

БУРЕНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.2

УДК 622.244.49

© Николаев Н.И., Леушева Е.Л., 2014

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПониЖЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД И МЕТОДИК ВЫБОРА ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРОВЫХ РАБОТ

Н.И. Николаев, Е.Л. Леушева

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются различные способы понижения твердости (ослабления) горных пород и методики выбора поверхностно-активных веществ (ПАВ) для повышения эффективности буровых работ. Предметом исследования является массив горных пород повышенной твердости и влияние на него различных факторов. Цель работы – повышение эффективности разрушения горных пород повышенной твердости при бурении скважин. В данной работе описываются механические, термические и химические способы ослабления горных пород. Именно химические способы позволяют снижать твердость горных пород применением реагентов – понизителей твердости (детергентов). Основными реагентами-детергентами являются различные виды ПАВ. При анализе методик также представлены данные о влиянии различных растворов ПАВ на исследуемые параметры.

Существует достаточное количество способов повышения интенсификации процесса разрушения пород, но наиболее выгодным и надежным является применение реагентов-детергентов. Полученные результаты можно использовать при строительстве скважин, а именно при проектировании режима бурения, типа промывочной жидкости (с добавкой в нее определенного вида ПАВ в необходимой концентрации) и породоразрушающего инструмента.

Представленные в работе методики выбора ПАВ позволяют дать лишь качественную оценку влияния реагентов-детергентов, поэтому необходимо продолжить исследования по разработке методики количественной оценки влияния того или иного раствора на эффективность разрушения пород повышенной твердости.

Ключевые слова: горная порода, скважина, ослабление пород, деформация, методы бурения, реагенты-детергенты, поверхностно-активные вещества, физико-механические свойства горных пород, прочность породы, методика, электропроводность, буровой раствор, адсорбция, пульсирующая струя, разрушение.

ANALYSIS OF METHODS OF ROCK SOFTENING AND TECHNIQUES OF SURFACTANT SELECTION TO IMPROVE DRILLING OPERATIONS

N.I. Nikolaev, E.L. Leusheva

National Mineral Resources University (University of Mines),
Saint Petersburg, Russian Federation

The work is devoted to the different techniques of rock softening (loosening) and a method of selecting surfactants to increase drilling performance. Emphasis is placed on rock mass of higher hardness and influence of different factors. The aim is to improve efficiency of hard rock destruction in drilling wells. The paper describes mechanical, thermal and chemical techniques for rock softening. It is the latter that are capable to reduce hardness due to reagents-detergents. These are different surfactants. The analysis of different methods is supplemented with data on effects of the different surfactant solutions on the parameters analyzed.

There are a number of ways to intensify the rock destruction process but application of reagents-detergents proved to be the most advantageous and reliable. The results may be useful in well construction, i.e. in designing a drilling mode, a flush fluid (including adding specific surfactant in a required concentration) and rock destruction tools.

The given methods of selecting surfactants allow only qualitative assessment of detergent effects, hence it is a need to further research into development of the methods of quantitative assessment of the effects produced by different solutions in terms of higher hardness rock destruction.

Keywords: rock, well, rock softening, deformation, drilling techniques, reagents-detergents, surfactants, physical-mechanical properties of rocks, rock hardness, method, electroconductivity, mud fluid, adsorption, pulse jet, destruction.

Бурение скважин – сложный и дорогостоящий процесс, и нельзя точно сказать, что сложнее: проходка в глинистых пластичных породах, в слабосцементированных песках или же в разрезе, сложенном твердыми горными породами.

Существуют различные методы бурения, которые варьируются в зависимости от геологических условий, глубины и диаметра скважины, а также от ее назначения. Методы могут быть сгруппированы в две основные категории:

- 1) методы без циркуляции бурового раствора (такие как шнековое бурение);
- 2) методы с циркуляцией бурового раствора (роторное, турбинное бурение и т.д.) [1].

Очень много внимания уделено исследователями бурению в глинистых породах, предложены различные составы ингибирующих растворов и подробно изучен механизм набухания глин. Проблемам бурения в слабосцементированных породах также посвящено большое количество работ. Но в данной работе хотелось бы обратить внимание на процесс разрушения пород повышенной твердости, так как при бурении в твердых горных породах резко увеличиваются энергозатраты на разрушение породы на забое, что снижает эффективность бурения в целом. Для повышения показателей бурения необходим комплексный подход, в связи с этим задачей данной работы является анализ способов и средств интенсификации процесса разрушения горных пород на забое скважины.

