БУРЕНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5

УДК 622.244.49

© Николаев Н.И., Леушева Е.Л., 2015

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД¹

Н.И. Николаев, Е.Л. Леушева

Минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются способы ослабления горных пород 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. Существуют различные способы ослабления горных пород, основные из которых механические, термические, химические, биологические и технологические.

Анализ результатов исследований позволил сделать выводы, что при разрушении горных пород целесообразнее применять такие поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые будут лучше растекаться по поверхности, т.е. иметь наименьший краевой угол смачивания и низкие значения поверхностного натяжения (это позволит буровому раствору с добавкой в него ПАВ глубже проникать в образовавшиеся микротрещины, создавая расклинивающее давление на их внутреннюю поверхность); что необходимо стремиться к понижению удельного электрического сопротивления буровых растворов и что при выборе бурового раствора необходимо проводить исследования по замеру основных прочностных свойств горных пород (например, предела прочности (временного сопротивления), микротвердости, динамической прочности).

Сделана попытка оценить влияние некоторых физических свойств водных растворов поверхностно-активных веществ на изменение физико-механических характеристик твердых пород и на этой основе разработать методику количественной оценки разупрочняющего действия промывочной жидкости на буримые горные породы, состоящую из пяти последовательных этапов, включающих определение основных показателей свойств бурового раствора и буримой горной породы.

Результаты, полученные по методике количественной оценки разупрочняющего действия промывочной жидкости на буримые горные породы, свидетельствуют о том, что исследуемые анионактивные ПАВ имеют высокий коэффициент эффективности разрушения горной породы. Наилучшие результаты получены при использовании 0,1%-ного водного раствора лаурилсульфата натрия.

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

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HARD ROCK DRILLING EFFICIENCY

N.I. Nikolaev, E.L. Leusheva

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

The paper suggests some techniques of rock loosening to improve drilling operations. The subject of the research is rock mass of high hardness and influence of several factors. The aim is to improve breaking of hard rock during well drilling. There are several techniques of rock loosening, amongst which are mechanical, thermal, chemical, biological and technological.

The analysis made allows us to conclude that rock breaking may be fostered by applying surfactants that may spread better, i.e. those with minimum contact angle and low values of surface tension (this gets drill fluid with the surfactant to penetrate more deeply into the microfractures formed, thus producing wedging pressure on the internal surface); that it is crucial to lower specific electric resistance of drilling fluids and that selection of a drilling fluid requires evaluating the main strength properties of the rock (e.g. break-down point (ultimate stress), microhardness, dynamic strength).

An attempt has been made to assess effects of certain physical properties of water solutions of surfactants on physical and mechanical rock properties and to develop a method of quantitative assessment of loosening effects of a flushing fluid on the drilled rock, consisting of five stages, including identification of the general values of drill fluid properties and the rock drilled.

The results obtained by the method of quantitative assessment of the flushing fluid's loosening effects on the rock drilled demonstrate that the anion-active surfactants under investigation possess a high rock breaking efficiency factor. The best results are acquired by applying sodium lauryl sulfate (0.1% water solution).

Keywords: rock, rock loosening, microfractures, well, deformation, drilling methods, reagents-detergents, surfactants, physical and mechanical properties of rock, rock strength, method, electric conductivity, drill fluid, adsorption, rock breaking.

¹ Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-4410.2015.5.

Технические и экономические показатели бурения твердых горных пород во многом зависят от совершенства технологии промывки скважин, состава и свойств буровых растворов, их физико-химической обработки и их соответствия буримым породам.

В связи с этим создание композиций буровых растворов с добавками реагентов – понизителей твердости (детергентов) горных пород представляется весьма актуальной задачей, особенно при бурении глубоких скважин.

Следует отметить, что порода высокой твердости мало изменяет свои механические свойства под влиянием высоких давлений и температур, имеющих место на больших глубинах. Наоборот, осадочные породы невысокой твердости и плотности на больших глубинах под влиянием высоких давлений и температуры уплотняются и твердость их может увеличиться в 3–4 раза, в соответствии с чем изменится и их буримость.

