

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.276.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77>

## Режимные параметры при отработке технологии бурения скважин саморазрушающейся пеной на основе «Композита СП»

© В.Г. Заливин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

**Резюме:** Цель данной статьи – исследовать параметры режима бурения скважин с очисткой забоя саморазрушающейся пеной по замкнутому циркуляционному циклу. В ходе работы сделан обзор и проведен анализ основных технико-экономических показателей бурения при использовании пены в качестве очистного агента в различных геологических условиях. Методика выбора твердосплавного колонкового породоразрушающего инструмента и режимных параметров его отработки при промывке забоя пеной такая же, как и при бурении на буровом растворе. В качестве определяющего показателя процесса бурения используется необходимость достижения максимальной механической скорости для конкретных горно-геологических условий. В результате обоснованы параметры режимов бурения для бескернового, твердосплавного и алмазного способов бурения пеной и произведена компоновка бурового оборудования. Разработаны рекомендации по эффективной и рациональной эксплуатации технологии и технических средств бурения с пеной, и показано их отличие от бурения скважин на промывочной жидкости. Приведены технологические ситуации, возможные осложнения и особенности бурения с пеной в осложненных условиях. Рекомендованы для различных условий бурения с пеной меры предупреждения возникновения аварий. Обосновано количество повторных циклов использования первоначально приготовленного раствора композита саморазрушающейся пены заданной концентрации. Применение саморазрушающейся пены при бурении скважин по рекомендованной технологии значительно увеличивает проходку на долото, механическую скорость бурения, способствует предупреждению ряда осложнений в процессе строительства скважин и снижает стоимость каждого метра бурения. При этом не происходит загрязнение устья скважины, что улучшает экологическую обстановку процесса бурения.

**Ключевые слова:** пена саморазрушающаяся, параметры режимов бурения, бурение пеной в осложненных условиях, рекомендации по эффективной эксплуатации, замкнутый цикл циркуляции, обвязка оборудования для получения пен, пеногенераторы, бустеры, компрессоры, дозирующие устройства

**Информация о статье:** Дата поступления 18 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 4 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

**Для цитирования:** Заливин В.Г. Режимные параметры при отработке технологии бурения скважин саморазрушающейся пеной на основе «Композита СП». *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42, № 1. С. 64–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77.

## Mode parameters when using the technology of drilling wells with self-destructive foam "Composite SDF"

© Vladimir G. Zalivin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract:** The purpose of this article is to study the parameters of the well drilling mode with closed-circuit bottom-hole cleaning by the self-destructive foam. The study involves the review and analysis of the main technical and economic indicators of drilling when using foam as a cleaning agent under various geological conditions. The method of selecting a hard-alloy core-rock-breaking tool and its operating parameters when washing the bottomhole with foam is similar to the one used at drilling with the drilling mud. The need to achieve the maximum mechanical speed for specific mining and geological conditions is used as a key indicator of the drilling process. As a result, the justification is given to the regime parameters of coreless, hard-alloy, and diamond foam drilling and the drilling

equipment is assembled. Recommendations have been developed for the efficient and rational use of the technology and technical tools for foam drilling. Their difference from the well drilling with flushing fluid is shown. The technological situations, possible complications and features of foam drilling in complicated conditions are described. Accident prevention measures are developed for various foam drilling conditions. The number of repeated cycles of using the originally prepared composite solution of a self-destructive foam with given concentration is substantiated. The use of the self-destructive foam when drilling wells by the recommended technology significantly increases the advance per bit, mechanical speed of drilling, helps to prevent a number of complications under well construction, as well as reduces the cost of each meter of drilling. Moreover, mud does not accumulate in the wellhead, which improves the environment setting of the drilling process.

**Keywords:** self-destructive foam, drilling mode parameters, foam drilling in complicated conditions, recommendations on effective operation, closed-circuit circulation cycle, piping of foam producing equipment, foam generators, boosters, compressors, metering devices

**Information about the article:** Received December 18, 2018; accepted for publication March 4, 2019; available online March 28, 2019.

**For citation:** Zalivin V.G. Mode parameters when using the technology of drilling wells with self-destructive foam "Composite SDF". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 64–77. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77.

### Введение

В проведенных ранее исследованиях [1, 2] разработаны составы саморазрушающихся пен для бурения по замкнутому циркуляционному циклу на основе «Композита СП». Эти составы рекомендуется использовать для прохождения осыпающихся пород, например филлитов, глинистых мергелей, высокоглинистых алевролитов, аргиллитов и глинистых невысокой влажности рыхлых песков.

Из-за малых весовых расходов пен в процессе бурения и низкой теплоемкости пена имеет небольшой запас тепла и может эффективно применяться при бурении многолетнемерзлых пород, не растепляя стенки скважины. Для снижения температуры замерзания пены и сохранения свойств при низких температурах в пенообразующий раствор добавляют NaCl, CaCl<sub>2</sub> (до 10 %-й концентрации).

