Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133). С. 9-23. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 5 (133). P. 9-23. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 622.276

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-5-9-23

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ АФРОНСОДЕРЖАЩИХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЧЕРНОМОРСКОГО ШЕЛЬФА

Руслан Уралович Рабаев

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия,

r.u.rabaev@gmail.com

Аннотация. В настоящее время освоение залежей углеводородов Черноморского шельфа, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями, требует разработки новых эффективных технологических решений в области бурения скважин.

Актуальной задачей является подбор оптимальных буровых растворов для предотвращения потерь циркуляции, минимизации вероятности возникновения прихватов и повреждения продуктивных горизонтов. Промывочные жидкости, содержащие афроны, достаточно хорошо известны в мировой практике бурения, но на российском рынке они пока не нашли широкого тиражирования.

Данные системы буровых растворов призваны решить обозначенные проблемы с меньшими затратами, чем технологии, в которых требуется дорогостоящее оборудование и соответствующие компетенции, они также являются перспективным решением, которое может внести существенный вклад в развитие российских технологий бурения.

В настоящей статье освещены результаты обобщения и анализа научной литературы по вопросам исследования буровых растворов, разработки составов и технологии на основе применения афроновых систем.

Ключевые слова: афроны, буровые растворы, коллоидные газовые афроны, коллоидные жидкие афроны, защитный экран, кольматирующий слой

Для цитирования: Рабаев Р. У. К вопросу применения афронсодержащих буровых растворов для бурения скважин в осложненных условиях на месторождениях Черноморского шельфа // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133). С. 9-23. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-5-9-23>.

Original article

ON THE QUESTION OF AFRON-CONTAINING BOREHOLE MUD APPLICATION FOR DRILLING WELLS UNDER COMPLICATED CONDITIONS ON BLACK SEA SHELF FIELDS

Ruslan U. Rabaev

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, r.u.rabaev@gmail.com

Abstract. Currently, the development of hydrocarbon deposits on the Black Sea shelf, characterized by difficult mining and geological conditions, requires the development of new effective technological solutions in the field of well drilling.

An urgent task is to select the optimal drilling fluids to prevent loss of circulation, minimize the likelihood of stuck and damage to productive horizons. Drilling fluids containing aphrons are well known in the world drilling practice, but they have not yet found wide circulation in the Russian market.

These drilling fluid systems are designed to solve these problems at lower costs than technologies that require expensive equipment and relevant competencies, and are also a promising solution that can make a significant contribution to the development of Russian drilling technologies.

This article highlights the results of generalization and analysis of scientific literature on the study of drilling fluids, the development of compositions and technology based on the use of aphron systems.

Keywords: aphrons, borehole mud, colloidal gas aphrons, colloidal liquid aphrons, protective shield, clogging layer

For citation: Rabaev R. U. K voprosu primeneniya afronsoderzhashchikh burovyykh rastvorov dlya bureniya skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh na mestorozhdeniyakh Chernomorskogo shel'fa. [On the Question of Afron-containing Borehole Mud Application for Drilling Wells under Complicated Conditions on Black Sea Shelf Fields]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2021, Issue 5 (133), pp. 9-23. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-5-9-23>.

На сегодняшний день, большая часть открытых на шельфе Черного моря месторождений находится на завершающей стадии разработки, при которой возобновление роста добычи газа и конденсата возможно только в случае открытия новых залежей, приуроченных к структурам более мелкого порядка.

Основные перспективы открытия новых залежей углеводородов (УВ) на шельфе Черного моря связаны преимущественно с промышленно газоносной продуктивной толщей нижнего палеоцена, представленной известняками и мергелями со специфической литологией и структурой порового пространства. Коллекторами здесь являются органогеннодетритовые трещиноватые известняки с прослоями трещиноватых мергелей, которые имеют достаточно высокую пористость и низкую проницаемость.

Последнее связано с седиментационными (первичными) мелкими порами органогенного материала. Сам органогенный материал очень мелкий, размерами от 0,01 до 0,05 мм. Пустотное пространство представлено многочисленными полыми порами и микротрещинами, открытыми или заполненными кристаллическим карбонатным материалом.

Трещиноватость развита в виде тонкого различного направления трещин, частично залеченных глинистым битумом, пиритом, глауконитом и зернами кварца.

Проницаемость обеспечивается, в основном, трещиноватостью и стилолитами. Тип коллектора – трещинно-поровый. Такого типа коллекторы очень чувствительны к закупорке, и призабойная зона кольматируется на значительную глубину фильтратом промывочной жидкости и твердой фазой, которая проникает в трещины, раскрывающиеся во время значительных репрессий.