Известно, что с уменьшением плотности промывочной жидкости повышается механическая скорость проходки. Если заменить глинистый раствор водой, скорость бурения увеличивается на 20–30 %. Еще большее увеличение (в 2–5 раз) скорости бурения дает замена промывочной жидкости газом [1]. Это указывает на необходимость исследований

в области применения буровых растворов пониженной плотности на основе различных полимеров.

Предварительное ослабление горных пород представляет собой процесс, при котором массив изменяет свои физико-механические свойства в сторону снижения показателей прочности [2]. В работе [3] 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.

Уменьшение поверхностной энергии твердого тела экспоненциально уменьшает его долговечность под нагрузкой [4], 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.

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

Важным фактором интенсификации процесса бурения горных пород является воздействие на них поверхностно-активных веществ [5–8]. 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 проводит к изменению эффективной поверхностной энергии, приходящейся на единицу поверхности, что и обуславливает изменение прочностных свойств твердого тела.

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 [9].

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, развивающейся в твердом теле в процессе его деформации, было подтверждено рядом работ лаборатории Коллоидо-электрохимического института Академии наук СССР [5]. 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. Мар-

кова) 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 особенно 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 при наличии 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 [5].

Результаты исследований [10] 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 [11] исследовалось влияние ПАВ на прочность пород при статическом воздействии.

Анализ результатов исследований, проведенных ранее исследователями в области разрушения горных пород, позволил сделать следующие выводы:

– при разрушении горных пород целесообразнее применять такие поверхностно-активные вещества, которые будут лучше растекаться по поверхности, т.е. иметь наименьший краевой угол смачивания и низкие значения поверхностного натяжения, это позволит бурово-

му раствору с добавкой в него ПАВ глубже проникать в образовавшиеся микротрещины, создавая расклинивающее давление на их внутреннюю поверхность;

– для повышения эффективности разрушения породы на забое необходимо стремиться к понижению удельного электрического сопротивления буровых растворов;

– при выборе бурового раствора необходимо проводить исследования по замеру основных прочностных свойств горных пород (например, предела прочности (временного сопротивления), микротвердости, динамической прочности).

В процессе экспериментальных исследований краевого угла смачивания (при помощи системы анализа формы капли EasyDrop) использовались следующие виды водных растворы ПАВ, концентрацией 0,05 и 0,1 % (увеличение концентрации ПАВ в растворе не приводит к значительному снижению исследуемых параметров):

– анионоактивные ПАВ – линейный алкилбензолсульфонат натрия (ЛАБС натрия);

– катионоактивный ПАВ – катамин-АБ;

– неионогенный ПАВ – ОП-7.

На рис. 1 представлены результаты исследования краевого угла смачивания на поверхности образца твердой горной породы.

Рис. 1. Значение краевого угла смачивания на поверхности образца для водных растворов ПАВ

Из рисунка видно, что наименьшие краевые углы смачивания имеют водные растворы анионоактивных и неионогенных ПАВ, при их концентрации 0,05 % краевой угол смачивания уменьшается на 45 %, а при увеличении концентрации до 0,1 % снижение достигает 60 %.

Также исследовалась твердость горных пород на установке УМГП-3. Диаграммы деформации получали при внедрении штампа площадью 0,95 мм² в образец в сухом состоянии и при непосредственном контакте с ПАВ. Для каждого ПАВ снимались три диаграммы и рассчитывались средние значения основных параметров. На рис. 2 и 3 представлены диаграммы деформации горной породы при воздействии различных ПАВ.