Для улучшения свойств пены применимо использование реагентов-стабилизаторов и структурообразователей (органические полимеры и глины), регуляторов величины pH и смягчителей воды (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), понизителей гидравлических сопротивлений (додециловый спирт) и пенообразователей – сульфанола, сульфаната, пенола, ОП-7, ОП-10.

Управление бурением с очисткой забоя композитом осуществляется аналогично буровому раствору, но осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент принимается несколько ниже, а максимальная частота вращения бурового инструмента ограничивается 600 мин<sup>-1</sup>. Рекомендуемые параметры режима бурения с применением газожидкостных смесей для схемы с компрессором низкого давления приведены в табл. 1.

### Методы исследования

Методика выбора породоразрушающего инструмента и режимных параметров его обработки при промывке забоя пеной заключалась в обработке фактического материала непосредственно при бурении производственных скважин.

### Результаты исследований

**Бурение сплошным забоем.** При бурении сплошным забоем с промывкой пеной в качестве породоразрушающего инструмента следует отдавать предпочтение двухшарошечным долотам при бурении до 1200 м, так как они обеспечивают наиболее эффективные условия очистки призабойной зоны от шлама и создание необходимых осевых нагрузок. Для интенсификации очистки и улучшения пенообразования в призабойной зоне эти

Таблица 1

Рекомендуемые параметры режима бурения

Table 1

Recommended drilling mode parameters

Тип породоразрушающего инструмента	Диаметр, мм	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Осевая нагрузка, даН	Расход пенообразующего состава, дм <sup>3</sup> /мин	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	Давление нагнетания компрессора, МПа	Расчетная производительность дожимного насоса, дм <sup>3</sup> /мин
Шарошечные долота (типа К, ДДА)	112–93	118–254	1500–2000	5–6	0,3–0,5	0,5–0,6	120
	76		1000–1500			0,6	70
Твердосплавные коронки	76	254–480	300–1000	5–10	0,5	0,5–0,6	120
	59		300–800		0,4	0,6	70
Алмазные коронки	76	480–600	1000–1500	10–15	0,3–0,4	0,4–0,5	120
	59		600–1000	5–10	0,2–0,4	0,3–0,4	70

долота желательно оснащать центральными промывочными патрубками с круглым или щелевым выходным отверстием [3].

В компоновку бурового снаряда входят: долото, обратный клапан, расширитель, утяжеленная бурильная труба (при диаметре бурения 93 мм и выше) или жесткий направляющий снаряд (при диаметре 59 и 76 мм), а также один-два обратных клапана в колонне бурильных труб (в зависимости от глубины бурения).

Следует иметь ввиду, что при восстановлении циркуляции пены (при пуске дожимных камер) давление в нагнетательной линии может превысить рабочее в 1,2–1,5 раза.

Также может наблюдаться повышенный износ опор применяемых шарошечных долот при увеличении стойкости их вооружения. Однако в конечном счете

основные технико-экономические показатели бурения могут быть выше, чем при промывке с буровым раствором: по проходке на долото – в среднем на 20–50 % и по механической скорости бурения – на 40–60 %.

*Твердосплавное бурение с пеной.* Методика выбора твердосплавного колонкового породоразрушающего инструмента и режимных параметров его обработки при промывке забоя пеной такая же, как и при бурении на буровом растворе, и в качестве определяющего показателя процесса бурения используется необходимость достижения максимальной механической скорости для конкретных горно-геологических условий.

В общем случае тип и марка твердосплавных коронок выбираются в соответствии с категорией буримости разбуриваемой породы по табл. 2 [4].

Таблица 2

Выбор типа буровых коронок

Table 2

Selection of the drilling bit type

Категория буримости	I–IV, частично V	IV–VI, частично VII	VI–VII, частично VIII–IX
Тип коронок	Ребристые	Резцовые	Самозатачивающиеся
Марка коронок	M1, M2, M5	CM5, CT2	CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CM4, CM5, CM6

Значения режимных параметров при разработке технологии твердосплавного бурения с промывкой пеной с использованием дожимных устройств в зависимости от диаметра коронок приведены в табл. 3.

Высокие нагрузки в сочетании с уменьшенной частотой вращения следует применять при разбуривании пород повышенной категории буримости, и наоборот. На самозатачивающиеся коронки нагрузку следует создавать больше, чем на ребристые и мелкорезцовые.

*Алмазное бурение с пеной.* Значительный отечественный опыт бурения алмазным породоразрушающим инструментом [5] с очисткой забоя пеной, получаемой с помощью поверхностных пеногенераторов и компрессорно-дожимных устройств, может служить основой при разработке технологии и областей рационального и эффективного применения композита в качестве пенообразующей композиции при алмазном бурении.

В качестве исходных значений режимных параметров при отработке технологии широкого использования композита с учетом его свойств и технологических особенностей получения можно принять значения, характерные для различных регионов страны со сходными геолого-техническими условиями (табл. 4).

