



УДК 622.143+544.47

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БУРЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ ЭЛЕКТРОЛИТОВ И ПАВ



### IMPROVING THE EFFICIENCY OF ROCK DRILLING BY USING PROCESS MEDIA CONTAINING AQUEOUS SOLUTIONS OF ELECTROLYTES AND SURFACTANTS

**Савенко Владислав Ильич**

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт физической химии  
и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.  
visavenko@rambler.ru

**Savenko Vladislav Ilyich**

Ph.D. in physics and mathematics,  
leading researcher,  
Institute of Physical Chemistry  
and Electrochemistry  
named after A.N. Frumkin RAS.  
visavenko@rambler.ru

**Аннотация.** Изложены научные основы применения поверхностно-активных сред при бурении горных пород и дан подробный анализ методов повышения эффективности и экономичности буровых работ, применяемых при освоении отечественных горнорудных месторождений.

**Annotation.** The scientific basis for the use of surface-active media in rock drilling is described and a detailed analysis of methods for improving the efficiency and efficiency of drilling operations used in the development of domestic mining fields is given.

**Ключевые слова:** горная порода, бурение, измельчение, активные технологические среды.

**Keywords:** rock, drilling, grinding, active technological media.

## Введение

### *Основные положения физико-химической механики разрушения горных пород*

Хорошо известно, что присутствие жидкой фазы может вызвать сильное изменение механических свойств горных пород. Это явление, открытое академиком П.А. Ребиндером [1], заключается в облегчении деформации и снижении работы разрушения твердого тела в результате протекания на его поверхности физико-химических процессов, приводящих к понижению поверхностной энергии тела.

Согласно развитым П.А. Ребиндером представлениям, удельная свободная поверхностная энергия  $\sigma$  твердого тела и, в частности, горной породы, в присутствии жидкой фазы может быть существенно понижена [2]. Этот факт является ключевым, определяющим поведение такого материала при его последующем деформировании. Именно понижение величины  $\sigma$  приводит к изменению механических свойств данного твердого тела и, в частности, к уменьшению работы образования новых поверхностей в процессе его деформации и разрушения [3]. В микроскопическом (атомном) аспекте такое влияние среды может рассматриваться, как облегчение элементарных актов разрыва и перестройки межатомных связей под влиянием и при участии адсорбционно-активных атомов или молекул жидкой фазы.

Отличительной особенностью эффекта адсорбционного понижения прочности (АПП) является быстрота его проявления, чувствительность к достаточно малым количествам адсорбционно-активного компонента, одновременность действия механических напряжений и среды. Эффект АПП может проявляться в той или иной степени на твердых телах с различным типом межатомной связи: металлической, ионной, молекулярной, ковалентной и различной микроструктурной организацией: кристаллической, аморфной, пористой [3].

В зависимости от специфики межмолекулярного взаимодействия твердого тела со средой, характера и интенсивности напряженного состояния в материале, эффект АПП может проявляться в следующих формах:

- в виде резкого снижения прочности и увеличения хрупкости твердого тела, обусловленных облегчением зарождения и роста трещин разрушения;
  - в виде пластифицирования приповерхностных слоев материала, которое проявляется в уменьшении предела его текучести и коэффициента упрочнения, или в ускорении его ползучести;
  - самопроизвольное диспергирование твердого тела на частицы коллоидных размеров.
- Возможность, степень проявления эффекта и его интенсивность определяются совокупностью факторов термодинамической и кинетической природы:
- характером межатомных взаимодействий на границе раздела твердой и жидкой фаз в сопоставлении с взаимодействиями внутри твердого тела и окружающей среды;
  - макро- и микроструктурой твердого тела, степенью ее дефектности;
  - физико-химическими и механическими условиями деформирования и разрушения.



С термодинамической точки зрения величина свободной поверхностной энергии  $\sigma$  является параметром, играющим решающую роль в процессах взаимодействия твердого тела с окружающей средой. Роль свободной энергии в процессе разрушения выявляется в рамках теории Гриффитса [4,5], рассматривающей развитие трещины в идеально хрупком материале. Полная энергия системы, содержащей трещину, выражается при помощи очевидного соотношения:

$$U = W_L + U_B + U_S, \tag{1}$$

где  $W_L$  – работа, совершаемая приложенной нагрузкой (инструментом – зубьями буровой шарошки, режущей кромкой перфоратора, мелющими телами);  $U_B$  – потенциальная энергия упругой деформации, запасенная разрушаемым телом перед актом разрушения;  $U_S$  – его поверхностная энергия.

Предполагается, что единственной формой диссипации энергии в системе является прирост свободной поверхностной энергии тела в процессе его разрушения. Для системы с трещиной, находящейся в равновесии, при выполнении условия  $\partial U_B / \partial C$ , ( $C$  – длина трещины), механическая энергия, расходуемая на удлинение трещины, равна энергии, затраченной на создание новой поверхности. Критическое напряжение, необходимое для развития трещины, определяется соотношением [4]:

$$P = \left[ \frac{2E\sigma}{(1-\nu)^2 \pi C} \right]^{0.5}, \tag{2}$$

где  $\sigma$  – свободная поверхностная энергия;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга.

Отсюда следует, что снижение величины свободной поверхностной энергии  $\sigma$  должно приводить к уменьшению критического напряжения, необходимого для роста трещины.

Поверхностная энергия может быть уменьшена вследствие адсорбции молекул или ионов на поверхности твердого тела. Это уменьшение количественно описывается уравнением Гиббса [6]:

$$\Gamma = d\sigma/d\mu, \tag{3}$$

где  $\Gamma$  – адсорбция, моль/см<sup>2</sup>,  $\mu$  – химический потенциал адсорбирующегося вещества.

Измерение свободной поверхностной энергии твердых тел является достаточно сложной экспериментальной задачей. Именно этой причиной обусловлена немногочисленность исследований, в которых независимыми экспериментальными методами определяется снижение поверхностной энергии твердого тела вследствие адсорбции и вызванное ею изменение его механических свойств.

Одним из первых исследований, проведенных в этом направлении, была работа [7], в которой изучалось влияние воды на прочность гидроокиси магния. Образцы гидроокиси магния испытывались на одноосное сжатие при различных давлениях паров воды. Адсорбция воды определялась весовым методом. Зависимость адсорбции  $\Gamma$  от давления паров воды  $p$  дала возможность оценить уменьшение поверхностной энергии гидроокиси магния  $\sigma$ :

$$-\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = RT \int_0^P \Gamma d \ln p, \tag{4}$$

и позволила сопоставить найденные значения величины  $(-\Delta\sigma)$  с независимыми измерениями понижения прочности этих образцов по сравнению с исходной прочностью в отсутствие воды. Полученные данные показали, что, в соответствии с уравнением (2), двукратному уменьшению прочности гидроокиси магния при образовании моно слоя молекул воды на ее поверхности соответствует четырехкратное понижение свободной поверхностной энергии материала.

Столь же ярко влияние жидкой фазы на механические свойства горных пород проявляется в экспериментах по изучению процессов медленного распространения трещин в этих материалах. В общем случае зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжения  $K_I$  (КИН) имеет вид, представленный на рисунке 1.