Залежи УВ нижнего палеоцена характеризуются осложненными условиями залегания продуктивных пластов (аномально низкие пластовые давления и температуры, высокая степень трещиноватости пород-

коллекторов, кавернозность и т.д.), освоение которых требует совершенствования традиционно применяемых технологий бурения скважин. Избыточное давление, возникающее при использовании традиционных буровых растворов с твердой фазой, является причиной большинства проблем потери циркуляции и дифференциального прихвата. Оборудование, необходимое для использования азрированных буровых растворов или бурения на депрессии, которые минимизируют повреждение призабойной зоны и вероятность возникновения каких-либо осложнений, часто является чрезмерно дорогим, а выполнение требований безопасности может оказаться непосильной задачей. Кроме того, эти методы могут не обеспечить достаточную эквивалентную циркуляционную плотность бурового раствора, необходимую для безопасного проведения буровых работ.

Для бурения в пластах, склонных к потере циркуляции, разработан *буровой раствор для контроля и предупреждения поглощения и сохранения коллекторских свойств продуктивного пласта*, представляющий собой уникальную загущенную гетерогенную систему из поверхностно-активных веществ (ПАВ), биополимеров и афронов.

Афроны ведут себя как стабилизированные дисперсные системы, создавая тем самым сеть микропузырьков для остановки или замедления поступления флюидов в проницаемые пласты. Уникальная вязкость создает высокое сопротивление проникновению бурового раствора в высокопроницаемые пористые или трещиноватые зоны, создавая таким образом сбалансированную систему неповреждающего действия. Данные испытаний подтверждают его улучшенные свойства очистки стволов скважин и высокую транспортирующую способность.

Функционал бурового раствора с афронами полностью основан на принципе перекрытия «микропузырьками» проницаемых зон, и он не содержит каких-либо обычных твердых частиц для герметизации данных участков.

Множественные зарубежные примеры успеха применения буровых растворов с афронами показывают, что осложняющие факторы, сопровождающие бурение, уменьшаются, а потери бурового раствора в значительной степени предотвращаются.

Термин «коллоидные газовые (жидкие) афроны» впервые ввел Феликс Себба в начале 1970-х годов [1, 2], чтобы определить конкретный тип дисперсий газ / жидкость или жидкость / жидкость, в отличие от обычных пен или эмульсий. За некоторое время коллоидные афроны продемонстрировали значительный потенциал во многих областях промышленного применения, таких как буровые растворы на месторождениях нефти и газа, извлечение и иммобилизация белков [3], очистка воды и почвы от загрязнений, экстракция предварительно диспергированным растворителем и синтез функциональных материалов.

Согласно Феликсу Себбе [2], афроны представляют собой пузырьки диаметром примерно 10-150 мкм. В отличие от обычных пузырьков пены афроны имеют структуру «ядро, два слоя и три мембраны» (рисунок 1).

Газовое ядро афрона заключено в водную защитную оболочку. Эта прочная непроницаемая оболочка помогает предотвратить утечку воздуха из активной зоны и позволяет афронам выдерживать внутрискважинные давления. Фактически оболочка представляет собой трехслойное поверхностно-активное вещество. Внешний слой поверхностно-активного вещества считается гидрофильным, что делает афроны совместимыми с окружающей жидкостью на водной основе и создает эффективный барьер против слияния с соседними афронами. При этом афроны могут притягиваться друг к другу с образованием сложных агрегатов, которые ведут себя так же, как отдельные афроны [4].

Технология буровых растворов с афронами успешно применяются при бурении вертикальных, горизонтальных и наклонных скважин, а также при завершении и капитальном ремонте скважин в Южной Америке, Северной Америке, Африке, в Восточной Азии, Восточной Мексике, Венесуэле, Север-

ном море, Северном и Западном Техасе [5-10]. Одной из главных причин эффективности буровых растворов с афронами является то, что капиллярное давление препятствует проникновению гидрофобного микропузырька в смоченную водой взаимосвязанную сеть микротрещин и пор в проницаемых пластах [11].

Как известно, пузырьки-афроны формируются при высоких сдвиговых напряжениях, каковым является, к примеру, выход раствора из гидромониторных насадок долота. Как только буровое долото при проходке обнажает истощенный пласт, афроны собираются вместе в каналах зон низкого давления. Там часть энергии, накопленной в каждом афроне, высвобождается, заставляя его расширяться. Расширение продолжается до тех пор, пока внутреннее и внешнее давление на стенку афрона не уравниваются. Рисунок 2 иллюстрирует этот процесс активизации.

Происходит сопротивление потоку афронов и несущей жидкости в поровые каналы и трещины пласта, и, таким образом, эффективность уплотнения, образованного афронами, зависит от размера отверстий и степени гидрофобности внешней оболочки афрона. Небольшие каналы и сильно гидрофобные / липофильные афроны способствуют герметизации. И, наоборот, очень большие отверстия, например трещины, будут генерировать небольшое капиллярное давление или вообще не создавать его, и, следовательно, уплотнение может быть невозможным, кроме как на конце трещины [7]. Вместе с этим, нами разработаны технологии перекрытия трещин на незначительном расстоянии от ствола скважины, позволяющие продолжить процесс бурения без значительных потерь бурового раствора.

Афрон действует как несмачивающая жидкость на смоченный водой пласт, в то время как эффект Жамена препятствует его проникновению в поровые каналы или трещины. Афроны очень устойчивы в различных условиях работы. Их стабильность зависит от толщины, вязкости и свойств, инкапсулирующей оболочки.