Давление нагнетания пены при бурении скважин глубиной до 500–600 м алмазными коронками типа 01А3, 01А4 может достигать 2–2,5 МПа, а при водопритоках – подниматься и до 3–3,5 МПа, что резко увеличивает возможность прижога коронки.

Из-за повышения гидростатического давления в кольцевом пространстве часть пены может вдавливаться в трещины, создавая зоны повышенного избыточного давления, в результате чего при подъеме бурового снаряда возникает довольно длительное фонтанирование порядка 30–40 мин.

Углубку скважины алмазной коронкой следует начинать при пониженном расходе пенообразующего раствора и высоких степенях аэрации.

При бурении монолитных и слабо трещиноватых пород степень аэрации необходимо поддерживать в пределах 50–150, а в трещиноватых, многолетне-мерзлых породах, зонах поглощения и слабых водопритоков – 100–200 и более.

Особенности теплового режима при работе серийного алмазного инструмента накладывают определение ограничения на широкое использование пены как очистного агента при алмазном бурении.

Для уменьшения отрицательного воздействия температурного фактора в

Таблица 3

**Режимные параметры при разработке технологии твердосплавного бурения с промывкой пеной**

Table 3

**Regime parameters in the development of the technology of hard-alloy drilling with foam washing**

Диаметр коронок, мм	Осевая нагрузка, тс	Частота вращения, об./мин	Расход пенообразующего раствора, л/мин	Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	Степень аэрации	Допустимая подача дожимного насоса, л/мин
93	1,2–1,8	250–300	10–12	0,5–0,6	50	120–130
76	0,8–1,5	350–380	3–10	0,4–0,5	50	90–110
59	0,6–1,0	400–480	6–8	0,3–0,4	50	50–70

Таблица 4

Возможные исходные значения режимных параметров  
при отработке технологии применения «Композита СП» при алмазном бурении

Table 4

Possible initial values of regime parameters when using  
the "Composite SDF" technology at diamond drilling

Диаметр бурения, мм	Тип пород (категория буримости)	Тип колонкового набора	Марка алмазной коронки	Исходные режимные параметры				
				Осевая нагрузка, кг·с	Частота вращения, об/мин	Расход пенообразования раствора, л/мин	Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	Степень аэрации
76	Брекчии на кварцевом цементе (IX)	Одинарный	АКМ	1000–1200	360	8–10	1,1–1,5	138–150
	01АЗ, АЧДП		800–1400	140–250	8–12	1,5–1,8	190–150	
	Метаморфизованные алевролиты, кварциты (VIII–X1)	ТДН-0, ТДН-2	16ИЧ, КДТ	1200–1800	140–230	6–12	1,5–1,8	250–150
	Трещиноватые породы, зоны поглощений (VIII–X)	Одинарный	01АЗ, 02ИЗ, КСАВ	800–2000	190–480	15–20	2–2,5	133–125
	Многолетне-мерзлые породы (VIII–IX)		ССК-76	17АЧ, К-16	1300–1900	300–500	16–20	1,5–2
59	Трещиноватые породы, склонные к поглощению (VIII–X)	Одинарный	01АЗ, 01А4, 02ИЗ, 02И4	800–2000	150–300	5–16	1,5–2	300–125
			АЧДП, ИЧДП	500–3000	340–800	6–15	1,8–2	300–133
			АЧДП, 02ИЗ	900–1200	300–500	10–15	1–1,5	100
	Многолетне-мерзлые породы (IX–X1)	ССК-59	К-01, К-02	700–1000	500–800	10–12	0,7–1,1	70–90

зоне контакта коронки с забоем на исходные свойства пены и в целом на процесс бурения при выборе алмазных коронок следует руководствоваться следующим:

– в монолитных и слаботрещиноватых породах VIII–X категорий по буримости использовать серийные однослойные коронки с зернистостью объемных алмазов 50–60 шт. на коронку и насыщенностью на уровне коронок АЧДП;

– в породах X–XII категорий использовать импрегнированный инструмент с зернистостью алмазов 200–400 шт. на коронку и массовым содержанием около 12 карат (как у коронок ИЧДП);

– в случае необходимости увеличить площадь промывочных окон коронок.

Для нормального процесса бурения характерны следующие признаки:

– постепенный рост давления нагнетания пены (по мере заполнения колонковой трубы керном);

– равномерный (без всплесков) выход пены на устье скважины;

– стабильный характер записи затрат мощности.

Увеличение этих параметров и снижение механической скорости проходки указывает на начало интенсивного износа алмазной коронки и выхода ее из строя.

Общие закономерности возникновения и развития критических ситуаций при использовании пены в качестве очистного агента практически полностью соответствуют таковым, возникающим при бурении с водой, но характеризуются быстротой развития.

*Определение возможного количества повторных циклов использования первоначально приготовленного раствора композита заданной концентрации.* Перед началом бурения приготавливают необходимое количество водного раствора композита заданной концентрации.

Спускают в скважину буровой снаряд и устанавливают, не доходя до забоя.