Рис. 2. Диаграммы деформации образца горной породы в среде ПАВ с концентрацией 0,05 %

Рис. 3. Диаграммы деформации образца горной породы в среде ПАВ с концентрацией 0,1 %

Из них следует, что все виды ПАВ снижают нагрузку, необходимую для разрушения образца, причем при концентрации ПАВ 0,05 % это снижение составляет в среднем 25 %, а с увеличением концентрации ПАВ до 0,1 % снижение нагрузки превышает 40 % для анионоактивных ПАВ.

Очевидно, что удельная работа разрушения определяется площадью, ограниченной диаграммой деформации в пределах упругости. Результаты соответствующих расчетов удельной работы представлены на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость работы упругой деформации от концентрации ПАВ

Из графиков видно, что при малых концентрациях (0,05 %) все виды ПАВ уменьшают работу деформации породы примерно на 40 %. С увеличением концентрации до 0,1 % анионоактивные ПАВ снижают работу упругих сил почти в три раза, а увеличение концентрации неионогенных и катионоактивных ПАВ на этот показатель практически не влияет.

Аналогичная зависимость наблюдается при анализе влияния ПАВ на твердость горных пород (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость твердости породы от концентрации ПАВ

Так, при концентрациях ПАВ 0,05 % снижение твердости составляет в среднем 25 % для всех исследуемых ПАВ, а с увеличением концентрации до 0,1 % понижение твердости наблюдается при воздействии на породу только анионоак-

тивными ПАВ, и этот показатель уменьшается более чем на 40 %.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования анионоактивных ПАВ в составах разрабатываемых буровых растворов в качестве детергентов.

Известно [6–8, 12–14], что буровые растворы оказывают наибольшее положительное влияние на эффективность разрушения пород на забое скважины посредством своей способности препятствовать смыканию микротрещин, образовавшихся при ударе элементов вооружения долота. Это достигается уменьшением поверхностной энергии на поверхности трещины и снижением угнетающего гидравлического давления на забой скважины.

Снижение поверхностной энергии обеспечивается образованием поверхностного слоя на границе раздела фаз. Мера недокомпенсированности межмолекулярных сил в поверхностном слое, или иначе – избыточную свободную энергию, количественно можно оценить величиной поверхностного натяжения и удельного электрического сопротивления жидкой фазы. Очевидно, что снижения давления на забой можно добиться лишь снижением плотности бурового раствора.

Исходя из вышесказанного авторами сделана попытка оценить влияние некоторых физических свойств водных растворов поверхностно-активных веществ на изменение физико-механических характеристик твердых пород и на этой основе разработать методику количественной оценки разупрочняющего действия промывочной жидкости на буримые горные породы, состоящую из пяти последовательных этапов, включающих определение основных показателей свойств бурового раствора и буримой горной породы.

Так, понижение прочности горной породы на забое скважины (ΔP_p) можно выразить через функцию следующих физических свойств раствора:

$$\Delta P_p = f(\sigma_{п.н}, R_p, \rho_p), \quad (1)$$

где $\sigma_{п.н}$ – поверхностное натяжение раствора, мН/м; R_p – удельное электрическое сопротивление раствора, Ом·м; ρ_p – плотность раствора, г/см³.

Очевидно, что уменьшение этих показателей способствует сохранению микротрещин в породе после снятия нагрузки.

Этап I. Определение плотности раствора, поверхностного натяжения и удельного электрического сопротивления. Для измерения плотности промысловой жидкости используется ареометр АБР-1, рычажные весы.

Поверхностное натяжение замеряется при помощи системы анализа формы капли EasyDrop, предназначенной для измерения поверхностного натяжения жидкостей, межфазного натяжения между двумя жидкостями, а также для измерения краевого угла смачивания между жидкостью и твердой поверхностью [15].

Удельное электрическое сопротивление раствора определяется ризистивиметром, который состоит из измерительного блока и измерительной ячейки, в которую заливается исследуемый раствор.

Этап II. Расчет относительных коэффициентов поверхностного натяжения, удельного электрического сопротивления, плотности раствора и интегрального показателя свойств раствора.

