимой шашки в разрезе

Fig. 5. Sectional diagram of a water-soluble stick

Из проведенного анализа разновидностей шашек видно, что они предназначены для формирования пачек с низкой концентрацией действующего вещества, т. е. коалматационные пачки и пачки с повышенной плотностью не реализуются таким способом приготовления.

К преимуществам использования шашек при бурении можно отнести:

- отсутствие необходимости использования специальной техники и персонала буровой бригады для приготовления пачки;
- простота операции сбрасывания шашек в скважину, которая проводится вручную в процессе наращивания буровой колонны;
- получение необходимой концентрации реагента в пачке путем варьирования количества сбрасываемых шашек и интервалов времени между сбрасываниями;
- простота и удобство транспортировки.

Шашки не призваны заменить традиционные технологии приготовления и прокачки пачек, они выступают дополнительным инструментом при строительстве скважин. Имеющиеся данные позволяют заключить, что шашки способны обеспечить эффективность, сопоставимую с прокачкой традиционных пачек [25].

Для реализации технологии использования шашек в процессе бурения должны быть соблюдены следующие требования:

- контейнер для хранения действующего реагента (оболочка шашки) должен быть полностью водорастворим;
- время разрушения контейнера для хранения действующего реагента (оболочки шашки) при контакте с жидкостью должно быть минимальным или специально подобранным под условия применения;
- действующий реагент (содержимое шашки) должен полностью диспергироваться в жидкости без образования агломератов;
- действующий реагент (содержимое шашки) должен иметь высокую скорость растворения в жидкости, кроме случаев, когда используемый реагент представлен нерастворимым в данной жидкости веществом;
- размеры шашки должны быть подобраны таким образом, чтобы не создавалось препятствий для циркуляции жидкости.

Кроме того, ограничением возможности использования шашек с тем или иным наполнителем является время, необходимое для полного формирования пачки с момента погружения шашки в жидкость. Поскольку пачка формируется при движении внутри буровой колонны, необходимо оценить время, за которое буровой раствор достигнет КНБК. Такое ограничение вызвано необходимостью предотвратить возможное негативное влияние нерастворенных компонентов шашки на чувствительные элементы КНБК, как, например, телесистемы. В качестве примера рассмотрим следующие условия: расход бурового рас-

твора 38 л/с, длина буровой колонны 1475 м, буровой инструмент 127 мм, толщина стенки 9,19 мм. В этом случае пачка достигнет КНБК за 6 минут, что и будет являться предельным временем формирования пачки, т. е. за это время оболочка шашки должна разрушиться и полностью высвободить содержимое, а содержимое в свою очередь должно полностью раствориться или диспергироваться.

Также стоит отметить, что скорость и качество формирования пачки будет зависеть от режима течения потока жидкости в буровой колонне, который является функцией расхода жидкости, ее реологических свойств, плотности, а также геометрических размеров буровой трубы. Очевидно, что при турбулентном режиме течения жидкости будет наблюдаться более интенсивный массообмен при растворении оболочки и содержимого шашки, что приведет к более равномерному распределению реагента по поперечному сечению буровой колонны и более быстрому формированию пачки.

Оценка эффективности применения различных пачек для очистки ствола скважины обычно проводится путем непосредственного наблюдения шлама, попадающего на вибросита. Подтверждение эффективности работы пачки обычно заключается в визуальном увеличении количества шлама на ситах, однако такой подход имеет недостатки. В случае, когда после прокачки пачки на ситах не наблюдается дополнительный вынос шлама, может быть сделан ошибочный вывод, что ствол скважины чистый [26]. Такой результат чаще всего вызван неправильным подбором типа пачки, ее технологических параметров, объема и технологии прокачки. Для оптимизации подбора и технологии прокачки пачек могут быть использованы различные подходы, такие как сбор данных от специализированных датчиков непосредственно в процессе бурения [27, 28], физическое моделирование в лабораторных условиях [3, 8]. Для проведения исследования прокачки пачек с помощью шашек наиболее подходящим методом будет сбор данных непосредственно в процессе бурения, поскольку воспроизвести условия нахождения шашки в буровой колонне в лабораторных условиях представляется весьма трудоемкой задачей, которая не гарантирует получения правдоподобного результата. Таким образом, решение о возможности применения шашки должно приниматься исходя из опыта или экспертного заключения соответствующего специалиста.