На I участке трещина не растет. На участке II  $IgV$  линейно зависит от интенсивности напряжений в вершине трещины. Предполагается, что развитие трещины на этом участке определяется природой материала и физико-химическим составом окружающей среды. На участке III, в области плато, скорость трещины не зависит от интенсивности напряжений, и фактором, лимитирующим скорость развития трещины, является транспорт жидкой фазы к вершине трещины. На IV участке скорость роста трещины не зависит от наличия жидкой фазы. На II участке скорость роста трещины, как правило, хорошо описывается уравнением (5), полученным в работах [8–12].

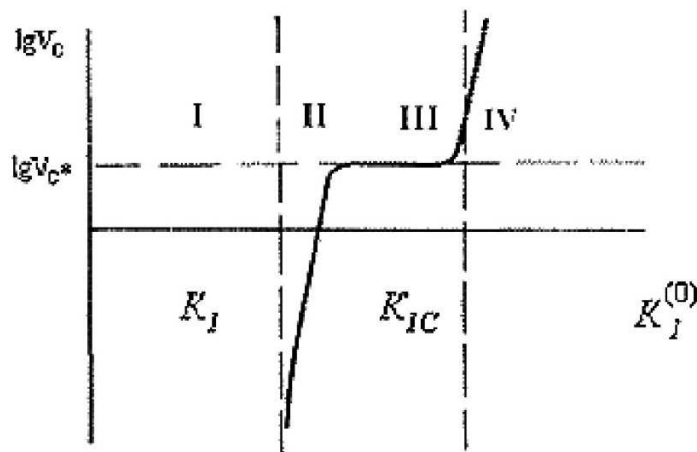


Рисунок 1 – Общий вид зависимости скорости роста трещины от расчетного значения КИН ( $K_I$ )

$$V = AP_{H_2O}^n \exp\left[-\frac{E}{RT} + \frac{fV\sigma_\infty}{RT}\right], \tag{5}$$

В уравнении (5) коэффициенты  $A$ ,  $n$  – постоянные;  $E$  – энергия активации;  $f$  – фактор, учитывающий перенапряжения в вершине трещины, равный отношению напряжения в вершине трещины к приложенному напряжению;  $V$  – активационный объем;  $\sigma_\infty$  – приложенное напряжение;  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура;  $P_{H_2O}$  – парциальное давление паров воды.

Зависимости, включающие четыре участка (рис. 1), впервые были обнаружены для силикатных стекол различного состава (соответствующие литературные ссылки приведены в монографии В.А. Берштейна [13]). Аналогичную форму, с сохранением вышеуказанных четырех участков, имеет зависимость логарифма скорости распространения трещины от коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  в сапфире, кварците, граните, базальте, а также в ряде карбонатных горных пород [13, 14].

Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей, а также соответствующие им модели роста трещин были предложены А.И. Малкиным с сотрудниками (см., например, [15, 16]).

**П. 1 Применение поверхностно-активных сред для повышения эффективности разрушения горных пород**

При контактном разрушении горных пород коэффициент интенсивности напряжений может не достигать значений, отвечающих участку III диаграммы, приведенной на рисунке 1. В этом случае на зависимости  $\lg V = f(K_I)$  будут наблюдаться только два участка.

Так, например, в работе [17] для базальта и андезита зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений сохранялась линейной в изученном интервале значений  $K_I$  (рис. 2 и 3). При этом линии зависимостей на графиках, полученных для воздушно-сухих образцов и образцов, испытанных в дистиллированной воде, приблизительно параллельны друг другу. Однако скорость трещин в насыщенных водой образцах примерно на три порядка в андезите и на два порядка в базальте больше, чем в воздушно-сухих материалах.

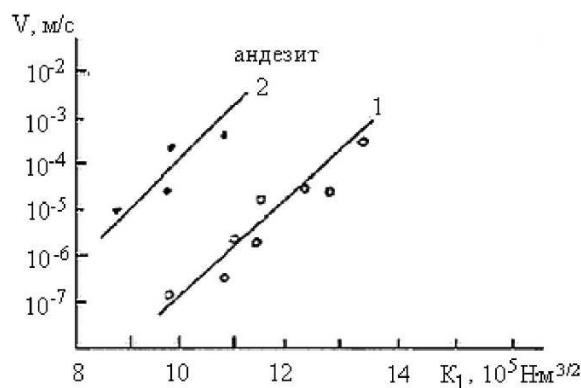
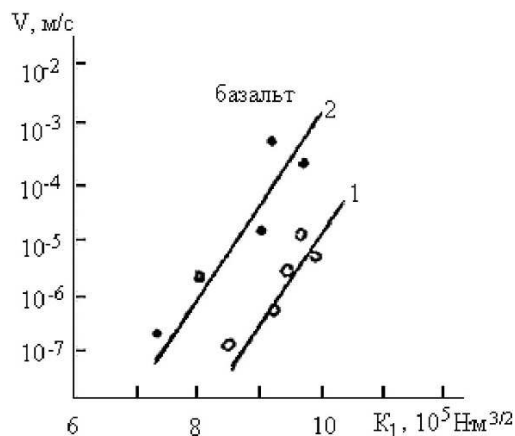
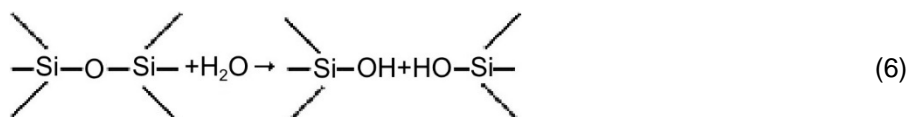


Рисунок 2 – Зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжения для андезита: 1 – на воздухе; 2 – в дистиллированной воде [17]

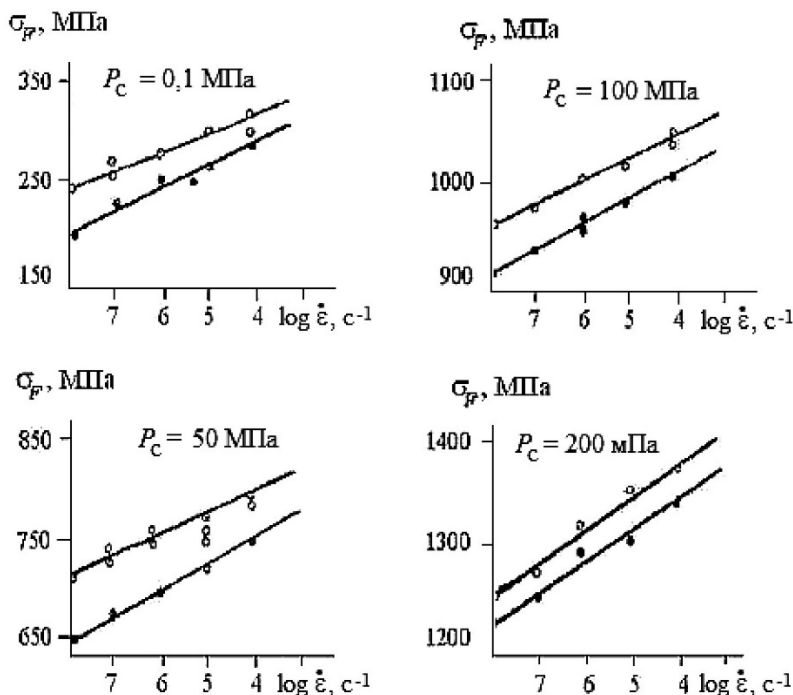


**Рисунок 3** – Зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжения для базальта: 1 – на воздухе; 2 – в дистиллированной воде [17]

Для силикатных горных пород в присутствии воды ускорение роста трещины может быть обусловлено гидролитическим расщеплением силоксановых связей в вершине трещины и замещением сильных связей Si-O-Si на более слабые Si-OH в соответствии с реакцией (6):



На скорость этого процесса оказывает существенное влияние величина первоначально приложенного к образцу напряжения всестороннего сжатия  $P_c$  (рис. 4), а также время его действия.