Предварительное ослабление горных пород представляет собой процесс, при котором массив изменяет свои физико-механические свойства в сторону снижения показателей прочности. Так, в работе [2] способы ослабления горных пород с жесткими связями разделяются на пять классов: механические, термические, химические, биологические и технологические. Внутри каждого класса выделены подклассы по виду энергии с учетом способа ее подвода к забою.

Способы ослабления горных пород:

| Класс | Подкласс |
|----------------------------|--|
| Механическое ослабление | Нарезание или бурение щелей. Нагнетание воды в пласт под высоким давлением. Гидровзрывание. Рыхление поверхности массива |
| Термическое ослабление | Односторонний нагрев с использованием пламени газовой горелки, горячей воды, перегретого воздушного пара. Глубокое охлаждение жидким азотом. Использование знакопеременных температурных воздействий. Односторонний нагрев контактным способом (электроды, пластины). Нагрев по всему объему с помощью электромагнитных полей. Облучение лазером, радиоволнами, ультразвуком |
| Химическое ослабление | Применение поверхностно-активных веществ в качестве понизителей твердости. Растворение цементирующего вещества кислотами |
| Биологическое ослабление | – |
| Технологическое ослабление | Использование отжима. Насыщение массива газом |

В работе [3] представлена классификация возможных способов интенсификации разрушения горных пород. Рассмотрим основные из них:

1. Увеличение интенсивности – силы статической энергии (импульса) для динамического воздействия на породу. Увеличение интенсивности механического воздействия на крепкую породу ограничено рядом причин, в частности механической прочностью и износостойкостью самого рабочего инструмента. Поэтому представляется целесообразным увеличение интенсивности за счет гидродинамического воздействия. Непрерывная струя развивает напорное давление $p_n = \frac{\rho v^2}{2}$. Давление при гидравлическом ударе, возникающее в случае внезапного контакта воды с преградой:

$$p_y = \rho c v, \quad \frac{p_y}{p_n} = \frac{2c}{v}, \quad (1)$$

где c – скорость звука в воде.

Поскольку v обычно меньше $2c$, то пульсирующими струями можно создать намного более высокие давления, чем напорными при той же скорости вылета воды. Предварительные расчеты показывали достаточно высокую эффективность разрушения крепких горных пород пульсирующими струями при незначительных энергозатратах.

На основании этого способа авторами [4–6] разработан гидроударник, который позволяет за счет перекрытия потока бурового раствора снизить давление под породоразрушающим инструментом, что приводит к снижению прочности породы и увеличению скорости проходки, а также проведены стендовые и первичные исследования на прототипе компоновки, содержащей гидроударник, породоразрушающий инструмент.

2. Увеличение длительности ударного механического воздействия на породу. Этого можно добиться применением кратных (двойных, тройных и т.д.) ударов, начало действия каждого из последующих совпадает с окончанием действия предыдущего [7, 8].

3. Использование физико-механических свойств горных пород. Опыт из работы [3] показывает, что сопротивляемость горных пород одноосному сжатию и растяжению, а также сдвигу и изгибу удовлетворяет следующему неравенству:

$$\sigma_{сж} \gg \tau_{сдв} > \sigma_{изг} > \sigma_p. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует, что разрушение тела происходит при значительно меньших прилагаемых напряжениях сдвига и растяжения, чем сжатия. Следовательно, интенсификации и снижения энергоемкости процесса разрушения можно добиться, используя механизмы (и формы забоя), позволяющие большую часть забоя разрушать за счет деформаций сдвига и растяжения, а так-

же выбирая направление проходки с учетом текстурных свойств горных пород.

4. Рациональное использование напряженного состояния призабойной зоны и оптимальной формы забоя. Поскольку потеря устойчивости твердого тела происходит под действием поля внешних сил и внутренних напряжений, которые возникают от гравитационного действия вышележащих слоев пород и тектонических условий, то последний фактор при выборе оптимальных условий разрушений должен приниматься во внимание. Исследования в этом направлении показали, что величина и характер напряжений в призабойной зоне существенно зависят от формы забоя. В частности, при оконтуривании по периметру забоя выработки неглубокой щелью возникает распределение напряжений, позволяющее при значительной глубине залегания пород разрушать центр забоя практически без механических нагрузок.

5. Влияние температурного фактора. Изменение температуры меняет долговечность тела под нагрузкой и, следовательно, его прочность. Поскольку при разрушении мы имеем дело с неравномерным нагревом породы, изменение температуры сопровождается возникновением термонапряжений. Напряжение существенно влияет на прочность горной породы.