Включают дозировочный насос и пеногенераторную установку (компрессор, дожимное устройство).

Включают вращение бурового снаряда без нагрузки на забой, и после восстановления нормальной циркуляции и регулирования однородности выходящего из скважины потока пены определяют ее кратность и период полураспада без выбуренной породы.

После постановки снаряда на забой и подбора приемлемых режимных параметров бурения и нагнетания пены начинают углубку скважины. При начале выноса пеной шлама замеряют ее параметры, регулируя их подачей пенообразующего раствора и сжатого воздуха и поддерживая нормальный процесс

бурения с замкнутым циклом циркуляции.

В специальном журнале регистрируют:

– первоначальный объем пенообразующего раствора  $V_{пор}$ , м<sup>3</sup>;

– объемный расход пенообразующего раствора  $Q_{пор}$ , м<sup>3</sup>/мин;

– время работы пеногенераторной установки  $T_{пгу}$ , мин.

Количество повторных циклов использования первоначально приготовленного объема раствора композита заданной концентрации можно определить по формуле:

$$N = Q_{пор} \cdot T_{пгу} / V_{пор}.$$

*Дополнительные технологические операции и мероприятия при бурении с пенами на основе композита.* Приготовление пенообразующего состава повышенной или необходимой концентрации, определяемой для каждого конкретного случая, производится централизованно на базе бурового подразделения или в крайнем случае непосредственно на буровой.

Массовый расход композита  $G_k$ , кг, плотностью  $\rho_k$ , кг/м<sup>3</sup>, при условии 100 %-го содержания активного вещества в концентрате для приготовления 1 м<sup>3</sup> пенообразующего раствора требуемой концентрации  $C_{тр}$ , %, определяется по формуле:

$$G_k = 0,01 \cdot \rho_k \cdot C_{тр}.$$

Для приготовления рабочей концентрации (от 0,25 до 1 %) композита  $C_{раб}$  из определенного объема концентрированного его раствора  $V_k$  с концентрацией  $C_k$  потребуется объем воды  $V_v$ , м<sup>3</sup>:

$$V_v = C_k \cdot V_k / C_{раб}.$$

Подготовка всего комплекса применяемого оборудования заключается:

– тщательной проверкой его состояния и работоспособности;

– регулированием обратного клапана компрессора на требуемое давление нагнетания;

– регулированием подачи пенообразователя сбросовым вентилем на дозировочном насосе, уменьшением числа

ходов или отключением части плунжеров.

Для восстановления циркуляции (после спуска снаряда в скважину, включения компрессора, дозировочного и бурового насосов с дожимным устройством) в зависимости от глубины скважины и рабочего давления нагнетания требуется в пределах 10–90 мин.

Прекращение роста и пульсации давления нагнетания свидетельствует о восстановлении циркуляции и выходе пены из-под торца породоразрушающего инструмента. Можно начинать бурение.

Во всех случаях для эффективного и безаварийного бурения необходимо добиваться выхода на устье достаточно однородного потока пены и низкого уровня его пульсации.

Перед очередным наращиванием снаряда:

- в течение 5–10 мин осуществляют промывку скважины до появления пены, свободной от шлама;
- выключают дозировочный и дожимной насосы, компрессор;
- воздушную магистраль переключают на сброс;
- открывают вентиль на нагнетательной линии.

После уравнивания давления в поверхностной обвязке с атмосферным производят наращивание.

Перед подъемом снаряда после окончания рейса с целью исключения зашламования призабойной зоны и возникновения возможных осложнений скважина также промывается пеной до полного выноса из скважины выбуренного шлама. Для этого в зависимости от диаметра и глубины бурения может потребоваться 20–60 мин, но это необходимо делать.

Обратные клапаны, находящиеся под давлением, открывают только с помощью специального переходника. Остановка оборудования производится так же, как и при наращивании.

При работе с комплексами ССК и КССК (комплексы технических средств со съемными керноприемниками) при бурении по трещиноватым породам перед наращиванием и подъемом снаряда для сокращения времени на сброс давления пены в бурительных трубах их необходимо заполнять водой или раствором пенообразователя (200–300 л) с помощью дозировочного насоса, включив его на максимальную подачу.

*Особенности бурения с пеной в осложненных условиях.* Контроль над процессом бурения базируется на наблюдении за давлением нагнетания пены, состоянием и равномерностью потока выходящей из скважины пены, а также за моментом вращения бурового инструмента. Изменение этих параметров в ту или иную сторону говорит о нарушении технологического режима бурения из-за возникновения осложнений [6].

Резкое падение давления нагнетания свидетельствует о свободном проходе воздуха по стволу скважины из-за чрезмерной его подачи. В этом случае необходимо снизить расход воздуха и увеличить подачу пенообразующего раствора.

Медленное постепенное увеличение давления указывает на накопление шлама или свободной жидкости в призабойной зоне скважины. Необходимо увеличить скорость подачи воздуха.