Наибольшую сложность для применения в шашках представляют полимерные реагенты. Это обусловлено способностью частиц полимерных реагентов гидратироваться с образованием агломератов, также известных как «рыбий глаз». Эти агломераты характеризуются высокой прочностью гидратной оболочки, которая удерживает частицы вместе, несмотря на значительную скорость сдвига в жидкости. Также наличие гидратной оболочки значительно замедляет последующую гидратацию частиц полимера, и в случае с формированием агломератов те частицы, которые оказались заключены внутри, могут быть вовсе не гидратированы. Для нивелирования этой проблемы полимер, требуемый для использования в

шашках, должен быть переведен в легко диспергируемую форму [29, 30].

Отдельную сложность представляет собой оценка объема пачки, полученной в результате использования шашек. Предположим, что концентрация действующего вещества в пачках для достижения требуемого эффекта должна быть сопоставима, независимо от способа и места их затворения. В зависимости от типа реагента масса одной шашки может находиться в диапазоне 500–700 г. Согласно рекомендациям производителей, на одно наращивание необходимо использовать шашки в количестве как минимум 1 шт. [19], более предпочтительно 2–3 шт. [20]. Для примера рассмотрим прокачку вязко-

упругих составов, в которых концентрация дополнительно вводимого полимера составляет в среднем 4 кг/м³. В случае подачи в бурильную колонну шашек с полимером в количестве 2 шт. допустимо предположить формирование пачки объемом 0,25–0,35 м³.

В программах промывки скважин на нефть и газ средний объем ВУС составляет 8–10 м³. При этом прокачка таких пачек рекомендуется через каждые 150–200 м проходки [28].

Исходя из предположения сопоставимой эффективности технологий закачки традиционных пачек и использования шашек [25], можно сопоставить требуемый расход реагентов (таблица).

Таблица. Расход реагента при использовании традиционной технологии прокачки пачек и технологии использования шашек

Table. Reagent consumption for traditional pill pumping and stick usage

Параметр/технология Parameter/technology	Традиционная прокачка пачек Traditional pill pumping	Прокачка пачек при помощи шашек Pill pumping using sticks
Интервал бурения, м Drilling interval, m	200	
Число наращиваний (при длине свечи 18,5 м) Number of connections for drilling interval (drillpipe stand 18,5 m)	10	
Порядок применения Implementation procedure	Единовременная закачка пачки объемом 8 м ³ One-time pumping of a pill of 8 m ³	Сброс в бурильную колонну 2 шт. шашек при наращивании, итого 20 шт. шашек Inserting into a drill string 2 pcs. sticks while making a connection, total 20 pcs. sticks
Затрачиваемое количество реагентов, кг Consumed amount of reagents, kg	32	10–14 (в зависимости от массы шашки/depending on stick weight)
Удельный расход реагентов на метр бурения, кг/м Specific consumption of reagents per meter of drilling, kg/m	0,16	0,05–0,07

Заключение

Пачки, как технологические жидкости, используемые при бурении скважин, имеют сравнительно слабую изученность, которая проявляется в небольшом количестве посвященных им публикаций.

Для приготовления пачек может быть использована технология шашек, которая позволяет затворять многие рецептуры пачек прямо в бурильной колонне, за исключением пачек, содержащих повышенное количество вносимых компонентов – от 40 кг/м³, и пачек, применение которых подразумевает установку точного объема жидкости в заданном интервале. Таким образом, согласно выделенной классификации, наиболее подходящие области применения шашек – пачки для очистки ствола скважины и пачки с повышенным содержанием смазывающих добавок, ингибиторов, ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин С.А., Спиридонов П.Ю. Исследование влияния концентрации смазывающей добавки в рецептуре бурового раствора на коэффициенты трения // Ашировские чтения. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. – С. 88–97.
2. Rad M.S.K., Mohammadi M.K., Nowtarki K.T. Investigating hole-cleaning fibers' mechanism to improve carrying cutting capacity and comparing their effectiveness with common polymeric pills // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 9–12, 2020. – 10 p.
3. Experimental study of effective hole cleaning using «sweeps» in horizontal wellbores / S.G. Valluri, S.Z. Miska, M. Yu, R.M. Ahmed, N. Takach // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006. – 13 p.