Рисунок 1. Структура афрона на водной основе
Figure 1. Water-based aphron structure

Рисунок 2. Механизм перекрытия афронами
Figure 2. Mechanism of overlapping by aphrons

Оболочка (пленка вязкости афрона) должна иметь определенную минимальную толщину. Это важно, потому что циркулирующие афроны изменяют свой объем при изменении давления в соответствии с законом Бойля-Мариотта. Если оболочка станет чрезмерно тонкой, что может произойти при расширении под воздействием очень большого перепада давления, она, вероятно, разрушится [12]. Водная оболочка не является стабильной, если она тоньше 4 или толще 10 мкм. Помимо толщины очень важным критерием стабильности афрона является вязкость оболочки. Оболочка должна иметь минимальную вязкость, чтобы предотвратить явление, известное как «эффект Марангони», которое вызывает диффузию воды из оболочки в объем жидкости. Это истончает и дестабилизирует оболочку [12].

При применении технологии буровых растворов на основе афрона истощенные пласты, которые чрезмерно затратно бурить по технологии вскрытия пласта на депрессии или с помощью других методов, теперь могут быть пробурены на репрессии с тем же результатом. Буровые растворы с афронами защищают продуктивный пласт, сводя к минимуму его повреждение, благодаря превосходной совместимости или нейтральности буровых растворов с добываемыми флюидами, а также из-за отсутствия сродства афროнов друг к другу и к минеральным поверхностям. Хотя эта технология успешно используется во всем мире, выбор подходящих геологических условий имеет немаловажное значение. Идеальное целевое применение для жидкости на основе афрона - это пласты с очень извилистыми поровыми отверстиями или трещинами, которые позволяют афрону образовывать защитный экран.

Наиболее характерными параметрами буровых растворов с афронами являются наличие самих афროнов и их реология [13]. Поверхностно-активное вещество в жидкость вводится для достижения желаемой концентрации афронов и создания поверхностного натяжения, удерживающего афроны по мере их образования. Кроме того, поверхностно-

активное вещество может создавать многослойную оболочку и межфазное натяжение, связывающее афроны в сеть, способную создавать внутрискважинные экранирующие покрытия на стенках ствола.

Коллоидные афроны обычно создаются с использованием анионных, катионных, неионогенных поверхностно-активных веществ, наночастиц и т.п. Например, додецилсульфат натрия, бромид цетилтриметиламмония, бис (2-этилгексил) сульфосукцинат натрия, тергитолы и модифицированный нано-Si в качестве пенообразователя или эмульгатора могут способствовать созданию достаточно идеальных жидкостных систем с афронами. Что касается коллоидных жидких афронов, основной особенностью состава являются два поверхностно-активных вещества, используемых в качестве эмульгаторов, включая водорастворимое и маслорастворимое поверхностно-активные вещества, которые, вероятно, отличаются от такового в общей эмульсионной системе. Однако обычная эмульсия на самом деле также имеет формулу составного эмульгатора, что указывает на отсутствие существенной разницы в составе между двумя системами. То есть коллоидные жидкие афроны и обычные эмульсии обычно содержат почти одни и те же ингредиенты для их облегчения, включая две несмешивающиеся жидкости и эмульгаторы. Относительно дисперсий газ / жидкость нет никакой существенной разницы в рецептуре между коллоидными газовыми афронами и обычными пенами [14].

Что касается приготовления коллоидных афронов, то наиболее часто используемый метод называется *физическим вспениванием или эмульгированием путем разрыва капли*, например встряхивание, перемешивание, гомогенизация, ультразвуковым и т.д. [6]. Характеристики афронов, включая размер, монодисперсность и стабильность, зависят от различных параметров в процессе генерации, таких как метод изготовления, потребляемая мощность, поверхностно-активные вещества в качестве пенообразователей или эмульгаторов, некоторые добавки, такие как элек-

тролиты и полимеры, объемное соотношение дисперсной фазы, вязкость сплошной фазы [15, 16]. Такие составы, методы приготовления и факторы, влияющие на процесс образования афронов, также являются обычными элементами, встречающимися в обычных пенных и эмульсионных системах.

Для афрона свободная энергия коллоидной дисперсии газ / жидкость (пузырьки в воде или масле) или масло / вода (капли жидкости в воде или масле) больше, чем у разделенных фаз (газа и жидкости или масла и воды), предполагая, что афрон - нестабильная система с точки зрения термодинамики. Процесс образования афронов - это образование газ / жидкость из пузырьков газа или нефти / воды на границе раздела капель жидкости, что приводит к увеличению площади поверхности раздела между дисперсной фазой и непрерывной фазой. С помощью поверхностно-активных веществ, адсорбированных на границе раздела газ / жидкость или масло / вода для образования межфазной пленки, этот процесс образования пузырьков или дисперсий капель может осуществляться плавно.

В принципе, такой процесс всегда требует использования некоторой внешней энергии для преобразования разделенных отдельных фаз в коллоидную дисперсию газ / жидкость или жидкость / жидкость.