**Рисунок 4** – Зависимость прочности на сжатие  $\sigma_F$  сухих и увлажненных образцов гранита от скорости деформирования  $\dot{\epsilon}$ : о – для «сухих» образцов, • – для «влажных» образцов [14]

Такой вывод следует из результатов работ [10,11,18,19] (см. также [14]), в которых было изучено влияние статических нагрузок, а также влаги на прочностные свойства гранитов в условиях испытаний образцов на динамическую прочность  $\sigma_F$ .

Из данных, приведенных на рисунке 4, следует, что прочность на сжатие  $\sigma_F$  линейно возрастает с увеличением скорости деформирования как для «сухих», так и для «влажных» образцов и может быть описана соотношением:



$$\sigma_F = C_W \ln \dot{\epsilon} + \sigma_{0W}, \tag{7}$$

где  $\sigma_F$  – напряжение сжатия, соответствующее разрушению образца;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $C_W$  и  $\sigma_{0W}$  – константы. Величина  $C_W$  представляет собой прочность на сжатие, соответствующую скорости деформации  $\dot{\epsilon} \approx 2,7 \text{ с}^{-1}$ .

Значения констант  $C_W$  и  $\sigma_{0W}$  для «влажного» и  $C_d$  и  $\sigma_{0d}$  для «сухого» гранита, рассчитанные из экспериментальных данных приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Значения констант  $C$  и  $\sigma$  в уравнении (2,7) в зависимости от давления  $P_c$

$P_c$ , МПа	«влажный»		«сухой»	
	$C_W$	$\sigma_{0W}$	$C_d$	$\sigma_{0d}$
0,1	16,6	334	13,0	340
50	22,1	838	16,3	850
100	22,4	1091	20,0	1121
200	27,2	1449	30,7	1494

Эти результаты показывают, что зависимость прочности  $\sigma_F$  от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  более ярко выражена при высоких давлениях. Соотношение констант  $C_W > C_d$  при относительно низких давлениях  $P_c \leq 100$  МПа свидетельствует о более сильной зависимости прочности на сжатие от скорости деформации «влажных» образцов, нежели «сухих» в этой области давлений.

Воспользовавшись уравнением (5), можно получить общее уравнение для прочности при испытании с постоянной скоростью деформирования:

$$\sigma_F = \frac{2,3RT}{fV} (\ln \dot{\epsilon} - n \ln P_{H_2O} + B_0), \tag{8}$$

где  $\sigma_F$  – дифференциальное напряжение, действующее в момент разрушения:  $\sigma_F = \sigma_1 - \sigma_3$ . (Здесь предполагается, что разрушение горной породы описывается 3-ей теорией прочности, о которой см. например, [20]);  $B_0$  – константа.

Как видно из данных, приведенных на рисунке 4, прочность на сжатие «влажного» гранита меньше, чем прочность «сухого» гранита при одинаковых условиях испытания. Эксперименты также показывают, что прочность «увлажненного» гранита пропорциональна логарифму скорости деформирования. Эта зависимость наиболее резко проявляется при высоких давлениях. Соотношение (7), полученное экспериментально, согласуется с теоретическим уравнением (8), что позволяет вычислить величину эффективного активационного объема как функцию давления, действующего в системе. Значения эффективного активационного объема, как видно из данных таблицы 2, уменьшаются по мере увеличения давления.

**Таблица 2** – Влияние напряжения  $P_c$  в системе на величину эффективного активационного объема  $fV$

$P_c$ , МПа	$fV$ , см <sup>3</sup> /моль
0,1	346
50	260
100	256
200	211

По данным ряда исследователей (см., например, [11, 14, 18, 19]), в «сухих» образцах при давлении  $P_c = 200$  МПа, трещины имеют большее аспектное отношение, чем при давлении  $P_c = 0,1$  МПа. Это объясняется тем, что трещины с малым аспектным отношением захлопываются при больших давлениях. Если предположить, что в «увлажненном» граните подобная связь между аспектным отношением и приложенным давлением сохраняется, то фактор перенапряжения  $f$ , характеризующий отношение эффективного нормального напряжения, действующего в вершине трещины к номинальному приложенному напряжению (см. уравнения 5 и 8), при высоких давлениях будет иметь меньшее значение, чем при низких.

Вместе с тем, реальный активационный объем  $V$  в меньшей степени зависит от давления, чем параметр  $f$ , т.к. он определяется свойствами материала, имеющими довольно слабую зависимость от напряжения. Следовательно, наблюдаемое усиление зависимости прочности от скорости деформирования при высоких давлениях объясняется уменьшением значения параметра  $f$  по мере увеличения давления.



Сопоставление приведенных на рис. 4 зависимостей прочности от скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  показывает, что при давлениях  $P_c = 0,1$  МПа, 50 МПа и 100 МПа, т.е. в той области, где в материале существуют тонкие трещины, для «влажных» образцов скорость зависимости прочности оказывается выраженной сильнее. Это означает, что при низких скоростях деформации  $\dot{\epsilon}$  уменьшение прочности «влажного» гранита по сравнению с «разупрочнением», наблюдаемым для «сухих» гранитных материалов, оказывается более значительным, чем при высоких. Можно полагать, что это происходит благодаря увеличению скорости протекания во влажной системе химической реакции типа (6).

Изменение механических характеристик горных пород зависит от природы жидкой фазы. В работах [12, 21–27] показано, что в водных растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) напряжение роста трещины в кварце уменьшается по сравнению с аналогичным значением в воде, причем для растворов катион-активных ПАВ это различие оказывается более значительным, чем для растворов анион-активных ПАВ. Влияние природы молекул ПАВ, растворенных в воде, на механические свойства материалов наблюдалось также при испытании мрамора методом вдавливания штампа [25, 26], а также в экспериментах по сверлению и резанию горных пород [28–32].

## П. 2 Особенности применения поверхностно-активных сред при буровых работах

Увеличение производительности бурения при выборе оптимальных для заданной породы понизителей прочности и режимов работы оборудования должно применяться, прежде всего, в рамках традиционных методов проходки буровых скважин. Подбор поверхностно-активных сред, используемых в рамках этих методов, должен быть нацелен в первую очередь на реализацию физико-химических процессов, эффективно разупрочняющих горную породу. При этом должное внимание следует уделять влиянию таких сред на стойкость обрабатываемого инструмента.