6. Создание предварительных внутренних напряжений. Использование термонапряжений для интенсификации проходки относится к комбинированным методам разрушения. При значительном тепловом потоке, дающем сильно-нестационарное температурное поле, возникают напряжения значительных растягивающих или скалывающих величин, благоприятных для разрушения.

Для создания большого теплового потока можно использовать такие установки, как лазеры, плазменные горелки и др. [3].

7. Изменение физико-механических свойств пород. При большой интенсив-

ности или скорости изменения физических полей, участвующих в разрушении, может наступать особый режим, связанный с возникновением необратимых превращений. Это изменение физико-механических свойств находит применение в некоторых термо- и электрофизических методах.

Существенным для интенсификации разрушения электрофизическими методами является изменение электрических свойств горных пород. Как известно, электропроводность пород возрастает благодаря фотоэффекту. Кроме того, проводимость возрастает под действием ионизирующего облучения. Последний факт после соответствующего исследования применительно к горным породам также мог бы быть использован для интенсификации разрушения электрофизическими методами.

8. Локализация «разрушающих» воздействий. Процесс разрушения можно описать выражением

$$E_p = \alpha S + \frac{\sigma^2}{2E} V, \quad (3)$$

где E_p – энергия разрушения; S – площадь образовавшейся новой поверхности; E – модуль Юнга; V – объем интенсивного нагружения тела напряжением σ .

Первая часть энергии αS переходит в разрушение, оставшаяся, пропорциональная объему V , бесполезно тратится. Поэтому значительного снижения энергоемкости и интенсификации разрушения можно достичь при уменьшении объема V интенсивного нагружения тела.

Увеличение температуры увеличивает вероятность разрушения тела, уменьшая его долговечность. Для объемного нагрева тела необходимо значительное количество энергии, поэтому много эффективней нагрев узлолокализованной области вдоль поверхности наиболее вероятного разрушения [3, 9].

9. Изменение поверхностной энергии горных пород. Уменьшение поверхностной энергии твердого тела экспоненци-

ально уменьшает его долговечность под нагрузкой, т.е. снижает его прочность.

Для практического уменьшения величины поверхностного натяжения твердого тела можно использовать:

– внутренний адсорбционный эффект, т.е. адсорбцию поверхностно-активных веществ на внутренних поверхностях раздела зародышевых микротрещин разрушения;

– эффект снижения величины поверхностного натяжения твердого тела при поляризации его в сильных электрических полях. Возможность практического использования этого эффекта требует исследований по его влиянию на прочностные свойства горных пород.

Важным фактором интенсификации процесса бурения горных пород является воздействие на них поверхностно-активных веществ. Поверхностно-активная среда влияет на характер деформации и разрушения твердых тел, главным образом в окрестностях острых (тупиковых) концов развивающихся трещин. Таким образом, в областях деформации твердого тела адсорбционное влияние среды приводит к изменению эффективной поверхностной энергии, приходящейся на единицу поверхности, что и обуславливает изменение прочностных свойств твердого тела. Применяемые при этом вещества – понизители твердости – получили название реагентов-детергентов [10–13].

Наибольшие адсорбционные эффекты имеют место тогда, когда возникающие в процессе разрушения новые поверхности успевают покрываться адсорбционными слоями. С этой точки зрения эффективность действия ПАВ при ударно-вращательном бурении и при бурении шарошечными долотами выше, чем при вращательном – коронками и режущими долотами.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что существуют различные методы интенсификации процесса разрушения горных пород, но не все

из них могут быть применены на практике. В связи с этим более подробно остановимся на изменении поверхностной энергии горных пород, т.е. применении поверхностно-активных веществ, и рассмотрим существующие методики выбора ПАВ для повышения эффективности разрушения твердых горных пород на забое скважины.

Как известно, поверхностно-активные вещества – это вещества с асимметричной молекулярной структурой, молекулы которых имеют дифильное строение, т.е. содержат лиофильные и лиофобные (обычно гидрофильные полярные группы и гидрофобные радикалы) атомные группы. Дифильная структура обуславливает поверхностную (адсорбционную) активность ПАВ, их способность концентрироваться и определенным образом ориентироваться на межфазных поверхностях раздела, понижая поверхностную энергию (поверхностное натяжение). Гидрофильные группы обеспечивают растворимость ПАВ в воде, гидрофобные (обычно углеводородные) при достаточной высокой молекулярной массе способствуют растворению ПАВ в неполярных средах. С помощью ПАВ можно влиять на энергетическое состояние и структуру межфазной поверхности и через нее регулировать свойства гетерогенных систем.