Влияние различных ПАВ в составе бурового раствора на физико-механические свойства горных пород можно количественно оценить через интегральный показатель свойств раствора:

$$K_p = \frac{K_1 + K_2}{2\rho_0}, \quad (2)$$

где K_1 – относительное поверхностное натяжение; K_2 – относительное удельное электрическое сопротивление раствора; ρ_0 – относительная плотность бурового раствора.

Поскольку интегральный показатель является безразмерной величиной, то входящие в него коэффициенты соответственно будут

$$K_1 = \frac{\sigma_{п.н}^B}{\sigma_{п.н}^P}, \quad K_2 = \frac{R_B}{R_P}, \quad \rho_0 = \frac{\rho_B}{\rho_P}, \quad (3)$$

где $\sigma_{п.н}^B, \sigma_{п.н}^P$ – поверхностное натяжение воды и исследуемого раствора на поверхности образца; R_B, R_P – удельное электрическое сопротивление воды и исследуемого раствора; ρ_B, ρ_P – плотность воды и исследуемого раствора соответственно.

Анализ уравнений (2) и (3) показывает, что с уменьшением поверхностного натяжения раствора $\sigma_{п.н}^P$ по отношению к поверхностному натяжению воды $\sigma_{п.н}^B$ значение K_p увеличивается. То же самое можно сказать и об удельном электрическом сопротивлении. Снижение плотности раствора ρ_p приводит к уменьшению относительной плотности ρ_0 и, соответственно, к росту интегрального показателя свойств раствора K_p .

Этап III. Исследование основных физико-механических свойств горной породы.

Временное сопротивление (предел прочности) образца горной породы при одноосном сжатии определяется на прессе Controls. Динамическая прочность определяется методом толчения на приборе определения крепости (ПОК).

Измерение твердости по методу Л.А. Шрейнера производится на приборе УМГП-3. Процесс определения твердости и связанных с нею физико-технических свойств горных пород включает внедрение в образец горной породы стального или твердосплавного пуансона, получение диаграммы деформации пород и расчет по ней соответствующих характеристик.

Этап IV. Расчет изменения временного сопротивления, динамической проч-

ности и микротвердости пород и среднего удельного критерия прочности.

Физико-механические свойства буримых горных пород в лабораторных условиях можно оценить при испытании образцов керна на одноосное сжатие, динамическую прочность и микротвердость, как некий удельный критерий прочности:

$$\sigma_{\text{пр}} = f(\sigma_{\text{п}}, F_{\text{д}}, P_{\text{тв}}), \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ – предел прочности (временное сопротивление) породы, МПа; $F_{\text{д}}$ – динамическая прочность породы; $P_{\text{тв}}$ – микротвердость породы, 10^6 Н/м^2 .

Тогда средний удельный критерий прочности породы можно представить в виде

$$K_{\text{п}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{п}} + \Delta F_{\text{д}} + \Delta P_{\text{тв}}}{3}, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma_{\text{п}}$, $\Delta F_{\text{д}}$, $\Delta P_{\text{тв}}$ – относительный предел прочности, относительная динамическая прочность и относительная микротвердость породы:

$$\Delta\sigma_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{п}}^{\text{р}}}{\sigma_{\text{п}}^{\text{в}}}, \quad \Delta F_{\text{д}} = \frac{F_{\text{д}}^{\text{р}}}{F_{\text{д}}^{\text{в}}}, \quad \Delta P_{\text{тв}} = \frac{P_{\text{тв}}^{\text{р}}}{P_{\text{тв}}^{\text{в}}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{п}}^{\text{р}}$, $\sigma_{\text{п}}^{\text{в}}$ – предел прочности образца породы в воде и в среде исследуемого раствора; $F_{\text{д}}^{\text{р}}$, $F_{\text{д}}^{\text{в}}$ – динамическая прочность образца породы в воде и среде исследуемого раствора; $P_{\text{тв}}^{\text{р}}$, $P_{\text{тв}}^{\text{в}}$ – микротвердость образца породы в воде и среде исследуемого раствора.