Основополагающей физико-химической идеей здесь является возможность обеспечения разрыва и перестройки межатомных связей в зоне разрушения геологического материала (но не инструмента!) за счет взаимодействия его атомов с определенными адсорбционно-активными атомами, или молекулами среды, облегчение создания новой поверхности материала в ходе разрушения. В термодинамическом аспекте это проявляется в уменьшении свободной поверхностной энергии твердого тела при контакте со средой. Соответственно, принципиальную возможность проявления эффекта Ребиндера в той или иной системе определяют химический состав породы и жидкой или газообразной среды.

В кинетическом аспекте эффект адсорбционного понижения прочности заключается в достаточно быстром проникновении атомов или молекул среды в разрушаемую породу за счет их переноса в жидкой или паровой фазе по системе формирующихся в зоне предразрушения микротрещин, поверхностной и зернограничной диффузии, активированной механическими напряжениями.

В общем случае степень понижения прочности горной породы (эффект АПП) зависит от ее реальной структуры (размера зерен, дефектности, фазового состава), от условий разрушения (температуры, напряжений, скорости деформаций) и физико-химических параметров среды (химического состава, вязкости, давления паров).

Процесс бурения горных пород характеризуется сочетанием условий, благоприятных для сильного проявления эффекта адсорбционного понижения прочности. К таким условиям относятся: высокие локальные напряжения при сложном напряженном состоянии, циклические нагрузки, постоянное образование в зоне контакта свежей «ювенильной» поверхности, высокие скорости деформации материала.

Наиболее перспективными активными средами для бурения являются водные растворы электролитов и растворы органических соединений, которые достаточно хорошо адсорбируются минеральными составляющими горной породы. Однако подбор активных сред для практического использования представляет собой далеко не формальную и трудоемкую задачу, требующую проведения как комплексных физико-химических исследований, так и исследований по оптимизации процесса бурения, включающих оценку экономической целесообразности использования поверхностно-активных сред в данном технологическом процессе.

Механизм, обеспечивающий понижение прочности горных пород под действием жидких активных сред, включает стадию образования адсорбционных слоев поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхностях микротрещин в зоне предразрушения очага деформации. Для большинства горных пород в качестве источника таких адсорбционных слоев могут служить технологические буровые растворы, содержащие как поверхностно-активные молекулы органических веществ, так и ионы электролитов. В соответствии с природой и характером адсорбционных слоев, а также их влиянием на сопротивление горных пород механическому разрушению, такие растворы – понизители прочности при бурении, можно объединить в две группы.

В первую группу войдут понизители прочности, эффективность которых с повышением их концентрации в водном растворе обнаруживает максимум при малых концентрациях. К этой группе относятся главным образом неорганические электролиты – щелочи и соли щелочных и щелочноземельных металлов. Эффективность этих понизителей прочности, определяемая как относительное повышение



скорости бурения, возрастает с увеличением их концентрации в тампонажном или промывочном технологическом растворе, достигая максимума уже при небольших концентрациях 0,1–0,001 % (масс). При этом оказывается, что чем выше валентность ионов электролита – понизителя прочности, тем меньше концентрация, при которой данный понизитель прочности дает наибольший эффект, и тем больше величина этого эффекта. Так, например, при бурении кварцитов для хлористого алюминия оптимальная концентрация в промывочном растворе составляет 0,01–0,05 %, для  $MgCl_2$  это 0,2–0,1 %, а для  $NaCl$  – 0,5–0,1 %.

При дальнейшем повышении концентрации понизителя прочности в растворе его эффективность падает, иногда доходя до нуля. Для некоторых горных пород с дальнейшим повышением концентрации электролита вновь наблюдается возрастание эффективности их действия и становится возможным появление второго максимума при более высоких концентрациях. Указанная зависимость от концентрации объясняется тем, что понизители прочности этого типа адсорбируются на поверхности породы с образованием двойного электрического слоя.

Повышение или снижение величины эффекта зависит от соответствующего изменения степени гидратации двойного электрического слоя, что, в свою очередь, связано с изменением значения электрокинетического потенциала и толщины диффузного слоя на границе твердое тело – жидкость. Эта область малых концентраций как раз и соответствует повышению эффективности понизителей прочности с увеличением концентрации ПАВ до первого максимума. С дальнейшим повышением концентрации электролита в растворе, по мере сжатия диффузного слоя и перехода противоионов из диффузного в неподвижный адсорбционный слой, электрокинетический потенциал будет падать. Эта область соответствует снижению эффективности понизителей прочности с увеличением их концентрации в растворе. Наконец, в некоторых случаях электрокинетический потенциал, дойдя до нуля, может опять возрастать вследствие перезарядки поверхности твердого тела. В этой области может наблюдаться вторичное возрастание эффективности некоторых понизителей прочности при больших концентрациях ПАВ.

Из вышесказанного следует, что электролиты, не адсорбирующиеся на поверхности данной горной породы, не будут являться для нее понизителями прочности. Например, хлориды металлов не адсорбируются на известняке и, соответственно, не являются для него понизителями прочности.

Наряду с образованием двойного электрического слоя, ионы некоторых понизителей прочности могут вступать в адсорбционно-обменную реакцию с ионами, образующими поверхность горной породы, также повышая этим, как указывалось ранее, ее гидрофильность. К таким понизителям прочности относятся, например, электролиты  $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_3PO_4$ , которые применяются при бурении карбонатных пород. На поверхностях этих пород адсорбируются анионы  $OH^-$ ,  $HCO_3^-$  и т.п., а в диффузный слой переходят противоионы  $Na^+$ . Кроме адсорбции ионов в двойном слое происходит обмен ионов  $CO_3^{2-}$  на ионы  $OH^-$  непосредственно в поверхностном слое горной породы. Это тоже увеличивает гидрофильность поверхности. Такая ионообменная адсорбция с увеличением концентрации ПАВ приводит к непрерывному возрастанию эффективности действия понизителя прочности до предельного значения, соответствующего насыщению слоя соответствующими ионами. Однако одновременно с обменной адсорбцией всегда происходит образование двойного слоя противоионов. Оба процесса, суммируясь, также дают указанную выше зависимость эффективности действия среды как функции концентрации активной добавки с первым максимумом, а затем с уменьшением до некоторого минимума (однако не достигающего нуля) и дальнейшим возрастанием эффективности действия ПАВ с ростом его концентрации в растворе.

Вторая группа объединяет такие понизители прочности, эффективность действия которых с повышением их концентрации в растворе непрерывно возрастает, стремясь к предельному значению. К числу таких понизителей прочности относятся главным образом органические вещества: углеводы, фенолы, амины, сульфонафтенновые кислоты и их соли – мыла и т.п. С повышением концентрации этих понизителей прочности в промывочной воде их эффективность очень резко возрастает при малых концентрациях, а затем, при дальнейшем повышении концентрации приближается к наибольшему предельному значению.