Независимо от ситуации подвод энергии должен быть выше, чем положительная свободная энергия, связанная с увеличенной площадью контакта границы раздела газ / жидкость или жидкость / жидкость и принятая как $\Delta G_{interface} = \gamma \Delta A$, что также подтверждается исследованием о приготовлении и механизме образования афронов. Таким образом, исходя из приведенного выше анализа, можно сказать, что механизм образования афронов точно такой же, как у обычных пен / эмульсий.

Кроме различных ПАВ, состав типичных буровых растворов на основе афронов представляет собой соответствующие химические реагенты для контроля pH, загустители, стабилизаторы афронов, добавки для

контроля водоотдачи и генерации афронов, которые создают и стабилизируют микропузырьки в системе.

Чаще всего загустителем является биополимер. Для успешного приготовления и использования буровых растворов афроны должны быть стабилизированы. Это также достигнуто с помощью полимера с высоким пределом текучести, разжижающимся при сдвиге. Этот тип полимера считается загустителем, а также стабилизатором. Использование такого полимера в сочетании с агентом, регулирующим фильтрацию, поможет контролировать реологические свойства (т.е. вязкость при сдвиге, вязкость при низкой скорости сдвига) и стабилизировать афроны, предотвращая коалянцию пузырьков во времени.

Диаметр пузырька афронов является важным фактором для определения возможной степени проникновения афронсодержащих жидкостей в пласт во время бурения. Размер пузырьков должен соответствовать распределению пор по размерам в породе продуктивного пласта [17]. Таким образом, очень важно измерить распределение микропузырьков по размерам, а не просто посмотреть на средний размер пузырьков. Размер афронов возможно определить с использованием метода визуализации, описанного в работе [18].

Типичный размер афронов, по некоторым другим данным, составляет от 10 до 100 мкм в диаметре, и они могут выдерживать рециркуляцию через систему очистки бурового раствора.

Большинство афронов не удаляется даже виброситами с мелкими сетками, и, поскольку они имеют небольшую массу, они остаются даже в гидроциклонах или высокоскоростных центрифугах. Афроны не мешают работе скважинных приборов и инструментов, это - телесистемы различного целевого назначения или забойные двигатели, что делает их идеальными для строительства скважин с большим отходом от вертикали.

Пузырьки / капли настолько малы, что проявляют некоторые коллоидные свойства,

поэтому с тех пор название было изменено на коллоидные газовые системы, под которыми они довольно часто обозначаются.

Для сравнения - обычная пена / эмульсия по размеру частиц может быть разделена на микропену с размером частиц < 100 мкм и макропену с размером частиц > 100 мкм [18], микроэмульсию (капли < 100 нм) и макроэмульсию (капли > 100 нм), что покрывает весь размерный ряд частиц афронов.

Следовательно, система пена / эмульсия в пределах определенного диапазона размеров частиц также демонстрирует коллоидные свойства, как афроны. Более того, важной характеристикой может быть поведение потока, зависящее от размера самих афронов. Такой размер (< 100 мкм) пузырьков / капель, который наделяет их коллоидными характеристиками, создает систему, которая течет так же легко, как псевдопластичные жидкости или вода. Можно видеть, что афроны того же размера имеют характеристики текучести, очень похожие на обычные пены / эмульсии.

Афроны могут выдерживать воздействие повышенного давления намного лучше, чем обычные пузырьки (рисунок 3). При сжатии до 3,55 МПа и поддержании этого давления все три пузырька сразу же уменьшились с первоначального размера примерно 250 мкм при атмосферном давлении до примерно 150 мкм.

Как показано на рисунке 3, усиленный афрон просуществовал более 30 мин, тогда как стандартный афрон исчез менее чем за 10 мин, а обычный пузырь исчез в течение 2 мин [1, 8].

За короткий период времени афроны могут пережить сжатие и декомпрессию (рисунок 4). Афроны могут выдерживать сжатие как минимум до 27,7 МПа [8]. Размер афрона имеет большое влияние на его живучесть и устойчивость строения. Большие афроны (диаметр > 100 мкм), по-видимому, способны выжить намного лучше, чем маленькие афроны [1]. Когда афроны становятся меньше примерно 50 мкм в диаметре, они становятся менее стабильными.

Рисунок 3. Долговечность афронов при повышенном давлении
Figure 3. Durability of aphony at elevated pressure

Рисунок 4. Выживание афронов при сжатии и декомпрессии
Figure 4. Survival of afothrons under compression and decompression

Афрон может выдерживать быстрое сжатие и декомпрессию, когда жидкость на основе афрона циркулирует по системе. Как показано на рисунке 4, быстрое сжатие бурового раствора афрон от 0 до 20,79 МПа с последующей декомпрессией обратно до 0 МПа приводит к практически полной регенерации афронов [1].

Быстрая смена давления бурового раствора на афроне оставляет нетронутыми большинство афронов. Стабильность микропузырьков во времени также является важным фактором для определения способности афронов блокировать поры породы.