Совершенно ясно, что в отношении состава ПАВ, используемые в буровых растворах, можно классифицировать лишь в самых общих чертах [14]. Одни продукты являются смесями разных химических веществ, другие содержат одинаковые молекулы, отличающиеся молекулярной массой и деталями структуры. Химический состав продукта может быть вообще неизвестен – иногда прибегают к таким формулировкам, как «смесь сложных эфиров жирных и смоляных кислот» или «окисленный остаток жирных кислот из животных жиров». Таким образом, ПАВ следует определять по их применению, а не по составу.

По содержанию гидрофильных групп ПАВ можно разделить на анионоактивные, катионоактивные, неионогенные и амфотерные. К анионным группам относятся карбоксилаты, сульфаты, сульфаты и фосфаты, к катионным – амины, четвертичные аммонийные и другие азотные группы. Неионным группам способность растворяться придают гидроксильные группы и цепи оксида этилена. Амфотерные ПАВ содержат как основные, так и кислотные группы, а их поведение зависит от pH. Также выделяют в отдельную группу высокомолекулярные ПАВ с повторяющимися в макромолекуле полярными и неполярными звеньями.

Основное положение о том, что влияние внешней среды и адсорбирующихся веществ на деформацию и разрушение твердого тела обусловлено их проникновением в микротрещины на довольно значительную глубину в зоне предразрушения, развивающуюся в твердом теле в процессе его деформации, было подтверждено рядом работ лаборатории Коллоидо-электрохимического института Академии наук СССР еще более 30 лет назад [10]. Здесь необходимо отметить работы, в которых исследовались «элементарные акты» деформирования или разрушения отдельных кристаллов, были исследованы: раскалывание кристалликов кальцита по спайности, изгиб и другие деформации листочков слюды.

Было показано, что добавки адсорбирующих веществ в малых концентрациях, достаточных для насыщения адсорбционного слоя, понижают почти в два раза усилие раскалывания кристалликов кальцита толщиной в 1–2 мм (Н.Е. Маркова) по сравнению с величиной усилия раскалывания в чистой воде. Такое действие понизителей твердости значительно увеличивается при длительном вылеживании кристаллика в данной жидкости, особенно в нагруженном состоянии, близком к пределу прочности. Влияние времени пребывания в данной среде осо-

бенно возрастает при достижении наибольшей активности жидкости по отношению к твердому телу, т.е. при оптимальной концентрации понизителя твердости, что убедительно доказывает основную роль проникновения среды в зону предразрушения. Зона предразрушения в присутствии добавок понизителя твердости развивается, а трещиноватость в ней возрастает: микротрещины становятся глубже и их число в единице объема увеличивается. Это и вызывает наибольшее (в зависимости от концентрации) облегчение раскалывания кристалла, причем этот наибольший эффект достигается через более продолжительное время [10].

Важный теоретический вопрос о механизме действия активной среды и понизителей твердости в процессах разрушения твердых тел требовал дальнейшего выяснения и уточнения. С этим связано и дальнейшее развитие теории процессов механического разрушения с учетом активного действия среды и адсорбирующих добавок.

Лабораторией управления состоянием массива и физики взрыва Института горного дела им. А.А. Скочинского были проведены экспериментальные исследования по резанию песчаника резцами РПП и РКС-1 при одновременном воздействии на породу различными типами поверхностно-активных веществ [15].

Исследования выполнялись на стенде лаборатории механического разрушения горных пород Института горного дела им. А.А. Скочинского, оборудованном на базе продольно-строгального станка 7134, в суппорте которого закреплен тензометрический динамометр, жестко связанный с породоразрушающим резцом. На подвижном столе станка закреплялся испытываемый образец породы – песчаник кварцевый, мелкозернистый с глинистым цементом. Контактная прочность песчаника $P_k = 1050$ МПа, предел прочности на сжатие $G_{сж} = 85,0$ МПа.

Резание осуществлялось технически острыми резцами. Для уменьшения разброса получаемых результатов на режущей части державки резца РКС-1 снималась фаска под углом 60° , равным углу при вершине конуса твердосплавной головки, и таким образом резание осуществлялось только твердосплавной головкой резца РКС. Износ державки не сказывался на полученных результатах. Угол разворота резца РКС-1 $\beta = 20^\circ$. Резание производилось с постоянной скоростью $0,65$ м/с по повторной схеме в установленном режиме. Толщина стружки составляла 5 и 10 мм, а шаг резания соответственно 10 и 20 мм. Исследуемые жидкости подавались в зону резания перед резцом и позади него при рабочем ходе резца. Для каждой жидкости снималось три слоя (по глубине) по пяти зачетных резов в каждом, причем жидкость подавалась только при снятии первого слоя, второй и третий слои снимались без подачи жидкости.