Резкое возрастание давления нагнетания свидетельствует об обвале стенок скважины и образовании сальников на бурительных трубах или породоразрушающем инструменте. Нужно прекратить бурение и, расхаживая инструмент с одновременной подачей пенообразователя, попытаться возобновить циркуляцию.

Сильное загрязнение потока пены шламом и наличие в нем кусков породы является признаком кавернообразования в стволе скважины. Для его предотвращения необходимо прекратить бурение и

увеличить концентрацию пенообразователя. Если это не помогает, через кольцевое пространство прокачивают большую порцию пенообразующей смеси.

Величина момента вращения бурового инструмента указывает на тип проходимых осложнений (песок, глина, сланцы и пр.), начало сальникообразования и прихватоопасных ситуаций.

При низких температурах окружающей среды воздухопроводы, находящиеся на открытом воздухе, должны быть утеплены с целью не допустить замерзание образующегося в них конденсата.

При кратковременных остановках компрессор можно не выключать, обеспечивая регулированием вентилей на ресивере и в нагнетательной линии сжатую циркуляцию воздуха.

При использовании пены отпадает необходимость в применении антивибрационных смазок. Одновременное их применение недопустимо, так как пена при этом будет интенсивно разрушаться в стволе скважины.

Другими причинами прекращения циркуляции пены могут быть:

- негерметичность соединений буровых труб;
- закупоривание промывочных окон и отверстий в породоразрушающем инструменте;
- нарушение режима работы или неисправность устройства для образования и нагнетания пены.

Избежать серьезных осложнений при бурении с промывкой пеной можно путем использования достаточно полного комплекса контрольно-измерительных средств для контроля за процессом бурения: чувствительных манометров, расходомеров воздуха и жидкости, приборов Н-348, ОМ-40.

При малых и средних водопритоках необходимо увеличивать концентрацию композита в растворе, одновременно уменьшая расход пенообразующего раствора.

Водопритоки, поступающие в скважину, подразделяют на несколько видов:

- малые – дебитом 2–4 л/мин (0,12–0,24 м<sup>3</sup>/ч).
- средние – дебитом 40–60 л/мин (2,4–3,6 м<sup>3</sup>/ч).
- сильные – дебитом более 40–60 л/мин.

В условиях средних водопритоков бывает наиболее трудно удалять из скважины перед началом каждого рейса накапливающуюся в ней пластовую воду из-за повышения ее гидростатического давления. При применении компрессоров низкого давления с рабочим давлением 8–9 кгс/см<sup>2</sup> возможно бурить скважину лишь до глубины 150–200 м, но даже в этом случае необходимо использовать следующие дополнительные мероприятия:

- производить спуск бурового инструмента ступенчато с промежуточными промывками;
- устанавливать в колонне дополнительные обратные клапаны;
- осуществлять начальную аэрацию поступившей в скважину воды.

Значительно облегчается проходка таких зон с использованием дожимных устройств, позволяющих поднимать давление нагнетания пены до 50–60 кгс/см<sup>2</sup>.

При сильных водопритоках применение пены часто становится неэффективным.

В условиях водопритоков необходимо учитывать химический состав поступающей в скважину воды с целью подбора новой рецептуры пенообразующего раствора, а также устойчивость стенок скважины с целью определения необходимости искусственного их закрепления обсадными трубами или тампонирующими составами.

При бурении в интенсивно трещиноватых, раздробленных породах и зонах разломов пена может поглощаться до полной потери циркуляции. В этом случае необходимо подобрать такую

концентрацию «Композита СП» и степень аэрации пены, при которых пластовое давление будет близко к гидростатическому. Степень аэрации в таких случаях может быть доведена до 200–300.

Особое внимание в данном случае необходимо уделять контролю за показаниями приборов Н-348 и ОМ-40, предупреждая прижоговую ситуацию.

При бурении в условиях кавернообразования и осыпания пород, о чем свидетельствует сильное загрязнение пены, выходящей из скважины, необходимо прекратить бурение, увеличить концентрацию «Композита СП» в растворе и возобновить промывку скважины до полной ее очистки от шлама.

При проходке многолетнемерзлых пород с применением пен желательнее использовать колонковый способ бурения, так как при этом образуется меньше шлама и он имеет более мелкий фракционный состав, что позволяет уменьшать подачу очистного агента.

При выборе породоразрушающего инструмента предпочтение следует отдавать коронкам с развитой промывочной системой, что особенно важно при разбуривании мерзлых глинистых разностей пород.

Общие закономерности возникновения и развития критических ситуаций при использовании пены в качестве очистного агента практически полностью соответствуют таковым, возникающим при бурении с промывкой буровым раствором, но характеризуются быстротой развития.

Таким образом, для оперативного распознавания подобных ситуаций и своевременного устранения способствующих этому причин необходимо:

– повышенное внимание обслуживающего персонала к изменению основных технологических параметров, регистрируемых имеющейся контрольно-измерительной аппаратурой, и поддержание ее в исправном состоянии;

– использование приборов, регистрирующих и контролирующих газожидкостное соотношение в пене (степень аэрации), закачиваемой в скважину и выходящей из нее.