Технология шашек отличается не только большим удобством применения, но и экономической целесообразностью, проявляющейся в меньшей потребности в реагентах на метр бурения, позволяя использовать на 40–70 % меньше реагентов для приготовления пачек.

К недостаткам технологии шашек относятся: слабый контроль объемов получаемых пачек; слабый контроль концентрации действующего вещества в получаемой пачке; зависимость качества затворения пачки от режима течения бурового раствора в бурильных трубах; возможность получения пачки только на основе циркулирующего бурового раствора.

Шашки не могут полностью заменить традиционную технологию приготовления и использования пачек и должны рассматриваться как ситуативная альтернатива.

4. Heavy-duty cleanup: caesium formate-based microemulsions make light work of a tough job / L.P. Moroni, M. Davidson, J. Lam, A. Goonoo, J. Twycross, S.K. Howard // Offshore Technology Conference Asia. – Kuala Lumpur, Malaysia, March 22–25, 2016. – 11 p.
5. Mi Swaco. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов. Редакция 2.1. – М.: Mi Swaco, 2009. – 1000 с.
6. Программа приготовления бурового раствора для резки бокового ствола в скважине № 1273 Уренгойского месторождения / Е.А. Холопов, С.И. Шиян, С.В. Мусийченко, Н.С. Моргунов // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). – 2020. – № 2. – С. 267–278.
7. Доброчасов А.И., Попова Ж.С., Саломатов В.А. Технические решения по повышению эффективности бурения боковых горизонтальных стволов на месторождениях