Силовые показатели процесса резания регистрировались тензометрической станцией. Расшифровка осциллограмм осуществлялась планиметрированием. Было исследовано 65 различных растворов, всего обработано около 1700 резов.

Силовые показатели, полученные при резании сухого образца, составляют: для резца РПП среднее значение усилия резания $P_z = 5100$ Н, а усилия подачи $P_y = 10\,400$ Н, для резца РКС-1 $P_z = 4200$ Н и $P_y = 5100$ Н. При резании с одновременной обработкой породы жидкостью силовые параметры уменьшаются.

Наименьшее усилие резания получено при снятии первого слоя, а наименьшее усилие подачи – для третьего слоя. Однако коэффициент вариации показателей P_z и P_y по слоям составляет соответственно $5\text{--}11$ и $5\text{--}20$ %, причем разброс данных возрастает с увеличением концентрации раствора. Это связано с величиной критической концентрации мицеллообразования, при достижении которой понижается проникающая спо-

способность жидкостей, участвующих в процессе разрушения.

Таким образом, исследуемые растворы проникают в породу на глубину, равную как минимум трехкратной глубине резания, что позволило при обработке данных исследований объединить результаты замеренных усилий по всем слоям.

Из данных опытов были сделаны выводы, что усилие резания для резца РКС-1 снижается при малых концентрациях раствора почти в два раза. Такое же уменьшение наблюдается и для усилия подачи. С увеличением концентрации раствора до 0,5 % усилие резания снижается на 30 %, а усилие подачи становится на 20 % больше, чем при резании сухого образца. Подобное увеличение усилия подачи при одновременном уменьшении усилия резания объясняется повышением пластичности разрушаемой породы. Для резца РПП характер изменений усилий более плавный. При этом усилие резания уменьшается на 25–35 %, а усилие подачи на 10–15 %.

При изучении зависимостей усилий резания и подачи от концентрации раствора для различных типов низкомолекулярных ПАВ были сделаны выводы, что неионогенные ПАВ уменьшают усилие резания на 35 %, при этом усилие подачи увеличивается на 20–30 %; катионоактивные вещества снижают усилие резания на 45–48 % и подачи на 12–15 %; анионоактивные – соответственно на 54–58 и 20–22 %.

Результаты исследований [15] показали, что наиболее эффективными понизителями прочности являются анионоактивные ПАВ в щелочной среде, что хорошо согласуется с данными, полученными при изучении влияния ПАВ на контактную прочность песчаников.

Методы воздействия рабочего инструмента на горную породу можно разделить на статические и динамические. В работе [16] исследовалось влияние ПАВ на прочность пород при статическом воздействии.

Поскольку сопротивляемость горных пород разрушению в поверхностном слое при местном контактном воздействии существенно отличается от прочности, определяемой путем объемного разрушения образцов, то оценивали сопротивляемость с помощью показателя контактной прочности горной породы.

Испытания на контактную прочность [16] проводились на ручном гидравлическом прессе, обеспечивающем предельное усилие сжатия 5 т. Разрушающий инструмент выполнен в виде цилиндрического индентора из твердой шарикоподшипниковой стали площадью 3,8 мм, а нагрузка на образец определялась по показаниям тарировочного манометра. Испытания проводились на образцах песчаника из шахты «Петровская – Глубокая», имеющего контактную прочность в сухом состоянии 200–250 кг/мм².

Вдавливание индентора каждый раз производилось на новом участке поверхности образца. Расстояния между отдельными пунктами вдавливания выбирались с таким расчетом, чтобы лунки соседних выколов не соединялись между собой. Для оценки влияния ПАВ на контактную прочность на поверхность образца в местах вдавливания предварительно наносили капли исследуемого раствора. Время пропитки соответствовало времени оптимального технологического процесса при разрушении горных пород. Полученные величины сравнивались со значениями контактной прочности песчаника после предварительной пропитки его водой. Снижение прочности при воздействии ПАВ характеризовалось величиной

$$K = \left(\frac{\bar{P}_B - \bar{P}_{\text{ПАВ}}}{P_B} \right) 100 \%, \quad (4)$$

где \bar{P}_B – средняя величина контактной прочности песчаника после пропитки водой, кг/мм²; $\bar{P}_{\text{ПАВ}}$ – средняя величина контактной прочности песчаника после пропитки раствором ПАВ, кг/мм².