Из уравнений (5) и (6) следует, что чем больше снижаются прочностные показатели породы в среде раствора ($\sigma_{\text{п}}^{\text{р}}$, $F_{\text{д}}^{\text{р}}$, $P_{\text{тв}}^{\text{р}}$), тем интенсивнее уменьшается удельный критерий прочности породы $K_{\text{п}}$.

Этап V. Расчет коэффициента эффективности разрушения. Очевидно, что чем больше значение $K_{\text{р}}$ и меньше $K_{\text{п}}$, тем эффективнее разрушение породы.

Для формализации полученных результатов расчетов по уравнениям (2) и (5) введем понятие коэффициента эффективности разрушения, которое связывает физические свойства раствора через параметр $K_{\text{р}}$ с физико-механическими характеристиками породы $K_{\text{п}}$:

$$K_{\text{э,р}} = \frac{K_{\text{р}}}{K_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $K_{\text{э,р}}$ – коэффициент эффективности разрушения.

В результате проведения исследований по представленной методике получаем коэффициент эффективности разрушения, с помощью которого количественно оцениваем, как влияет тот или иной раствор на процесс разрушения горной породы.

Для оценки применимости разработанной методики на практике были проведены исследования влияния анионоактивных ПАВ на разрушение горных пород. Использовался линейный алкилбензол натрия, лаурилсульфат натрия и ацетат калия. Образец горной породы представлен диабазом.

Этап I. Плотность исследуемых водных растворов ПАВ равна 1 г/см^3 , значения поверхностного натяжения представлены на рис. 6, удельное электрическое сопротивление – ниже.

Рис. 6. Значение поверхностного натяжения на границе раствор – образец породы для водных растворов анионоактивных ПАВ

Показатели удельного электрического сопротивления растворов

Вода (водопроводная)	Раствор ацетата калия 0,1%	Раствор лаурилсульфата натрия 0,1%	Раствор ЛАБС натрия 0,1%
107,1	35,3	61,7	80,6

Таблица 1

Результаты расчета интегрального показателя свойств раствора

Показатели	Вода	Раствор ацетата калия 0,1 %	Раствор лаурилсульфата натрия 0,1 %	Раствор ЛАБС натрия 0,1 %
K_1	1	1,45	2,68	1,78
K_2	1	3,04	1,73	1,33
ρ_0	1	1	1	1
K_p	1	2,245	2,205	1,56

Этап II. Расчет коэффициентов, необходимых для получения интегрального показателя свойств раствора и расчет самого показателя приводится в табл. 1.

Этап III. Исследование основных физико-механических свойств горной породы. На рис. 7 и 8 представлены зависимости предела прочности (временного

Рис. 7. Зависимость предела прочности горной породы от вида ПАВ

Рис. 8. Зависимость динамической прочности горной породы от вида ПАВ

Рис. 9. Гистограмма изменения твердости образца породы в среде водных растворов анионоактивных ПАВ

сопротивления) и динамической прочности образца горной породы от вида ПАВ.

Данные об изменении микротвердости представлены в гистограмме на рис. 9.

Этап IV. Расчет относительного предела прочности (временного сопротивления), динамической прочности и микротвердости образца породы и среднего удельного критерия прочности представлен в табл. 2.

Этап V. Расчет коэффициента эффективности разрушения приведен в табл. 3

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что исследуемые анионоактивные ПАВ имеют самый высокий коэффициент эффективности разрушения горной породы, из них наилучшие результаты получены при использовании 0,1%-ного водного раствора лаурилсульфата натрия.