На рисунке 5 показана зависимость среднего размера пузырьков от времени при температуре окружающей среды и атмосферном давлении. Хорошо видно, что афро-

ны увеличиваются в размере в первые 3 ч, а затем они растут с относительно меньшей скоростью и, в конечном итоге, достигают стабильного значения через 6 ч. Эти результаты хорошо согласуются с данными [18] и [19].

На рисунке 6 показаны два снимка, сделанные в одном масштабе для анализа диаметра пузырька во времени. Один из них представляет собой свежеприготовленные буровые растворы на основе афрона, как показано на рисунке 6, *a*, а другой - жидкости по прошествии 48 ч, как показано на рисунке 6, *b*.

Очевидно, что афроны со временем увеличиваются в размерах с одновременным разрывом пузырьков, что и наблюдалось в микроскоп.

Рисунок 5. Влияние времени на средний диаметр микропузырьков при температуре окружающей среды и атмосферном давлении

Figure 5. Influence of time on the average diameter of microbubbles at ambient temperature and atmospheric pressure

Уникальной межфазной структуры афронов не существует, поэтому нет никаких оснований полагать, что он имеет другой механизм стабильности, чем обычная система пены / эмульсии. Подобно обычной системе пены / эмульсии дисперсия афрона также включает три механизма стабильности, такие как усадка жидкости, укрупнение пузырьков и разрыв пленки. Как термодинамически нестабильная система афрон со временем растворяется со скоростью, которая зависит от высоты энергетических барьеров между дисперсиями афрона и разделенными фазами. Далеко не последнюю роль в стабильности свойств афронсодержащих систем играют строение и свойства полимеров, участвующих в формировании поверхностных блокирующих слоев. Высота энергетического барьера в

основном фиксируется физико-химическим поведением, которое препятствует объединению и слиянию капель, включая отталкивающие гидродинамические и коллоидные взаимодействия между частицами.

Стремясь понять механизм устойчивости афрона, исследования многих специалистов часто сосредотачиваются на его усадочных свойствах, что, на наш взгляд, является поверхностным подходом. В публикации [20] сообщается о кинетической модели первого порядка, основанной на поведении распада афронов, обнаружено, что время распада показывает отрицательную корреляционную тенденцию с размером афрона. В лаборатории исследователи изобразили профили отвода жидкости с афронами с помощью кинетической модели [21].

Рисунок 6. Микроформы свежеприготовленных микропузырьков (а).
Микроформы микропузырьков выдерживают 48 ч (b)
Figure 6. Microforms of freshly prepared microbubbles (a).
Microbubble microforms incubated for 48 h (b)

Было обнаружено, что усадочное поведение афронов может быть хорошо смоделировано сигмоидальным уравнением:

$$V = V_{max} \frac{t^n}{K^n + t^n},$$

где V - итоговый объем жидкости;

V_{max} - максимальный начальный объем жидкости;

t - время усадки;

K^n - период полураспада ($0,5t$) режима усадки.

Эта кинетическая модель также была успешно подтверждена с помощью уравнения Аррениуса. На основе анализа скорости усадки жидкости были впервые предложены две отдельные стадии усадки жидкости из дисперсии афронов. Первая стадия усадки осуществляется под действием силы тяжести и обеспечивает удаление > 90 % всей жидкости. Вторая стадия произошла на границах ламелей и плато, связана с капиллярным давлением и всасыванием границы плато.

Анализ механизма усадки афронов также был описан другими исследователями [22-25]. В одном из этих научных отчетов кривая усадки точно такая же, как и выводы других авторов. Разница в том, что гравитационная усадка делится на два этапа [22].

При анализе других работ выявлено, что первая стадия определяется как проводимость непрерывной фазы, а последние две стадии процесса усадки должны быть идентичны теории. Из них можно видеть, что механизмы вышеупомянутых трехстадийных фаз по существу такие же, как и двухступенчатая теория.

В то же время поведение устойчивости афронов также было определено с помощью анализа проводимости и далее представлено сигмоидальным уравнением в исследованиях [21].

Процесс эволюции афронов включает две отдельные стадии, включая усадку плен-

ки и разрыв пленки, управляемые двумя независимыми механизмами соответственно. Такое поведение усадки коллоидных газовых / жидких афронов часто наблюдается в обычных системах пен / эмульсий [26].

Выводы

Резюмируя, можно сказать, что сущность афронов, по некоторым ключевым характеристикам, таким как процесс образования, структура границы раздела, принципов стабильности, идентична системам пен в эмульсии. Такой буровой раствор является экономной альтернативой недешевой технологией бурения на депрессии в сложных геологических условиях месторождений Черноморского шельфа, где наблюдается чрезмерная трещиноватость или проницаемость, а также при направленном бурении горизонтальных стволов с большим отходом от вертикали. Буровые растворы на основе афронов могут иметь широкий диапазон размеров пузырьков - в среднем от 10 до 150 мкм. Афроны могут выдерживать воздействие повышенного давления намного лучше, чем обычные пузырьки пен, а их стабильность зависит от толщины и вязкости инкапсулирующей оболочки. Также они могут быть устойчивы при перепадах давления и сжатии - при возврате в начальные барические значения афроны чаще всего приобретают изначальную размерность. Между тем, эти и другие качественные характеристики буровых растворов с афронами зависят от введенных компонентов, которыми можно регулировать степень устойчивости к различным факторам, которые встречаются при бурении. Благодаря возможности обеспечения пузырьками афрона защитного экранирования пор и трещин в призабойной зоне пласта при выполнении буровых работ и возможности их быстрого удаления при запуске скважины в эксплуатацию буровые растворы с афронами нашли широкое распространение в зарубежной практике и являются чрезвычайно перспективными для отечественного рынка нефтесервисных услуг в области буровых растворов.