Сильное загрязнение пены, выходящей из скважины, свидетельствует о бурении в условиях кавернообразования и осыпания пород. При этом необходимо прекратить бурение, увеличить концентрацию композита в растворе и возобновить промывку скважины до полной ее очистки от шлама.

В связи со сжимаемостью газожидкостной смеси процесс возобновления циркуляции смеси в скважине несколько растянут во времени по сравнению с промывочными жидкостями. Поэтому циркуляцию можно считать восстановленной, если давление в нагнетательной линии после постепенного роста начинает уменьшаться или стабилизируется. Например, при глубине скважины 400 м восстановление циркуляции происходит за 15–20 мин.

Быстрое возрастание давления в нагнетательной линии означает, что буровой снаряд зашламован. Восстановление циркуляции осуществляется расхождением снаряда гидравликой бурового станка. Если в процессе бурения начинает постепенно возрастать давление нагнетания, то это обычно указывает на образование шламового сальника или на поступление воды в скважину. Поступление из скважины тонкой водянистой пены указывает на вскрытие скважиной водоносного горизонта. В этом случае необходимо увеличить концентрацию поверхностно-активных веществ и подачу воздуха или расход пенообразующего раствора (жидкой фазы) для создания противодавления. Необходимо определить химический состав пластовой воды и изменить процентное содержание поверхностно-активных веществ или пенообразующий раствор для получения устойчивого потока пены.

Во избежание зашламования породоразрушающего инструмента перед каждым наращиванием снаряда необходимо промыть скважину в течение 5–7 мин, а перед подъемом – 10–15 мин.

Если в компоновку бурового снаряда не включены обратные клапаны, то сбрасывать давление следует постепенно через предохранительный клапан бурового насоса, так как при резком сбросе давления в скважине может произойти обвал стенок скважины и активация водоносных горизонтов. То же происходит при многократной замене в процессе бурения пеной жидкостью и наоборот [7].

Для представительности кернового материала и полноты геологической информации важно, какой качественный характер имеет износ керна в каждом конкретном случае. В общем виде износ истиранием и объемным дроблением может быть равномерным или избирательным. При равномерном износе пропорционально и равномерно изнашиваются как вмещающая горная порода, так и включенные в нее рудные минералы.

При бурении с пеной процент выхода керна выше, чем при бурении с промывочной жидкостью. Здесь играет роль улучшение смазочных свойств раствора, увеличение скорости проходки при сохранении сравнительно невысокой частоты вращения. Положительный эффект дает введение в раствор смазочных добавок, например омыленного талового пека.

Более подробно возможные ситуации и меры предупреждения аварий приведены в табл. 5.

При применении газожидкостных смесей обвязка устья скважины должна исключать возможность проникновения в помещение буровой установки пены. На воздухопроводе должны быть установлены манометр, вентиль для регулирования подачи воздуха в скважину и предохранительный клапан с отводом. Предохранительный клапан должен

срабатывать при давлении, превышающем рабочее на 15 % [8, 9].

Запрещается прекращать подачу воздуха путем перегибания шланга и отогревать замерзшие шланги открытым огнем. При избыточном давлении воздуха в нагнетательной магистрали нельзя наращивать буровой снаряд и отвинчивать пробку сальника.

Присоединение шлангов к напорной магистрали, компрессору, рабочей трубе, а также соединение шлангов следует производить при закрытом вентиле магистрали компрессора.

Мероприятия по охране окружающей среды при бурении с газожидкостными смесями должны предусматривать изоляцию вскрываемых водоносных горизонтов от загрязнения и заражения; не допускается слив использованной промывочной жидкости в открытые водоемы и непосредственно в почву. При бурении с газожидкостными смесями должны быть предусмотрены средства пеногашения для организации замкнутого цикла циркуляции [10, 11].

При бурении с пеной глубоких скважин, имеющих водопритоки, необходимо применять трехфазную пену (вспененный полимерный малоглинистый раствор) с обязательным перекрытием водоносных бурения с газожидкостной смесью.

При углублении ствола с использованием пен после спуска обсадных колонн удаляют буровой раствор и перед разбуриванием цементного стакана создают нормальную циркуляцию рабочего агента с постоянным и равномерным выходом пены на поверхность. В это время удаляется активная жидкость. К разбуриванию цементного стакана приступают после стабилизации давления потока пены.