В экспериментах использовался 1%-ный раствор различных ПАВ. Это было вызвано тем, что ПАВ снижают поверхностное натяжение жидкости до какого-то предельного значения. Дальнейшее увеличение концентрации ПАВ практически не ведет к уменьшению поверхностного натяжения, а приводит к мицеллообразованию растворов некоторых ПАВ. Вследствие этого для большинства видов ПАВ существует рабочая зона концентраций их эффективного применения, которая находится в пределах 0,05–1 %.

Результаты исследований показали, что из анионоактивных ПАВ, можно выделить алкилсульфаты, а из неионогенных – синтаמיד-5 и ОП-7 как понизители прочности горных пород.

Исходя из выполненных исследований [16] были сформулированы следующие выводы:

- для повышения эффективности процесса разрушения горных пород необходимо постоянное присутствие адсорбируемого вещества в вершине развивающейся микротрещины, вследствие чего ПАВ должно быть низкомолекулярным соединением и обладать большой проникающей способностью;

- на снижение прочности породы существенно влияет степень взаимодействия молекул ПАВ с горной породой, поэтому необходимо подбирать вещества, обладающие природой молекулярных взаимодействий, близкой силам взаимодействия между атомами разрушаемой породы;

- статическое воздействие нагрузки недостаточно полно характеризует влияние ПАВ на процесс разрушения горных пород, поэтому необходимо продолжить поиск оптимальных механических воздействий для исследуемых ПАВ.

В другой работе по данной теме [12] определялись время седиментации частиц пород суспензии и время впитывания раствора ПАВ образцом породы.

При исследовании взаимодействия жидкости с поверхностью породы чрез-

вычайно важным является определение величины их взаимосвязи на межфазной границе. Непосредственное измерение этой величины не представляется возможным. Метод определения времени седиментации частиц пород в суспензии позволяет косвенным путем оценить степень этого взаимодействия. Авторами работы [12] разработан экспресс-метод определения времени впитывания раствора ПАВ образцом породы, характеризующий интенсивность их взаимодействия при смачивании. Минимальное время впитывания свидетельствует о способности жидкости к быстрому формированию адсорбционных слоев и их распространению по поверхности породы.

Определение времени седиментации частиц породы в растворе ПАВ осуществлялось на фотоэлектрокалориметре типа ФЭК-5М. Регистрация времени седиментации проводилась с помощью секундомера. Начало отсчета времени соответствует помещению суспензии в фотоэлектрокалориметр. При этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого значения. Окончание отсчета времени седиментации соответствует возвращению стрелки гальванометра в нулевое положение. Замеренное по секундомеру время является временем седиментации частиц породы в суспензии.

Определение времени впитывания жидкости образцом породы производилось на установке, состоящей из стеклянного капилляра диаметром 0,8 мм, стойки с прижимным винтом, с помощью которого капилляр фиксируется в вертикальном по отношению к плоскости впитывания положении, и подставки для размещения образца.

Результаты исследований:

- подбор понизителя прочности по времени седиментации показал, что наибольшее снижение горнотехнологических свойств пород наблюдается в присутствии тех растворов, для которых время седиментации максимальное.

– данные экспериментов по подбору понизителей прочности по времени впитывания раствора в образец породы показали наличие корреляционных связей между временем впитывания и горнотехнологическими свойствами пород [12].

Таким образом, по измеренному времени впитывания раствора ПАВ поверхностью породы, времени седиментации частиц породы в суспензии можно рассчитать прогнозное значение относительных горнотехнологических показателей при физико-химическом ослаблении массива. Тем самым можно оценить целесообразность применения того или иного ПАВ в качестве ослабляющей жидкости.

Оценка способности жидкости влиять на твердость горной породы по исходной величине электрического сопротивления рассматривается в работе [17]. По мнению авторов, такая оценка будет тем вернее, чем менее растворимы компоненты горной породы в жидкости (растворе). Будет изменяться и электропроводность твердой компоненты горной породы в контакте с водой и водными растворами.

В результате экспериментального исследования [17] влияния жидкостей с

различной начальной электропроводностью на характеристики горной породы был сделан вывод, что для облегчения разрушения горной породы при бурении скважин промывочная жидкость должна не только обеспечивать релаксацию неравновесного электризованного состояния, возникающего при разрушении горной породы, но и создавать на поверхности разрушаемых минералов молекулярные слои, снижающие трение между разрушенными минералами.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

– существует достаточное количество способов повышения интенсификации процесса разрушения пород, но повышение эффективности бурения с применением реагентов-детергентов является выгодным и надежным;

– представленные методики выбора ПАВ позволяют дать лишь качественную оценку влияния реагентов-детергентов, поэтому необходимо продолжить исследования в этом направлении и попытаться разработать методику количественной оценки влияния того или иного раствора на эффективность разрушения пород повышенной твердости.