Таблица 2

Результаты расчета среднего удельного критерия прочности

Показатели	Вода	Раствор ацетата калия 0,1 %	Раствор лаурилсульфата натрия 0,1 %	Раствор ЛАБС натрия 0,1 %
Изменение предела прочности $\Delta\sigma_n$	1	0,782	0,700	0,792
Изменение динамической прочности ΔF_d	1	0,867	0,812	0,844
Изменение микротвердости ΔP_{tw}	1	0,741	0,746	0,891
Средний удельный критерий прочности K_n	1	0,797	0,753	0,859

Таблица 3

Расчет коэффициента эффективности разрушения

Показатели	Вода	Раствор ацетата калия 0,1 %	Раствор лаурилсульфата натрия 0,1 %	Раствор ЛАБС натрия 0,1 %
Интегральный показатель свойств раствора K_p	1	2,245	2,205	1,56
Средний удельный критерий прочности K_n	1	0,797	0,753	0,859
Коэффициент эффективности разрушения $K_{3,p}$	1	2,82	2,93	1,82

Список литературы

1. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов. – М.: Недра, 1994. – 264 с.
2. Теоретические предпосылки и возможные направления интенсификации процесса разрушения крепких горных пород / Ю.М. Синюков, А.А. Дихтяр, А.М. Криворучко, Л.Д. Шматовский // Механика и разрушение горных пород. – Киев: Наукова думка, 1972. – Вып. 2. – С. 288–296.
3. Калинин А.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин (курс лекций) / Рос. гос. геол.-развед. ун-т. – М.: ЛитНефтеГаз, 2008. – 848 с.
4. Gill J.A. Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots // IADC/SPE Drilling Conference, 20–23 February 1983, New Orleans, Louisiana. – New Orleans, 1983. DOI:10.2118/11377-MS
5. Ребиндер П.А., Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Понижители твердости в бурении (физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении). – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 199 с.
6. 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.
7. 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.
8. Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Бурение шпуров с промывкой и добавками понизителей твердости. – М., Л.: Изд-во АН СССР, 1943. – С. 7–53.
9. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction: Master's Thesis / West Virginia University, 2003, available at: <http://hdl.handle.net/10450/2928> (дата обращения: 10.02.2015).
10. Надь А. Разупрочнение горных пород с помощью развития в них микротрещин при использовании ПАВ и электроразрядных технологий // Сб. VI Краков. конф. мол. ученых. – Краков, 2011. – С. 385–394.
11. Дихтяр А.А., Криворучко А.М., Синюков Ю.М. Разрушение крепких горных пород с применением поверхностно-активных веществ // Механика и разрушение горных пород. – Киев: Наукова думка, 1972. – Вып. 2. – С. 283–288.
12. Lummus J.L., Ray J.L. Low-solids mud scores four ways // Oil and gas J. – 1963. – Vol. 61, № 6. – P. 117–120.
13. Gao H., Liu H. Concept Design for Drilling Fluid Cooling System [J] // Oil Field Equipment. – 2007. – № 36(6). – P. 31–32.
14. Kawale D. Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification. MSc. Thesis / University of Technology of Applied Sciences, Department of Multi-Scale Physics. – Delft, 2012. – 97 p.
15. Система анализа формы капли «EasyDrop». Руководство по применению / KRUSS, GmbH. – Hamburg, 2007. – 147 с.