### Заключение

Предлагаемое оборудование для получения пен и схемы поверхностной обвязки устья скважин при геологоразведочном бурении позволят обеспечить

Таблица 5

Технологические ситуации при бурении с пеной  
и меры предупреждения возникновения аварий

Table 5

Technological situations under foam drilling  
and accident prevention measures

Группы ситуаций	Типичные ситуации	Характерные особенности изменения информационных показателей	Управляющие воздействия
Ситуации нормального процесса углубки скважин	Нормальный процесс углубки	Стабильный уровень записи $N$ , $V_M$ и $P$	Продолжать углубку, поддерживая стабильными $N$ , $V_M$ и подачу пены
	Повышение (снижение) категории буримости горных пород	$N$ и $P$ увеличиваются (уменьшаются), $V_M$ уменьшается (увеличивается) и стабилизируется на новом уровне	Продолжать углубку, поддерживая $N$ , $V_M$ стабильными на новом уровне при соответствующей подаче пены
Ситуации предаварийного процесса углубки скважины	Изменение фактической осевой нагрузки из-за погрешностей в работе механизма подачи (отставание $V_M$ от скорости подачи)	После каждого перекрепления шпинделя увеличение $N$ и $V_M$ , то есть большому уровню $N$ соответствует более высокая $V_M$	Привести в соответствие $V_M$ и скорость подачи путем увеличения $C$ при постоянном контроле за подачей пены
	Увеличение нагрузки из-за неправильного перекрепления шпинделя	Увеличение $N$ , уменьшение (возможно до нуля) механической скорости	При перекреплении осуществить разгрузку бурильной колонны путем создания достаточного поддерживающего усилия лебедкой
	Заполирование алмазов из-за недостаточной осевой нагрузки	Постепенное снижение $N$ и $V_M$	Осуществить заточку кратковременным увеличением $C$ на 2000–4000 кг в течение 5–15 с
	Процесс углубки скважины по трещиноватым породам	Запись $N$ нестабильная, периодическое уменьшение $V_M$ и увеличение $P$	Снизить $C$ и $n$ на 15–20 % для нормализации $N$ и $V_M$
	Вибрация бурового снаряда	Симметричное отклонение $N$ от среднего уровня. Амплитуда записи соответствует интенсивности вибрации снаряда	Уменьшить $C$ и $n$ до стабилизации уровня записи $N$ и $V_M$ при увеличении подачи пены
	Зависание бурового снаряда из-за натяжения страховочного каната, «заедания» ведущей штанги в шпинделе	Интенсивное уменьшение $N$ и $V_M$	Ликвидировать натяжение страховочного каната, «заедание» ведущей штанги в шпинделе
	Реализация мощности двигателя станка	Увеличение $N$ выше номинального уровня загрузки двигателя; нестабильный характер записи $N$ ; постепенное уменьшение $V_M$	Перейти на более низкую $n$
	Интенсивный тепловой износ породоразрушающего инструмента	Пикообразный, нестабильный характер записи $N$ высокая $V_M$ (больше	Снизить $C$ . Если получена информация о выходе коронок из строя, приподнять

		установленных предельных значений для данных пород и типов коронок)	снаряд, остановить вращение, поднять снаряд
	Предприжоговая ситуация из-за утечки пены в снаряде или перекрытия промывочных каналов в коронке	Увеличение $N$ в течение более чем 15–20 с. Давление пены уменьшается или соответственно увеличивается	Приподнять снаряд без остановки вращения. Остановить вращение. Сбросить давление в снаряде и поднять его. Устранить возможную причину возникновения ситуации
	Выход породоразрушающего инструмента из строя	Повышение $N$ , затем увеличение $P$ и уменьшение $V_M$	Приподнять снаряд, остановить его вращение, сбросить давление в снаряде и поднять его
	Подклинивание бурового снаряда	Увеличение $N$ , при этом $P$ увеличивается, а $V_M$ уменьшается	Приподнять снаряд, углубку скважины продолжать при нормализации процесса, при повторении ситуации прекратить рейс
	Самозаклинивание керна	Нестабильный уровень $N$ , ему соответствует изменение $V_M$ , $P$ периодически возрастает	Приподнять снаряд, остановить вращение. Если $P$ не уменьшается, поднять лебедкой снаряд на высоту ведущей штанги. Периодически резко опуская и задерживая снаряд, так, чтобы коронка не касалась забоя, протолкнуть керн внутрь колонковой трубы. Момент проталкивания керна определяется по росту $P$ при спуске бурильных труб
	Отказ компрессора или бустера (дожимного устройства)	Нулевое показание $P$ и расходомеров	Приподнять снаряд, остановить его вращение. Сбросить давление в снаряде. Исправить оборудование
Аварийные ситуации в процессе углубки скважины	Обрыв бурового снаряда	Уменьшение $N$ , снижение $V_M$ и $P$	Приподнять снаряд, остановить его вращение. Сделать замер ведущей бурильной трубы и приступить к ликвидации аварии
	Прижог алмазного породоразрушающего инструмента	Интенсивное пикообразное увеличение $N$ с периодическим снижением до первоначального с большей, чем при предприжого, амплитудой	Остановить вращение снаряда, предварительно приподняв его. Ликвидировать аварию
	Прихваты бурового снаряда в желобах	Периодические резкие колебания $N$ и $P$ относительно средней линии и в сторону увеличения. Повышение $N$ без изменения $P$ и без сохранения выхода пены на поверхность	Подорвав снаряд, остановить вращение. Приступить к ликвидации аварии. Принять меры по ликвидации желоба

*Примечание.*  $N$  – мощность на бурение;  $P$  – давление нагнетания;  $C$  – осевая нагрузка;  $V_M$  – механическая скорость бурения;  $n$  – частота вращения.