- Западной Сибири // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 3. – С. 76–82.
8. Hole cleaning efficiency of sweeping pills in horizontal wells – facts or philosophy? / O. Czuprat, A.M. Faugstad, P. Byrski, K. Schulze // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, October 21, 2020. – 28 p.
 9. Hemphill T. A comparison of high-viscosity and high- sweeps as hole cleaning tools: Separating fact from fiction // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Florence, Italy, September 19–22, 2010. – 8 p.
 10. Exceeding technical limit for drilling and completing complex wells by using an optimized flat-rheology mud formulation: a comprehensive overview / A.A. Alomair, H.F. Cuellar, M. Kashwaa, S. Sharma // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. – Abu Dhabi, UAE, May 25–27, 2021. – 12 p.
 11. Горпинченко В.А., Дильмиев М.Р. Применение синтетического полимерного волокна для увеличения эффективности выноса шлама при бурении долотами PDC // Бурение & Нефть. – 2010. – № 6. – С. 6–8.
 12. Bulgachev R.V., Pouget P. New experience in monofilament fiber tandem sweeps hole cleaning performance on Kharyaga oilfield, Timan-Pechora Region of Russia // SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, October 3–6, 2006. – 12 p.
 13. Корунов И.Д., Пономарёв С.А. Регулирование параметров бурового раствора для снижения риска прихвата на месторождениях Балыкской группы // Молодой ученый. – 2020. – № 6 (296). – С. 78–80.
 14. Product and method for treating well bores: patent 6655475 B1 USA. Fil. 11.09.2001; Publ. 12.02.2002.
 15. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick // Schlumberger. 2017. URL: <https://www.slb.com/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/drilling-fluids/drilling-fluid-additives/viscosifiers/rapid-sweep-water-soluble-polymer-stick> (дата обращения: 28.09.2022).
 16. Способ удаления жидкости из газовых и газоконденсатных скважин: пат. Рос. Федерация, № 2317412, заявл. 05.10.2016; опубл. 30.01.2018. Бюл. № 4. – 8 с.
 17. Drill Bit Stick // Select Industries. 2022. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Drill-Bit-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 18. HHL – Horizontal Hole Lubricants // Hydro Foam Technology. 2022. URL: <https://www.hydrofoamtechnology.com/products/hhl-horizontal-hole-lubricants> (дата обращения 29.09.2022).
 19. Product Sheet. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick // Schlumberger. 2017. URL: <https://www.slb.com/media/files/product-sheet/rapid-sweep-ps.ashx> (дата обращения 29.09.2022).
 20. Product Data Sheet. Poly-Drill Stick // Select Industries. 2021. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Poly-Drill-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 21. Product Data Sheet. SAPP Stick // Select Industries. 2021. URL: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/SAPP-Stick.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
 22. Drilling Sticks // Varichem International. 2022. URL: <http://www.varichemusa.com/products.php?title=Drilling%20Sticks> (дата обращения 29.09.2022).
 23. Вязко упругий состав EASY CLEAN // ООО «СК НЭСТ». 2022. URL: https://nest78.ru/vyazko-uprugiy-sostav-easy-clean/?sphrase_id=1154 (дата обращения 29.09.2022).
 24. Продукция ООО НПО ХОС // ООО НПО ХОС. 2022. URL: <http://npohos.ru/catalog/> (дата обращения 09.10.2022).
 25. Integrated drilling optimization approach delivers excellent results to improve drilling efficiency in remote artificial island / P. Paila, C. Kirby, N. Diaz, A. Aboulkheir, D. Mahmoud, R. Al Kindi, Y. Kasem, M. Benygzer, R. Moreira, M. Cesetti, R. Singh // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. – 17 p.
 26. Александров С.С., Лагуманов М.Г. Регулирование очистки скважины в процессе бурения // Бурение & нефть. – 2013. – № 2. – С. 34–36.
 27. Unique acoustic telemetry network with distributed pressure measurement nodes enables accurate real-time analysis of sweep effectiveness / M. Reeves, D.G. Smith, D. Groves, A. Brehm, S.A. Rovira, K. Armagost // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – New Orleans, Louisiana, USA, September 30 – Oct. 2, 2013. – 20 p.
 28. Real time monitoring of hole cleaning on a deep water extend well / A.L. Martins, M.B. Villas-Boas, H.S. Taira, A.F. Aragao, R.A.F. Amorim, Y.D. Galeano, A. Bove, A.T.A. Waldmann // SPE/IADC Drilling Conference. – Amsterdam, The Netherlands, February 19–21, 2003. – 7 p.
 29. Королев А.С., Минаев К.М. Исследование полимерных реагентов в суспензионной форме для буровых растворов // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. В 2 т. – Томск, 6–10 апреля 2020. – Томск: Изд-во ТПУ, 2020. – Т. 2. – С. 403–404.
 30. Королев А.С., Минаев К.М. Полимерные суспензии для эффективного бурения // Деловой журнал Neftegaz.ru. – 2021. – № 1 (109). – С. 84–88.

Поступила 18.10.2022 г.

Прошла рецензирование 17.11.2022 г.

Информация об авторах

Королев А.С., аспирант, ассистент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Минаев К.М., кандидат химических наук, директор центра «Научно-образовательный центр нефтегазовой химии и технологии», доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сагитов Р.Р., инженер центра «Научно-образовательный центр нефтегазовой химии и технологии» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 622.24.06

ANALYSIS OF AN ALTERNATIVE TECHNOLOGY FOR PREPARING AND APPLYING PILLS IN WELL DRILLING

Alexey S. Korolev¹,
korolev2818@gmail.com

Konstantin M. Minaev¹,
minaevkm@tpu.ru

Rashid R. Sagitov¹,
Sagitov_r@bk.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. *Drilling engineers often use various types of pills that perform a variety of functions in well drilling, such as preventing different fluids in the well from contact, cleaning the wellbore, reducing friction forces, and eliminating drilling problems. In the vast majority of cases, only one method of preparing such liquids is used – advance preparation of pills in mud tanks, followed by pumping them in the well. The main disadvantages of this method are low manufacturability, the need to attract an additional fleet of tanks and increased consumption of reagents. Taking into account the widespread use of pill pumping technology during drilling, even minor optimization will reduce the cost of these operations. Weak publication activity on this topic necessitates more active study and coverage in the scientific and educational literature of traditional and alternative technologies for preparation and use of pills in well drilling.*

The main aim of the research is to consider the technology of sticks usage for pills preparation when drilling wells and to highlight the scope and limitations of this technology.