Список источников

1. Sebba F. Microfoams-an Unexploited Colloid System // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1971. Vol. 35. Issue 4. P. 643-646. DOI: 10.1016/0021-9797(71)90223-2.
2. Sebba F. The Behaviour of Minute Oil Droplets Encapsulated in a Water Film // *Colloid and Polymer Science*. 1979. Vol. 257. Issue 4. P. 392-396.
3. Jauregi P., Varley J. Colloidal Gas Aphrons: Potential Applications in Biotechnology // *Trends in Biotechnology*. 1999. Vol. 17. Issue 10. P. 389-395. DOI: 10.1016/S0167-7799(99)01363-3.
4. Ivan C.D., Growcock F.B., Friedheim J.E. Chemical and Physical Characterization of Aphron-Based Drilling Fluids // *Materials of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA. 2002. Paper Number SPE-77445-MS. DOI: 10.2118/77445-MS.
5. MacPhail W.F., Cooper R.C., Brookey T., Paradis J. Adopting Aphron Fluid Technology for Completion and Workover Applications // *Formation Damage Control: Materials of SPE International Symposium and Exhibition*. Lafayette, Louisiana, USA. 2008. Paper Number SPE-112439-MS. DOI: 10.2118/112439-MS.
6. Growcock F.B., Belkin A., Fosdick M., Irving M., O'Connor B., Brookey T. Recent Advances in Aphron Drilling Fluids // *Materials of IADC/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA. 2006. Paper Number SPE-97982-MS. DOI: 10.2118/97982-MS.
7. Growcock F.B., Belkin A., Fosdick M., Irving M., O'Connor B., Brookey T. Recent Advances in Aphron Drilling Fluids Technology // *SPE Drilling and Completion*. 2007. Vol. 22. Issue 2. P. 74-80.
8. Rea A.B., Alvis E.C., Paiuk B.P., Climaco J.M., Vallejo M., Leon E., Inojosa J. Application of Aphrons Technology in Drilling Depleted Mature Fields // *Materials of SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Port-of-Spain, Trinidad and Tobago. 2003. Paper Number SPE-81082-MS. DOI: 10.2118/81082-MS.
9. White C.C., Chesters A.P., Ivan C.D., Maikranz S., Nouris R. Aphron-Based Drilling Fluid: Novel Technology for Drilling Depleted Formations in the North Sea // *Materials of SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, Netherlands. 2003. Paper Number SPE-79840-MS. DOI: 10.2118/79840-MS.
10. Schaneman B.D., Jones T., Rea A.B. Aphrons Technology - A Solution // *Practical Solution for Drilling Challenges: Materials of AADE 2003 National Technology Conference*. Houston, Texas, USA. 2003.
11. Rea T. Aphrons Key in Depleted Reservoirs // *Semantic Scholar*. 2003. URL: <https://www.semantic-scholar.org/paper/Aphrons-key-in-depleted-reservoirs-Rea/b1df7a1baf5a0b56beffd6270076b5cf5cad4061#citing-papers> (дата обращения: 27.08.2021).
12. Growcock F.B., Khan A.M., Simon G.A. Application of Water-Based and Oil-Based Aphrons in