Такое поведение понизителей прочности данной группы также связано с химической природой и структурой адсорбционных слоев. В этом случае основное значение приобретает адсорбция нейтральных молекул на твердой поверхности горной породы. С повышением концентрации понизителя прочности в растворе адсорбция его молекул на поверхности возрастает в соответствии с изотермой молекулярной адсорбции Ленгмюра [6]. Она достигает своего наибольшего предельного значения, когда вся доступная поверхность будет заполнена адсорбированными молекулами. По мере увеличения количества адсорбированных молекул растёт соответственно и гидратация поверхности твердого тела с образованием на ней студнеобразной гидрофильной адсорбционной пленки. Однако и в этом случае разупрочняющее действие самих адсорбционных слоев ПАВ в микротрещинах нарастает с повышением концентрации до насыщения слоев.

Во всех рассмотренных ранее случаях повышение скорости бурения является результатом адсорбционных процессов, протекающих на поверхностях микротрещин. Поэтому количество понизителя прочности, поглощаемое горной породой при ее механическом разрушении, обычно очень незначительно.



Вместе с тем, большой интерес представляют также объемные химические реакции в тех случаях, когда понизитель прочности реагирует с одним из породообразующих минералов, находящихся в породе в виде мелких включений. В этом случае, наряду с адсорбционным действием на основные минеральные составляющие горной породы, реагент, вступая в микротрещинах в химическую реакцию с включениями и ослабляя этим связи между зернами основного материала, будет облегчать разрушение горной породы в целом. Примером таких понизителей прочности является сода при бурении известняков и доломитов с дисперсными включениями гипсов и ангидритов. Но здесь основным недостатком для практического применения является большой расход реагента. Очевидно, что реагенты, эффективность которых в значительной степени определяется объемными химическими реакциями с породой, будут относиться ко второй группе понизителей прочности по виду зависимости эффекта от концентрации. Эффективность их действия будет непрерывно возрастать с увеличением концентрации в растворе.

Облегчение деформирования и разрушения твердого тела под влиянием поверхностно-активных сред проявляется наиболее интенсивно при достаточно малой скорости деформирования и/или при периодических во времени – циклических силовых воздействиях. Причиной этого является, во-первых, то обстоятельство, что проникновение (диффузия) молекул поверхностно-активных веществ к развивающимся микротрещинам требует конечного времени, от которого зависит глубина проникновения ПАВ, т.е. доля того объема очага деформирования горной породы, которая охрупчивается под влиянием адсорбционного воздействия активной среды.

Во-вторых, при периодическом приложении внешних сил микротрещины, развивающиеся в очаге деформации при нагружении материала, получают возможность самопроизвольно смыкаться при завершении цикла воздействия – при разгрузке материала. Адсорбционные слои ПАВ, проникающие в устья зародышевых микротрещин, не только экранируют молекулярные силы, связывающие противоположные поверхности – «берега» этих микротрещин, но и препятствуют их смыканию при снятии нагрузки, тем самым замедляя процесс их «залечивания». Это также обеспечивает высокую эффективность действия понизителей прочности при различных видах ударного и ударно вращательного бурения.

Применение активных жидких сред – понизителей прочности, замедляя самопроизвольное смыкание микротрещин в деформируемой зоне материала, позволяет аккумулировать выделяющуюся в этой зоне упругую энергию, необходимую для осуществления процесса разрушения горной породы. Таким образом, существенно повышается коэффициент полезного действия бурового инструмента. В случае упруго-хрупких твердых тел, каковыми являются при обычных условиях разрушения многие горные породы, действие понизителей прочности особенно эффективно при достаточно высокой частоте механического воздействия, т.к. при длительных промежутках времени между ударами самопроизвольное смыкание микротрещин успевает происходить даже и в присутствии ПАВ.

В случаях же преобладания пластической моды при деформировании и разрушении горной породы, благодаря необратимости пластической деформации материала уровень частоты механического воздействия не будет оказывать в первом приближении столь заметного влияния на эффективность процесса бурения. Напротив, учитывая рост сопротивления деформированию с увеличением его скорости, обычно имеющий место в упруго-пластичных материалах, а также принимая во внимание кинетические ограничения процесса поверхностной диффузии, в таких случаях следует стремиться к уменьшению частоты механического воздействия на горную породу в процессе ее бурения.

Таким образом, для развития процесса разрушения горной породы при бурении существенное значение имеет время приложения внешних механических усилий. Оно определяет длительность сохранения заданного напряженного состояния в материале (период воздействия –  $T$ ), а также время релаксации материала между отдельными актами воздействия (так называемую скважность механических импульсов).

Вместе с тем, следует отметить, что при увеличении частоты механических импульсов и одновременно уменьшении их скважности с целью повышения скорости бурения объем зоны предразрушения в очаге деформации также увеличивается. При этом работа разрушения единицы объема породы возрастает, а КПД процесса падает.

В качестве иллюстрации к вышесказанному можно привести результаты опытов по моделированию ударно-импульсного бурения на ударном диспергометре – приборе для измерения скорости и удельной работы разрушения горной породы. Модельные опыты проводили при энергосиловых параметрах процесса таких же, как и при перфораторном бурении. Процесс осуществляли в технологическом растворе, содержащем ПАВ – хлористый аммоний, при концентрации ПАВ  $C_{ПАВ} = 0,01-0,1$  %, соответствующей области максимального проявления эффекта, и в том же растворе без ПАВ. Эти опыты показали, что применение ПАВ в качестве понизителя прочности при частоте отбойника  $v = 70$  ударов в минуту дает увеличение скорости проходки породы всего на 10 %. В то же время, при перфораторном бурении (при частоте  $v = 1600-2000$  ударов в мин.), повышение скорости проходки составляет уже 60–70 %. Частицы породы, образующиеся при бурении на ударном диспергометре при малой частоте ударов, оказываются в среднем значительно крупнее, чем при бурении на перфораторной





установке. Удельная поверхность шлама, определяемая как суммарная поверхность его частиц, проходящая на  $1 \text{ см}^3$  выбуренной породы при бурении на ударном диспергометре, составляла около  $500 \text{ см}^2/\text{см}^3$ , а при бурении на перфораторной установке –  $1300\text{--}1500 \text{ см}^2/\text{см}^3$ . Эти результаты наглядно показывают, что при большей частоте механического воздействия зона предразрушения и концентрация трещин в материале этой зоны развиты значительно сильнее.

Рост эффективности действия понизителей прочности с увеличением частоты  $\nu$  механического воздействия обычно продолжается до некоторого критического значения  $\nu_c$ , выше которого эффективность разрушения горной породы, уже достигнув максимума, будет оставаться постоянной на некотором участке частот  $\Delta\nu$ , после чего начинает постепенно снижаться. При этом отличия в эффективности действия различных ПАВ будут сглаживаться. Причиной этого эффекта, очевидно, являются кинематические (поверхностно-диффузионные) параметры процесса смачивания. В качестве примера такого взаимодействия механических и физико-химических факторов в процессе разрушения горной породы можно проанализировать ситуации, возникающие при ударном воздействии долота или бура при ударно-перфораторном и шарошечном бурении.