The object: sticks for pills preparation in well drilling.

Methods: analysis of pills varieties used in well drilling to highlight the requirements for their use and preparation, analysis and evaluation of traditional technology for pills preparation, analysis and evaluation of alternative technology for pills preparation using sticks.

Results. The authors identified the main types of pills used in well drilling, highlighted the advantages and disadvantages of stick usage for pills preparation, as well as their application areas according to the limitations.

Key words:

drilling mud, well cleaning, spacer pill, lost circulation pill, pill with a high content of lubricant, sweeping pill, fiber pill, stick.

REFERENCES

- Sorokin S.A., Spiridonov P.Yu. Issledovanie vliyaniya kontsentratsii smazyvayushchey dobavki v retsepture burovogo rastvora na koeffitsienty treniya [Investigation of the influence of the lubricant additive concentration in the drilling fluid formulation on friction coefficients]. *Ashirovskie chteniya* [Readings name of K.B. Ashirov]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2018. pp. 88–97.
- Rad M.S.K., Mohammadi M.K., Nowtarki K.T. Investigating hole-cleaning fibers' mechanism to improve carrying cutting capacity and comparing their effectiveness with common polymeric pills. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 9–12, 2020. 10 p.
- Valluri S.G., Miska S.Z., Yu M., Ahmed R.M., Takach N. Experimental study of effective hole cleaning using «sweeps» in horizontal wellbores. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006. 13 p.
- Moroni L.P., Davidson M., Lam J., Goonoo A., Twycross J., Howard S.K. Heavy-duty cleanup: caesium formate-based micro-emulsions make light work of a tough job. *Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, March 22–25, 2016. 11 p.
- Mi Swaco. *Rukovodstvo po burovym rastvoram dlya inzhenerov-tekhnologov*. Redaktsiya 2.1. [A guide to drilling fluids for process engineers. Edition 2.1.]. Moscow, Mi Swaco Publ., 2009. 1000 p.
- Kholopov E.A., Shiyon S.I., Musyichenko S.V., Morgun N.S. Drilling fluid preparation program for sidetracking in well № 1273 of the Urengoyevskoye Field. *Science. Technique. Technologies (Polytechnical bulletin)*, 2020, no. 2, pp. 267–278. In Rus.
- Dobrochasov A.I., Popova Zh.S., Salomatov V.A. Technical and technological solutions to increase the efficiency of drilling lateral horizontal trunks in the fields of Western Siberia. *Readings name of A.I. Bulatov*, 2017, vol. 3, pp. 76–82. In Rus.
- Czuprat O., Faugstad A.M., Byrski P., Schulze K. Hole cleaning efficiency of sweeping pills in horizontal wells – facts or philosophy? *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, October 21, 2020. 28 p.
- Hemphill T. A comparison of high-viscosity and high-density sweeps as hole cleaning tools: Separating fact from fiction. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, September 19–22, 2010. 8 p.
- Alomair A.A., Cuellar H.F., Kashwaa M., Sharma S. Exceeding technical limit for drilling and completing complex wells by using an optimized flat-rheology mud formulation: a comprehensive overview. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, UAE, May 25–27, 2021. 12 p.
- Gorpinchenko V.A., Dilmiev M.R. Using of synthetic polymeric fiber to increase efficiency of cuttings lifting during drilling with PDC Bits. *Drilling & Oil*, 2010, no. 6, pp. 6–8. In Rus.
- Bulgachev R.V., Pouget P. New experience in monofilament fiber tandem sweeps hole cleaning performance on Kharyaga Oilfield, Timan-Pechora Region of Russia. *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, October 3–6, 2006. 12 p.
- Korunov I.D., Ponomaryov S.A. Regulirovanie parametrov burovogo rastvora dlya snizheniya riska prikhvata na mestorozhdeniyakh Balykskoy gruppy [Regulation of drilling fluid parameters to reduce the risk of sticking in the fields of the Balyk group]. *Molodoy ucheny*, 2020, no. 6 (296), pp. 78–80.
- Wald H. L. *Product and method for treating well bores*. Patent 6655475B1 USA, 2002.
- Rapid sweep. Water-soluble polymer stick*. 2017. Available at: <https://www.slb.com/drilling/drilling-fluids-and-well-cementing/drilling-fluids/drilling-fluid-additives/viscosifiers/rapid-sweep-water-soluble-polymer-stick> (accessed: 28 September 2022).
- Rumyantseva E.A., Strizhnev K.V., Akimov N.I., Lysenko T.M., Volkov V.A. *Sposob udaleniya zhidkosti iz skvazhiny* [Method for removing fluid from a well]. Patent RF, no. 2317412, 2018.
- Drill Bit Stick*. 2022. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Drill-Bit-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).