References

1. Sebba F. Microfoams-an Unexploited Colloid System. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1971, Vol. 35, Issue 4, pp. 643-646. DOI: 10.1016/0021-9797(71)90223-2.
2. Sebba F. The Behaviour of Minute Oil Droplets Encapsulated in a Water Film. *Colloid and Polymer Science*, 1979, Vol. 257, Issue 4, pp. 392-396.
3. Jauregi P., Varley J. Colloidal Gas Aphrons: Potential Applications in Biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 1999, Vol. 17, Issue 10, pp. 389-395. DOI: 10.1016/S0167-7799(99)01363-3.
4. Ivan C.D., Growcock F.B., Friedheim J.E. Chemical and Physical Characterization of Aphron-Based Drilling Fluids. *Materials of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, 2002, Paper Number SPE-77445-MS. DOI: 10.2118/77445-MS.
5. MacPhail W.F., Cooper R.C., Brookey T., Paradis J. Adopting Aphron Fluid Technology for Completion and Workover Applications. *Materials of SPE International Symposium and Exhibition «Formation Damage Control»*. Lafayette, Louisiana, USA, 2008, Paper Number SPE-112439-MS. DOI: 10.2118/112439-MS.
6. Growcock F.B., Belkin A., Fosdick M., Irving M., O'Connor B., Brookey T. Recent Advances in Aphron Drilling Fluids. *Materials of IADC/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006, Paper Number SPE-97982-MS. DOI: 10.2118/97982-MS.
7. Growcock F.B., Belkin A., Fosdick M., Irving M., O'Connor B., Brookey T. Recent Advances in Aphron Drilling Fluids Technology. *SPE Drilling and Completion*, 2007, Vol. 22, Issue 2, pp. 74-80.
8. Rea A.B., Alvis E.C., Paiuk B.P., Climaco J.M., Vallejo M., Leon E., Inojosa J. Application of Aphrons Technology in Drilling Depleted Mature Fields. *Materials of SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Port-of-Spain, Trinidad and Tobago, 2003, Paper Number SPE-81082-MS. DOI: 10.2118/81082-MS.
9. White C.C., Chesters A.P., Ivan C.D., Maikranz S., Nouris R. Aphron-Based Drilling Fluid: Novel Technology for Drilling Depleted Formations in the North Sea. *Materials of SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, Netherlands, 2003, Paper Number SPE-79840-MS. DOI: 10.2118/79840-MS.
10. Schaneman B.D., Jones T., Rea A.B. Aphrons Technology - A Solution. *Materials of AADE 2003 National Technology Conference «Practical Solution for Drilling Challenges»*. Houston, Texas, USA, 2003.
11. Rea T. Aphrons Key in Depleted Reservoirs. *Semantic Scholar*. 2003. Available at: <https://www.semantic-scholar.org/paper/Aphrons-key-in-depleted-reservoirs-Rea/b1df7a1baf5a0b56beffd6270076b5cf5cad4061#citing-papers> (accessed 27.08.2021).
12. Growcock F.B., Khan A.M., Simon G.A. Application of Water-Based and Oil-Based Aphrons in Drilling Fluids. *Materials of SPE International Sympo-*

Drilling Fluids // Oilfield Chemistry: Materials of SPE International Symposium. Houston, Texas, USA. 2003. Paper Number SPE-80208-MS. DOI: 10.2118/80208-MS.

13. Kinchen D., Peavy M.A., Brookey T., Rhodes D. Case history: Drilling Techniques Used in Successful Redevelopment of Low Pressure H₂S Gas Carbonate Formation // Materials of SPE/ IADC Drilling Conference. Amsterdam, Netherlands. 2001. Paper Number SPE-67743-MS. DOI: 10.2118/67743-MS.

14. Tadros T.F. Formulation of Disperse Systems. Singapore: Wiley-VCH, 2014. 504 p.

15. Save S.V., Pangarkar V.G. Characterisation of Colloidal Gas Aphrons // Chemical Engineering Communications. 1994. Vol. 127. P. 35-54.

16. Pasdar M., Kazemzadeh E., Kamari E., Ghazanfari M.H., Soleymani M. Insight into the Behavior of Colloidal Gas Aphron (CGA) Fluids at Elevated Pressures: an Experimental Study // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. Vol. 537. P. 250-258. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.10.001.

17. Vicker S., Cowie M., Jones T., Twynman A. A New Methodology that Surpassed Current Bridging Theories Efficiency Seal a Varied Pore Distribution as Found in Natural Reservoir Formation // Materials of AADE Drilling Fluids Technical Conference. Houston, Texas, USA. 2006. Paper Number AADE-06-DF-HO-16.

18. Narehei M.A., Shahri M.P., Zamani M. Preparation and Characterization of Colloid Gas Aphron Based Drilling Fluids Using a Plant-Based Surfactant // Saudi Arabia Section Technical: Materials of SPE Symposium and Exhibition. Al-Khobar, Saudi Arabia. 2012. Paper Number SPE-160888-MS. DOI: 10.2118/160888-MS.

19. Bjorndalen N., Kuru E. Stability of Microbubble-Based Drilling Fluids under Downhole Conditions // Journal of Canadian Petroleum Technology. 2008. Vol. 47. Issue 6. P. 40-46. Paper Number PETSOC-08-06-40. DOI: 10.2118/08-06-40.

20. Lye G.J., Stuckey D.C. Structure and Stability of Colloidal Liquid Aphrons // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1998. Vol. 131. Issue 1-3. P. 119-136. DOI: 10.1016/S0927-7757(96)03931-3.

21. Yan Y.L., Qu C., Zhang N., Yang Z., Liu L. A Study on the Kinetics of Liquid Drainage from Colloidal Gas Aphrons (CGAs) // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2005. Vol. 259. Issue 1-3. P. 167-172. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.02.028.

22. Feng W., Singhal N., Swift S. Drainage Mechanism of Microbubble Dispersion and Factors Influencing its Stability // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 337. Issue 2. P. 548-554. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.05.054.

23. Moshkelani M., Amiri M.C. Electrical Conductivity as a Novel Technique for Characterization of Colloidal Gas Aphrons (CGA) // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.

sium «Oilfield Chemistry». Houston, Texas, USA, 2003. Paper Number SPE-80208-MS. DOI: 10.2118/80208-MS.