Опыт показывает, что процесс углубления, т.е. увеличения объема разрушенной породы в продолжении действия одного удара в рассматриваемых случаях идет не непрерывно, а скачками. Эта основная особенность разрушения породы обусловлена тем, что скалывание – разрушение материала по достижении критического напряжения в приконтактной зоне, может произойти только на конечную глубину  $h$ . Разрушенный объем  $V$  определяется при этом площадью контакта инструмента с породой. Скачкообразность процесса разрушения наглядно выявляется при статическом вдавливании конуса или цилиндра в хрупкую породу.

Соответствующая кривая, характеризующая зависимость глубины погружения индентора от давления  $h = f(P)$  не является микроскопически плавной, а имеет вид зазубренной ломаной линии, имеющей участки, идущие почти параллельно оси абсцисс  $P$ , которые соответствуют прекращению дальнейшего погружения при непрерывном возрастании давления после каждого отдельного скачка. При этом длина каждого такого почти горизонтального участка  $\Delta P$  и глубина погружения  $\Delta h$  увеличиваются для каждого последующего скачка вследствие увеличения площади контакта и объема разрушаемой породы по мере углубления конуса в породу. Это означает, что интегральный процесс разрушения является многоэтапным. Поэтому действие понизителей прочности сводится преимущественно к тому, чтобы на каждом этапе поддержать зону предразрушения в ослабленном состоянии, обеспечивая достаточно заметное понижение прочности материала, оказавшегося в этой зоне.

Оптимальными с энергетической точки зрения будут являться такие условия разрушения, при которых работа разрушения единицы объема – удельная работа разрушения, будет минимальной. Этому минимальному значению удельной работы разрушения соответствует и минимально возможное развитие зоны предразрушения, поглощающее механическую работу в виде энергии упругого и пластического деформирования, которая в значительной части рассеивается в виде тепла после снятия внешних усилий.

В практических условиях средняя удельная работа разрушения единицы объема горной породы при бурении всегда существенно выше удельной работы, необходимой для создания единицы ее поверхности в квазиравновесных условиях при минимальных размерах зоны предразрушения. Чем выше твердость породы, тем больше превышение средней удельной работы разрушения над минимальным ее значением. Поскольку эффективность действия понизителей твердости определяется главным образом развитием зоны предразрушения, то следует предполагать, что в том случае, когда работа механического разрушения минимальна, эффективность понизителя прочности будет наименьшей.

Наоборот, когда условия разрушения далеки от оптимальных, работа разрушения оказывается значительно выше минимальной. В последнем случае понизитель прочности может значительно повышать скорость бурения, препятствуя рассеянию энергии в зоне предразрушения, понижая объемную работу разрушения и приближая КПД процесса к максимальному значению. Здесь необходимо добавить, что обычные принятые в горнодобывающей и горнообрабатывающей промышленности режимы бурения далеки от оптимальных в указанном энергетическом смысле. При их разработке целью являлось достижение возможно более высоких скоростей бурения, что в большинстве практических случаев не соответствует наибольшему значению КПД процесса. На основании многочисленных экспериментальных данных и результатов промышленных испытаний понизителей прочности была разработана шкала относительной эффективности их применения при различных способах и режимах бурения.

### **П. 3 Применение поверхностно-активных сред при различных режимах бурения горных пород**

Наименьшая эффективность действия понизителей прочности наблюдается при *дробовом* бурении, элементарным механизмом которого является истирание породы при ее шлифовании. В таких процессах зона предразрушения слабо развита, а скалывание частиц происходит почти на всю глубину



деформируемой зоны. Однако размеры скалываемых частиц весьма малы, что благоприятствует действию понизителей прочности. При *вращательном* бурении режущим инструментом типа фрезерных долот и коронок эффективность понизителей твердости оказывается большой в том случае, когда проникновение режущей кромки или зубца инструмента в породу достаточно велико, т.е. элементарным механизмом процесса является скол, а не поверхностное истирание породы.

Переходя к различным видам *ударного* бурения, можно полагать, что они будут соответствовать наибольшей эффективности действия ПАВ. Это связано с ударно-периодическим характером воздействия и значительной глубиной зоны предразрушения в очаге деформации. При ударных способах бурения процесс разрушения никогда не имеет характера поверхностного истирания; напряженная зона материала, способствующая развитию микротрещиноватости, в этом случае распространяется на значительную глубину. Эти особенности делают применение ПАВ весьма эффективными в качестве понизителей твердости при перфораторном и ударно-вращательном бурении шарошечными долотами.

При рассмотрении адсорбционного понижения прочности при бурении горных пород возникает вопрос о влиянии понизителей прочности, включающих адсорбционно-активные среды на режущий инструмент – долото, бур, шарошечную фрезу и т.п. При анализе этого вопроса всегда следует иметь в виду, что различия в материальном составе и механических свойствах разрушаемой породы, с одной стороны, и режущего инструмента, с другой, при правильном выборе последнего. Весьма велики. Поэтому при сильном развитии зоны предразрушения в очаге деформации горной породы аналогичная зона почти совсем не развивается в материале режущего инструмента. Кроме того, адсорбционно-активная среда должна быть выбрана таким образом, чтобы ПАВ-компонента максимально влияла на процесс диспергирования горной породы и, наоборот, минимально – на механические свойства рабочих (режущих) частей обрабатываемого инструмента. Благодаря ярко выраженной избирательности действия понизителей прочности эти условия оказываются легко выполнимыми. Учитывая сказанное, естественно ожидать увеличения стойкости обрабатываемого инструмента при бурении горных пород с использованием поверхностно-активных сред. Многочисленные опыты и производственные испытания подтверждают это заключение. Действительно, использование понизителей прочности при различных способах бурения приводит к значительному уменьшению расхода инструмента на 1 метр проходки скважины или шпура.

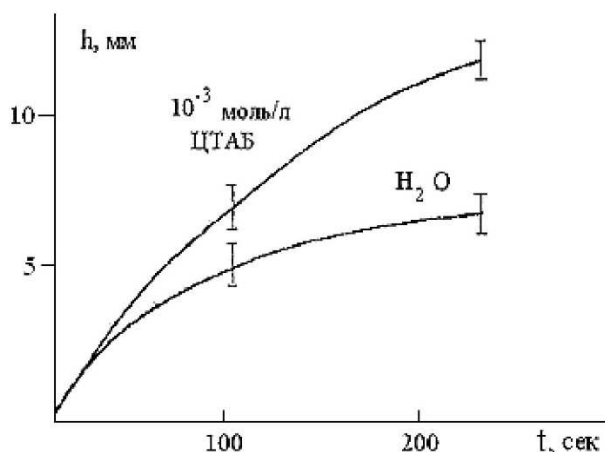
Следует отметить, что стойкость инструмента, а также эффективность действия понизителей твердости во многих случаях может быть дополнительно повышена за счет вторичных факторов – изменения дисперсности и рыхлости выбуриваемого шлама.