*Note.*  $N$  – drilling power;  $P$  – discharge pressure;  $C$  – axial load;  $V_M$  – mechanical speed of drilling;  $n$  – rotational speed.

оптимальное регулирование расхода воздуха, пенообразователя и получение необходимого давления нагнетания пены, то есть создать наиболее оптимальные режимы бурения на экологически чистых разрушаемых пенах.

Применение легко разрушаемых в статике пен обеспечит замкнутый цикл циркуляции, что в первую очередь повысит культуру производства.

При этой технологии не загрязняется место проведения буровых работ, снижаются необоснованные затраты

дорогостоящих реагентов-пеногасителей, обеспечивается повторное применение пенообразующего раствора, исключается применение дополнительных технических средств и специального оборудования для пеногашения, сокращается время сооружения скважины и себестоимость проводимых работ. Также снижается аэрогидродинамическое давление, что облегчает отделение выбуренных частиц породы от забоя, и тем самымкратно увеличивается механическая скорость бурения.

### Библиографический список

1. Заливин В.Г. Технология бурения скважин на саморазрушающихся пенах // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 1 (44). С. 50–54.

2. Заливин В.Г. Оборудование, обеспечивающее цикл бурения скважин пеной на основе «Композита СП» // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41, № 3. С. 62–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77.

3. Яковлев А.И., Коваленко В.И. Бурение скважин с пеной на твердые полезные ископаемые. Л.: Недра, 1987. 128 с.

4. Бронзов А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агентов. М.: Недра, 1989. 288 с.

5. Мураев Ю.Д. Газожидкостные системы в буровых работах. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного горного института им. Г.В. Плеханова, 2004. 123 с.

6. Кирсанов А.И., Крылов Г.А., Нефедов В.П. Пены и их использование в бурении. М.: Изд-во ВИЭМС, 1980. 60 с.

7. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.

8. ASME Shale Shaker Committee. Drilling Fluids Processing Handbook. Amsterdam: Elsevier, 2011. 700 p.

9. Angel R.R. Air Drilling Handbook. Air Drilling Division of MI Drilling Fluids. Gulf Publishing Co., October 1958. 453 p.

10. Рогачев М.К., Стрижнев К.В. Борьба с осложнениями при добыче нефти. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 295 с.

11. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.

### References

1. Zalivin V.G. Self-destructive foam-based drilling technology. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits], 2014, no. 1 (44), pp. 50–54. (In Russ.).

2. Zalivin V.G. Equipment for well foam drilling based on "Composite SP". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the

Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 3, pp. 62–77. (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77.

3. Yakovlev A.I., Kovalenko V.I. *Burienie skvazhin s penoi na tverdye poleznye iskopaemye* [Foam drilling of wells for solid minerals]. Leningrad: Nedra Publ., 1987, 128 p. (In Russ.).

4. Bronzov A.S. *Burienie skvazhin s ispol'zovaniem gazoobraznykh agentov* [Well drilling with the use of gaseous agents]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 288 p. (In Russ.).

5. Muraev Yu.D. *Gazozhidkostnye sistemy v burovyykh rabotakh* [Gas-liquid systems in drilling

operations]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov Publ., 2004, 123 p. (In Russ.).

6. Kirsanov A.I., Krylov G.A., Nefedov V.P. *Peny i ikh ispol'zovanie v burenii* [Foams and their use in drilling]. Moscow: All-Union Research Institute of Economics of Mineral Raw Materials and Geological Exploration named after N.M. Fedorovsky Publ., 1980, 60 p. (In Russ.).

7. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their production and destruction]. Moscow: Khimiya Publ., 1983, 264 p. (In Russ.).

#### **Критерии авторства**

Заливин В.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### **Информация об авторах**

**Заливин Владимир Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: ZalivinVG@yandex.ru*

8. ASME Shale Shaker Committee. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2011, 700 p.

9. Angel, R.R. *Air Drilling Handbook*. Air Drilling Division of MI Drilling Fluids. Gulf Publishing Co., October 1958, 453 p.

10. Rogachev M.K., Strizhnev K.V. *Bor'ba s oslozhnennyami pri dobyche nefti* [Fighting complications in oil production]. Moscow: "Nedra-Biznescentr" LLC Publ., 2006, 295 p. (In Russ.).

11. Ryazanov Y.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis' Publ., 2005, 664 p. (In Russ.).

#### **Authorship criteria**

Vladimir G. Zalivin has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

#### **Information about the authors**

**Vladimir G. Zalivin**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: ZalivinVG@yandex.ru*