13. Kinchen D., Peavy M.A., Brookey T., Rhodes D. Case history: Drilling Techniques Used in Successful Redevelopment of Low Pressure H₂S Gas Carbonate Formation. *Materials of SPE/ IADC Drilling Conference*. Amsterdam, Netherlands, 2001. Paper Number SPE-67743-MS. DOI: 10.2118/67743-MS.

14. Tadros T.F. *Formulation of Disperse Systems*. Singapore, Wiley-VCH, 2014. 504 p.

15. Save S.V., Pangarkar V.G. Characterisation of Colloidal Gas Aphrons. *Chemical Engineering Communications*, 1994, Vol. 127, pp. 35-54.

16. Pasdar M., Kazemzadeh E., Kamari E., Ghazanfari M.H., Soleymani M. Insight into the Behavior of Colloidal Gas Aphron (CGA) Fluids at Elevated Pressures: an Experimental Study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, Vol. 537, pp. 250-258. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.10.001.

17. Vicker S., Cowie M., Jones T., Twynman A. A New Methodology that Surpassed Current Bridging Theories Efficiency Seal a Varied Pore Distribution as Found in Natural Reservoir Formation. *Materials of AADE Drilling Fluids Technical Conference*. Houston, Texas, USA, 2006. Paper Number AADE-06-DF-HO-16.

18. Narehei M.A., Shahri M.P., Zamani M. Preparation and Characterization of Colloid Gas Aphron Based Drilling Fluids Using a Plant-Based Surfactant. *Materials of SPE Symposium and Exhibition «Saudi Arabia Section Technical»*. Al-Khobar, Saudi Arabia, 2012. Paper Number SPE-160888-MS. DOI: 10.2118/160888-MS.

19. Bjorndalen N., Kuru E. Stability of Microbubble-Based Drilling Fluids under Downhole Conditions. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2008, Vol. 47, Issue 6, pp. 40-46. Paper Number PETSOC-08-06-40. DOI: 10.2118/08-06-40.

20. Lye G.J., Stuckey D.C. Structure and Stability of Colloidal Liquid Aphrons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, Vol. 131, Issue 1-3, pp. 119-136. DOI: 10.1016/S0927-7757(96)03931-3.

21. Yan Y.L., Qu C., Zhang N., Yang Z., Liu L. A Study on the Kinetics of Liquid Drainage from Colloidal Gas Aphrons (CGAs). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, Vol. 259, Issue 1-3, pp. 167-172. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.02.028.

22. Feng W., Singhal N., Swift S. Drainage Mechanism of Microbubble Dispersion and Factors Influencing its Stability. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, Vol. 337, Issue 2, pp. 548-554. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.05.054.

23. Moshkelani M., Amiri M.C. Electrical Conductivity as a Novel Technique for Characterization of Colloidal Gas Aphrons (CGA). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, Vol. 317, Issue 1-3, pp. 262-269. DOI:

2008. Vol. 317. Issue 1-3. P. 262-269. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.10.034.

24. Sadeghialiabadi H., Amiri M.C. A New Stability Index for Characterizing the Colloidal Gas Aphronsdispersion // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015. Vol. 471. P. 170-177. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.01. 058.

25. Alizadeh A., Khamsehchi E. Stability Modeling of Water-Based Surfactant Covered Micro-Bubble Fluids // *Journal of Surfactants and Detergents*. 2016. Vol. 19. Issue 1. P. 165-171. DOI: 10.1007/s11743-015-1761-z.

26. Elizalde B.E., Pilosof A.M.R., Bartholomai G.B. Kinetics of Demulsification of Food Protein-Stabilized Oil-in-Water Emulsions // *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1989. Vol. 66. P. 1454-1458.

10.1016/j.colsurfa.2007.10.034.

24. Sadeghialiabadi H., Amiri M.C. A New Stability Index for Characterizing the Colloidal Gas Aphronsdispersion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, Vol. 471, pp. 170-177. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.01. 058.

25. Alizadeh A., Khamsehchi E. Stability Modeling of Water-Based Surfactant Covered Micro-Bubble Fluids. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2016, Vol. 19, Issue 1, pp. 165-171. DOI: 10.1007/s11743-015-1761-z.

26. Elizalde B.E., Pilosof A.M.R., Bartholomai G.B. Kinetics of Demulsification of Food Protein-Stabilized Oil-in-Water Emulsions. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1989, Vol. 66, pp. 1454-1458.

Информация об авторе

• Рабаев Руслан Уралович, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Геология и разведка
нефтяных и газовых месторождений»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 242-07-13
e-mail: r.u.rabaev@gmail.com

Information about the author

• Rabaev Ruslan U., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Geology and Exploration
of Oil and Gas Field Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
tel: (347) 242-07-13
e-mail: r.u.rabaev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.08.2021; одобрена после рецензирования 28.08.2021; принята к публикации 01.09.2021.

The article was submitted 18.08.2021; approved after reviewing 28.08.2021; accepted for publication 01.09.2021.