18. *HHL – Horizontal Hole Lubricants*. 2022. Available at: <https://www.hydrifotech.com/products/hhl-horizontal-hole-lubricants> (accessed: 29 September 2022).
19. *Product Sheet. Rapid sweep. Water-soluble polymer stick*. 2017. Available at: <https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-sheet/rapid-sweep-ps.ashx> (accessed: 29 September 2022).
20. *Product Data Sheet. Poly-Drill Stick*. 2021. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/Poly-Drill-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).
21. *Product Data Sheet. SAPP Stick*. 2021. Available at: <https://selectindustries.com/wp-content/uploads/2021/12/SAPP-Stick.pdf> (accessed: 29 September 2022).
22. *Drilling Sticks*. 2022. Available at: <http://www.varichemusa.com/products.php?title=Drilling%20Sticks> (accessed: 29 September 2022).
23. *Visco-elastic compound EASY CLEAN*. 2022. Available at: https://nest78.ru/vyazko-uprugiy-sostav-easy-clean/?sphrase_id=1154 (accessed: 29 September 2022).
24. *Products of LLC NPO HOS*. 2022. Available at: <http://npohos.ru/catalog/> (accessed: 10 October 2022).
25. Paila P., Kirby C., Diaz N., Aboukheir A., Mahmoud D., Al Kindi R., Kasem Y., Benygzer M., Moreira R., Cesetti M., Singh R. Integrated drilling optimization approach delivers excellent results to improve drilling efficiency in remote artificial island. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, UAE, November 12–15, 2018. 17 p.
26. Aleksandrov S.S., Lugumanov M.G. Regime regulating of well clean-up during drilling. *Drilling & Oil*, 2013, no. 2, pp. 34–36. In Rus.
27. Reeves M., Smith D.G., Groves D., Brehm A., Rovira S.A., Armagost K. Unique acoustic telemetry network with distributed pressure measurement nodes enables accurate real-time analysis of sweep effectiveness. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, September 30 – October 2, 2013. 20 p.
28. Martins A.L., Villas-Boas M.B., Taira H.S., Aragao A.F., Amorim R.A.F., Galeano Y.D., Bove A., Waldmann A.T.A. Real time monitoring of hole cleaning on a deepwater extend well. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, February 19–21, 2003. 7 p.
29. Korolev A.S., Minaev K.M. Issledovanie polimernykh reagentov v suspenzionnoy forme dlya burovykh rastvorov [Study of polymeric reagents in suspension form for drilling fluids]. *Problemy geologii i osvoeniya neдр. XXIV Mezhdunarodny simpozium imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh* [Problems of geology and subsoil development. XXIV International Symposium named after academician M.A. Usov for students and young scientists]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2020. pp. 403–404.
30. Korolev A.S., Minaev K.M. Polimernye suspenzii dlya effektivnogo bureniya [Polymer suspensions for efficient drilling]. *De-lovoy zhurnal Neftegaz.ru*, 2021, no. 1 (109), pp. 84–88.

*Received: 18 October 2022.
Reviewed 17 November 2022.*

Information about the authors

Alexey S. Korolev, post-graduate student, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Konstantin M. Minaev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Rashid R. Sagitov, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.