Список литературы

1. Fortin S., Duncan D. Description of Drilling Methods, available at: <https://www.rgc.ca/?page=page&id=92> (дата обращения: 11.05.2014).
2. Калинин А.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин (курс лекций) / Рос. гос. геол.-развед. ун-т. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. – 848 с.
3. Теоретические предпосылки и возможные направления интенсификации процесса разрушения крепких горных пород / Ю.М. Синюков, А.А. Дихтяр, А.М. Криворучко [и др.] // Механизация и разрушение горных пород. – Киев: Наук. думка, 1974. – Вып. 2. – С. 288–296.
4. Tibbitts G.A., Long R.C., Miller B.E. World's First Benchmarking of Drilling Mud Hammer Performance at Depth Conditions // IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 26–28 February. SPE-74540-MS, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/74540-MS> (дата обращения: 7.05.2014).
5. Gill J.A. Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots // IADC/SPE Drilling Conference, 20–23 February. 11377-MS, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/11377-MS> (дата обращения: 7.05.2014).
6. Bejarano C.A. Case History – Application of a New PDC Bit Design in Deep Cretaceous and Jurassic Hard Formations in Southern Mexico // First International Oil Conference and Exhibition in Mexico, 31 August – 2 September. 102232-MS, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/102232-MS> (дата обращения: 12.05.2014).
7. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction // Master thesis / West Virginia University. – Morgantown, 2003. – 64 p.
8. Стеглянов Б.Л., Штейнерт В.А., Рахимов Р.М. Динамические составляющие породоразрушающих бурильных инструментов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – № 6. – С. 19–21.
9. Синев С.В. Механизм разрушения горных пород // Бурение и Нефть. – 2009. – № 11. – С. 25–28.
10. Ребиндер П.А., Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Понизители твердости в бурении (физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении). – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 199 с.
11. Надь А. Разупрочнение горных пород с помощью развития в них микротрещин при использовании ПАВ и электроразрядных технологий // Сб. VI Краев. конф. молодых ученых. – 2011. – С. 385–394.
12. Шоболова Л.П. К оценке эффективности воздействия поверхностно-активных веществ на породу // Физико-технические проблемы добычи и обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд-во АН СССР, 1980. – С. 137–141.
13. Шоболова Л.П. Методические указания по выбору поверхностно-активных веществ и исследованию их влияния на ослабление горных пород применительно к работе проходческих комбайнов / Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского. – М., 1983. – 11 с.
14. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
15. Кусов Н.Ф., Эдельштейн О.А., Шоболова Л.П. Разрушение крепких горных пород с применением ПАВ // Науч. тр. Ин-та горн. дела им. А.А. Скочинского. – 1982. – Вып. 212. – С. 71–76.
16. Дихтяр А.А., Криворучко А.М., Синюков Ю.М. Разрушение крепких горных пород с применением поверхностно-активных веществ // Механика и разрушение горных пород. – Киев: Наук. думка, 1972. – Вып. 2. – С. 283–288.
17. Евсеев В.Д., Елихин А.В. Возможности снижения агрегатной твердости горных пород // Инженер-нефтяник. – М.: Ай Ди Эс Дрилинг, 2012. – № 3. – С. 24–29.