Поскольку сущность действия понизителей прочности состоит в увеличении удельной плотности микротрещин, раскрывающихся в очаге деформации разрушаемой горной породы, то, очевидно, что при одинаковых условиях доля мелких частиц при бурении с применением понизителей прочности будет значительно больше, т.е. дисперсность продукта разрушения оказывается значительно выше. Как известно, измельчение шлама, образующегося в забое шпура, способствует заметному повышению срока службы инструмента и дополнительно повышает скорость бурения. Так, например, при перфораторном бурении шпуров в твердых кварцитах с применением в качестве понизителя прочности 0,1 % водного раствора хлористого алюминия было обнаружено резкое возрастание эффективности действия понизителя прочности с увеличением глубины шурфа.

Если на начальной стадии бурения шпура повышение скорости проходки с применением ПАВ составляло 30 %, то на глубине 1,5 м скорость бурения выросла более чем на 100 % по сравнению с бурением при использовании в качестве бурового раствора технической воды. При этом скорость бурения с применением раствора, содержащего понизитель прочности, оставалась практически постоянной, тогда как при бурении с технической водой скорость проходки и стойкость инструмента по мере углубления шпура резко падали. Это объясняется тем, что при бурении с водой в забое образуется трудно вымываемый шлам, создающий «подушку», ослабляющую эффективность ударов перфоратора и разрушающую его рабочие поверхности путем эрозионно-абразивного износа. При использовании же 0,1 % раствора хлористого алюминия образуется существенно более мелкий и рыхлый шлам, который, вследствие стимулированных присутствием ПАВ коагуляционных процессов, легко удаляется из забоя.

#### П. 4 Примеры эффективного подбора активной среды для бурения горных пород

В качестве примера эффективного подбора активной среды для вращательного бурения горной породы можно привести работы [24–26]. При сверлении гранита «*Westerly*» алмазным сверлом в активной технологической среде – водном растворе поверхностно-активного вещества – цетилтриметиламмония бромида (ЦТАБ) при концентрации  $C_{\text{ЦТАБ}} = 10^{-3}$  моль/л глубина проникновения сверла и скорость проходки существенно возрастают по сравнению с глубиной и скоростью проходки, полученной при испытаниях с технологической водой (рис. 5).



**Рисунок 5** – Зависимость глубины проникновения алмазного сверла  $h$  в «Westerly» гранит от времени  $t$  при сверлении в воде и в водном растворе поверхностно-активного вещества ЦТАБ [24–26].

Многочисленные исследования показали, что адсорбция ПАВ может как повышать, так и понижать поверхностную твердость материала горной породы в зависимости от природы и концентрации ПАВ в растворе, а также от природы обрабатываемого материала. При этом, также как и в экспериментах по сверлению, ключевым оказывается соотношение твердости породы и инструмента и, следовательно, выбор действующего микромеханизма разрушения. Например, водный раствор ПАВ может понизить твердость, или объемный предел текучести материала при его пластическом разрушении, повысить механическую скорость бурения лопастным долотом, но снизить механическую скорость при использовании шарошечных и алмазных долот. Зависимость скорости бурения от концентрации ПАВ может носить различный характер [14, 24–27]. Из данных, приведенных на рисунке 6, следует, что при бурении алмазной коронкой в водных растворах ЦТАБ твердых пород – гранита, кварцита, при определенной концентрации ПАВ наблюдается ярко выраженный скоростной максимум. В то же время, для более мягкой – микроклина, зависимость скорости бурения от концентрации ПАВ носит монотонный характер.



**Рисунок 6** – Зависимость скорости бурения алмазной коронкой твердых пород от концентрации водного раствора ЦТАБ [24–26]

Следует отметить, что такого рода лабораторные исследования, предваряющие натурные испытания, пока еще не нашли свое достаточно широкое применение в практике бурения скважин, хотя поверхностно-активные вещества добавляют практически во все типы буровых растворов и они выполняют при этом самые различные функции. Такие растворы ПАВ являются эмульгаторами, вспенивателями, пеногасителями, смачивателями; они могут также выполнять функции смазок и ингибиторов коррозии.

Наличие достаточно сложной, нелинейной и неоднозначной зависимости между свойствами поверхностно-активной среды, природой твердого тела и степенью снижения свободной поверхностной энергии  $\sigma$ , являются основной причиной эмпирического подбора активной среды в технологических процессах бурения и измельчения горных пород.

Примером удачного эмпирического подбора среды могут служить результаты анализа действия различных вариантов ее состава при резании известняков [28–32]. Исследование влияния состава среды проводилось с помощью прибора «Определитель буримости горных пород ВИТР-ОТ» (см. рис. 7).

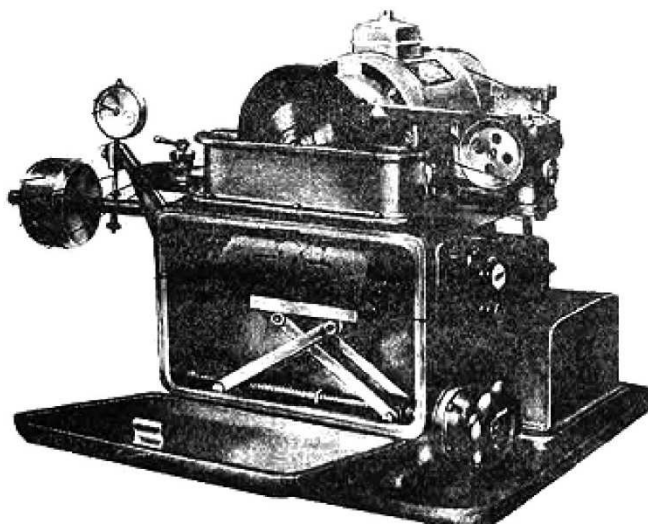


Рисунок 7 – Прибор для определения буримости горных пород ВИТР-ОТ

Резание проводилось корундовым кругом. Предварительными опытами были определены оптимальные условия проведения эксперимента: скорость подачи промывочной жидкости и время, необходимое для получения прорези в образце определенной глубины. Все эксперименты проводились при минимальном засаливании круга. По результатам 3–5 опытов определялось среднее значение скорости резания в дистиллированной воде, а затем в водном растворе ПАВ. Объектом исследования служил известняк, состоящий по данным рентгеноструктурного анализа на 98 % из кальцита. В качестве ПАВ было использовано мицеллообразующее анионактивное ПАВ – сульфонол промышленного производства. Все эксперименты были проведены при концентрациях ПАВ, не превышающих значения ККМ (критической концентрации мицеллообразования), pH растворов составлял 6,0–6,5.

Проведенные исследования показали, что скорость резания известняка увеличивается с ростом концентрации ПАВ, и уже в области достаточно малых концентраций ( $C_{\text{ПАВ}} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  моль/л) достигает значения, сохраняющегося постоянным при дальнейшем увеличении концентрации. Увеличение скорости резания в растворах сульфонола составляет 30 %.