References

1. Spivak A.I., Popov A.N. Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin [Rock breaking in well drilling]. Moscow: Nedra, 1994. 264 p.
2. Siniukov Yu.M., Dikhtiar A.A., Krivoruchko A.M., Shmatovskii L.D. Teoreticheskie predposylki i vozmozhnye napravleniia intensifikatsii protsessa razrusheniia krepkikh gornykh porod [Theoretical background and possible avenues of intensification of hard rock breaking]. *Mekhanika i razrushenie gornykh porod*. Kiev: Naukova dumka, 1972, iss. 2, pp. 288–296.
3. Kalinin A.G. Burenii nefiiankhi i gazovykh skvazhin (kurs lektzii) [Oil and has well drilling (course of lectures)]. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi geologo-razvedochnyi universitet, 2008. 848 p.
4. Gill J.A. Hard Rock Drilling Problems Explained by Hard Rock Pressure Plots. *IADC/SPE Drilling Conference*, 20–23 February, New Orleans, Louisiana, 1983. DOI:10.2118/11377-MS
5. Rebinder P.A., Shreiner L.A., Zhigach K.F. Poniiziteli tverdsti v burenii (fiziko-khimicheskii metod oblegcheniia mekhanicheskogo razrusheniia tverdykh gornykh porod pri burenii) [Rock hardness reducers in drilling (physical-chemical method of facilitating mechanical breaking of hard rock in drilling)]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1944. 199 p.
6. Shobolova L.P. K otsenke effektivnosti vozdviiaia poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na porodu [On efficiency of rock stimulation by surfactants]. *Fiziko-tehnicheskie problemy dobychi i obogashcheniia poleznykh iskopaemykh*. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1980, pp. 137–141.
7. Shobolova L.P. Metodicheskie ukazaniia po vyboru poverkhnostno-aktivnykh veshchestv i issledovaniu ikh vliianiia na oslablenie gornykh porod primenitel'no k rabote prokhodcheskikh kombinov [Guidelines for selection of surfactants and research of their effects on rock loosening for boring machine operations]. Moscow: Institut gornogo dela imeni A.A. Skochinskogo, 1983. 11 p.

8. Shreiner L.A., Zhigach K.F. Burenie shpurov s promyvkoj i dobavkami ponizitelei tverdsti [Bore hole drilling with flushing and hardness reducers]. Moscow, Leningrad: Akademiia nauk SSSR, 1943, pp. 7-53.
9. Qayyum R.A. Effects of bit geometry in multiple bit-rock interaction. Master's Thesis. West Virginia University, 2003, available at: <http://hdl.handle.net/10450/2928> (accessed 10 February 2015).
10. Nad' A. Razuprochnenie gornykh porod s pomoshch'iu razvitiia v nikh mikrotreshchin pri ispol'zovanii PAV i elektrorazriadnykh tekhnologii [Rock loosening by stimulating microfracturing with surfactants and electric-discharge technology]. *Sbornik VI Krakovskoi konferentsii molodykh uchennykh*. Krakov, 2011, pp. 385-394.
11. Dikhtiar A.A., Krivoruchko A.M., Siniukov Iu.M. Razrushenie krepkikh gornykh porod s primeneniem poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Hard rock breaking with surfactants]. *Mekhanika i razrushenie gornykh porod*. Kiev: Naukova dumka, 1972, iss. 2, pp. 283-288.
12. Lummus J.L., Ray J.L. Low-solids mud scores four ways. *Oil and gas J.*, 1963, vol. 61, no. 6, pp. 117-120.
13. Gao H., Liu H. Concept Design for Drilling Fluid Cooling System [J]. *Oil Field Equipment*, 2007, no. 36(6), pp. 31-32.
14. Kawale D. Influence of dynamic surface tension on foams: Application in gas well deliquification: MSc. Thesis. Delft University of Technology of Applied Sciences, Department of Multi-Scale Physics, 2012. 97 p.
15. Sistema analiza formy kapli "EasyDrop". Rukovodstvo po primeneniiu [The EasyDrop system of drop shape analysis. User guide]. Hamburg: KRUS, GmbH, 2007. 147 p.

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 author

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

Ekaterina L. Leusheva (Saint Petersburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Lecturer, Department of Well Drilling, National Mineral Resources University (Mining University) (199106, St. Petersburg, 21st Line, Vasil'evskii island, 2; e-mail: Leusheva.ekaterina@mail.ru).

Получено 04.03.2015

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Н.И. Николаев, Е.Л. Леушева. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности бурения твердых горных пород // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 38–47. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5

Please cite this article in English as:

Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Theoretical and experimental investigation of hard rock drilling efficiency. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no. 15, pp. 38-47. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.5