References

1. Fortin S., Duncan D. Description of Drilling Methods, available at: <https://www.rgc.ca/?page=page&id=92> (accessed 11 May 2014).
2. Kalinin A.G. Burenie nefiannykh i gazovykh skvazhin [Drilling oil and gas wells]. Moscow: TsentrLitNefteGaz, 2008. 848 p.
3. Siniukov Iu.M., Dikhtiar A.A., Krivoruchko A.M. [et al.] Teoreticheskie predposylki i vozmozhnye napravleniia intensifikatsii protsessa razrusheniia krepkikh gornyykh porod [Theoretical background and possible directions of hard rock destruction intensification]. *Mekhanizatsiia i razrusheniie gornyykh porod*. Kiev: Naukova dumka, 1974, no. 2, pp. 288–296.
4. Tibbitts G.A., Long R.C., Miller B.E. World's First Benchmarking of Drilling Mud Hammer Performance at Depth Conditions. *IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 26–28 February. SPE-74540-MS*, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/74540-MS> (accessed 7 May 2014).
5. Gill J.A. Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots. *IADC/SPE Drilling Conference, 20–23 February. 11377-MS*, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/11377-MS> (accessed 7 May 2014).
6. Bejarano C.A. Case History – Application of a New PDC Bit Design in Deep Cretaceous and Jurassic Hard Formations in Southern Mexico. *First International Oil Conference and Exhibition in Mexico, 31 August – 2 September. 102232-MS*, available at: <http://dx.doi.org/10.2118/102232-MS> (accessed 12 May 2014).
7. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction. *Master thesis*. Morgantown: West Virginia University, 2003. 64 p.
8. Steklianov B.L., Shteinert V.A., Rakhimov R.M. Dinamicheskie sostavliaiushchie porodorazrushaiushchikh buril'nykh instrumentov [Dynamic units of rock destruction tools]. *Stroitel'stvo nefiannykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2008, no. 6, pp. 19–21.
9. Sinev S.V. Mekhanizm razrusheniia gornyykh porod [Rock destruction mechanism]. *Burenie i Neft'*, 2009, no. 11, pp. 25–28.
10. Rebinder P.A., Shreiner L.A., Zhigach K.F. Ponziteli tverdstoi v burenii (fiziko-khimicheskii metod oblegcheniia mekhanicheskogo razrusheniia tverdyykh gornyykh porod pri burenii) [Rock hardness reducers in drilling (a physicochemical method of facilitating mechanical destruction of rocks in drilling)]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1944. 199 p.
11. Nad' A. Razuprochnenie gornyykh porod s pomoshch'iu razvitiia v nikh mikrotrreshchin pri ispol'zovanii PAV i elektrorazriadnykh tekhnologii [Rock softening by producing microcracks coupled with surfactants and electric discharge technologies]. *Sbornik VI Krakovskoi konferentsii molodykh uchennykh*, 2011, pp. 385–394.
12. Shobolova L.P. K otsenke effektivnosti vozdeistviia poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na porodu [Evaluation of effective influence of surface-active substances on rock]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy dobychi i obogashcheniia poleznykh iskopaemykh*. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1980, pp. 137–141.
13. Shobolova L.P. Metodicheskie ukazaniia po vyboru poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i issledovaniu ikh vliianiia na oslablenie gornyykh porod primenitel'no k rabote prokhodcheskikh kombainov [Guidelines for selection of surface-active substances and research of their effects on rock softening in regard to entry-driving machine operation]. Moscow: Institut gornogo dela imeni A.A. Skochinskogo, 1983. 11 p.
14. Grei Dzh.R., Darli G.S.G. Sostav i svoistva burovyykh agentov (promyvochnyykh zhidkostei) [Composition and properties of drilling agents]. Moscow: Nedra, 1985. 509 p.
15. Kusov N.F., Edel'shtein O.A., Shobolova L.P. Razrushenie krepkikh gornyykh porod s primeneniem PAV [Hard rock destruction by SAS]. *Nauchnye trudy Instituta gornogo dela imeni A.A. Skochinskogo*, 1982, no. 212, pp. 71–76.
16. Dikhtiar A.A., Krivoruchko A.M., Siniukov Iu.M. Razrushenie krepkikh gornyykh porod s primeneniem poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Hard rock destruction by surface-active substances]. *Mekhanika i razrusheniie gornyykh porod*. Kiev: Naukova dumka, 1972, no. 2, pp. 283–288.
17. Evseev V.D., Epikhin A.V. Vozmozhnosti snizheniia agregatnoi tverdstoi gornyykh porod [Possibilities of aggregate hardness reduction in rocks]. *Inzhener-neftianik*. Moscow: Ai Di Es Drilling, 2012, no. 3, pp. 24–29.

Об авторах

Николаев Николай Иванович (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры бурения скважин Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 21-я линия, 2; e-mail: nikinik@mail.ru).

Леушева Екатерина Леонидовна (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, ассистент кафедры бурения скважин Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 21-я линия, 2; e-mail: Leusheva.ekaterina@mail.ru).

About the authors

Nikolai I. Nikolaev (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Well Drilling, National Mineral Resources University (University of Mines) (199106, Saint Petersburg, Vasilevsky Island, Line 21st, 2; e-mail: nikinik@mail.ru).

Ekaterina L. Leusheva (Saint Petersburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Assistant, Department of Well Drilling, National Mineral Resources University (University of Mines) (199106, Saint Petersburg, Vasilevsky Island, Line 21st, 2; e-mail: Leusheva.ekaterina@mail.ru).

Получено 01.08.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Анализ способов понижения твердости горных пород и методик выбора поверхностно-активных веществ для повышения эффективности буровых работ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 12–21. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.2.

Please cite this article in English as:

Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Analysis of methods of rock softening and techniques of surfactant selection to improve drilling operations. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 12, pp. 12–21. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.2.