Предполагая, что изменение скорости резания обусловлено адсорбцией молекул ПАВ и изменением вследствие этого заряда поверхности известняка, параллельно с экспериментами по скорости резания было проведено изучение адсорбции ПАВ и ее влияние на заряд поверхности образцов известнякового материала [28–32]. Для увеличения чувствительности эксперимента и воспроизводимости его результатов адсорбция ПАВ была изучена на порошке, полученном измельчением известняка. Удельная поверхность порошка составляла 0,6 м<sup>2</sup>/г. Адсорбцию определяли по разности концентраций ПАВ в растворе до и после адсорбции. Значения электрокинетического потенциала частиц известняка были определены методом электроосмоса.

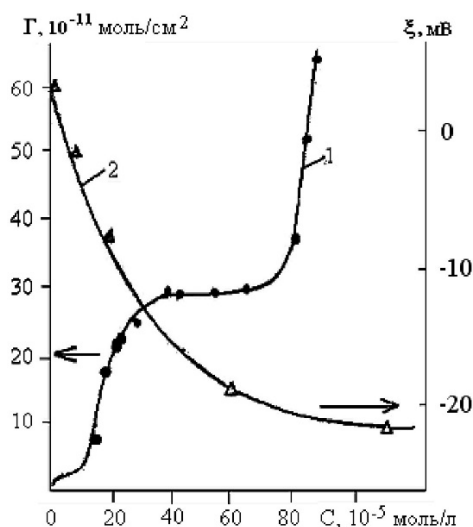
Анализ результатов этих экспериментов показал, что изотерма адсорбции носит двухступенчатый характер с резким возрастанием адсорбции в области ККМ. Рассчитанные из экспериментальных данных значения площади, приходящейся на одну молекулу ПАВ на границе раздела «твердое тело – жидкость» в области малых концентраций ПАВ в растворе, всего лишь на порядок превышают соответствующее значение на границе «жидкость – газ», что свидетельствует об образовании в этих условиях сильно разреженного адсорбционного слоя на межфазной границе.

Увеличение концентрации ПАВ в растворе приводит к образованию более плотных слоев адсорбированных молекул ПАВ и к образованию молекулярных агрегатов на поверхности твердого тела. Адсорбция молекул ПАВ на межфазной поверхности приводит к изменению электрокинетического потенциала системы. Как следует из данных, представленных на рисунке 8, в дистиллированной воде частицы известняка имеют небольшой положительный заряд.

В растворах сульфонола положительный электрокинетический потенциал  $\xi$  вначале падает, уменьшаясь до нулевого значения в области концентраций  $C_{\text{ПАВ}} \leq 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л, соответствующих первой ступени адсорбции (первое плато при  $\Gamma \approx (2 - 3) \cdot 10^{-11}$  моль/см<sup>2</sup>), а затем возрастает по абсолютной величине, достигая значения  $\xi_{\text{min}} \approx -12 \div -20$  mV при концентрациях сульфонола  $C_{\text{ПАВ}} \approx (4 - 8) \cdot 10^{-4}$  моль/л, соответствующих образованию второй ступени на изотерме адсорбции при  $\Gamma \approx 3 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup>. Сопоставление данных по адсорбции сульфонола на поверхности известняка и изменению  $\xi$ -потенциала частиц известняка в растворах сульфонола позволяет предположить, что в области малых концентраций  $C_{\text{ПАВ}} \leq 5 \cdot 10^{-5}$  моль/л адсорбция ПАВ определяется электростатическим взаимодействием анионов с положительно заряженной твердой поверхностью, уменьшая ее заряд до нуля. Как следует из данных, приведенных на рис. 8, переход



от первой ступени ко второй имеет место в области концентраций  $C_{\text{ПАВ}} \approx (1 - 3) \cdot 10^{-4}$ , при которых  $\xi$ -потенциал известняка резко уменьшается от нуля до значений  $\xi_{\text{min}} \approx -12$ , т.е. происходит перезарядка поверхности образцов [33].



**Рисунок 8** – Зависимость адсорбции  $\Gamma$  (1) и электрокинетического потенциала  $\xi$  (2) поверхности образцов известняка от концентрации сульфонола в воде [28–32]

При дальнейшем увеличении концентрации ПАВ адсорбция будет определяться специфическим взаимодействием анионов ПАВ и  $\text{CaCO}_3$ , а именно, образованием комплексов типа  $\text{Ca}(\text{RSO}_3)^-$ , которое, согласно литературным данным, наблюдается в водных растворах сульфатов и сульфонов, контактирующих с кальцитами. Значение максимальной адсорбции  $\Gamma_{\text{max}}$  и заряд поверхности будут определяться в этом случае количеством активных центров, которые могут образовывать комплексы такого типа.

Совокупность полученных экспериментальных данных по адсорбции  $\Gamma$ , изменению  $\xi$ -потенциала и скорости резания известняка в растворах ПАВ показывает, что увеличение скорости резания наблюдается в области концентраций, соответствующих образованию разреженных адсорбционных слоев на поверхности твердого тела и значений  $\xi$ -потенциала, близких к нулю.

Другой пример аналогичных исследований связан с подбором активной среды для сверления алевролита и выяснением причин и механизма снижения прочности этой горной породы при испытаниях в адсорбционно-активной среде. Учитывая изложенные выше соображения, эксперименты с образцами алевролита проводили с использованием слабых водных растворов додециламина гидрохлорида (его структурная формула –  $\text{C}_{12}\text{H}_{27}\text{NHCl}$ ). Образцы представляли собой диски диаметром 80 мм и толщиной 25 мм. Сверление проводили в вертикальном положении на заводском сверлильном станке 2Н118 с автоматической подачей сверла. В экспериментах использовались стандартные сверла, изготовленные из твердого сплава ВК8 диаметром 10 мм, ширина перемычки 1,2–1,3 мм, угол заточки при вершине  $\beta = 120^\circ$  [34]. Были выбраны следующие условия обработки: скорость вращения сверла 180 об/мин, скорость подачи 0,1 мм/об.

Процесс сверления осуществляли на образцах, находившихся на воздухе (влажность 60 %, температура 20 °С), в дистиллированной воде (при  $\text{pH} = 5,9$ ), или в растворе поверхностно-активного вещества (ПАВ) в дистиллированной воде. Сверло вводилось через слой воды или раствора, которые покрывали всю поверхность образца. Эта же дистиллированная вода использовалась для приготовления слабого раствора ПАВ – додециламина гидрохлорида с концентрацией ПАВ  $C_{\text{ПАВ}} = 10^{-3}$  моль/л. Параметры процесса сверления – осевое усилие ( $P$ ) и крутящий момент ( $M$ ), измеряли с помощью универсального динамометра УДН-600 [35], электрические сигналы которого через тензометрический усилитель непрерывно записывались с помощью светолучевого осциллографа модели К114. Реальные значения измеренных параметров были нормированы с помощью соответствующих градуировок. Для получения воспроизводимых результатов каждую серию экспериментов выполняли на новом образце с использованием новых сверл.

Для получения воспроизводимых результатов каждую серию экспериментов выполняли на новой поверхности образцов с использованием новых сверл.

В таблице 3 приведены силовые параметры процесса сверления в различных средах – величина осевого усилия  $P$  и крутящего момента  $M$ , амплитуды их высокочастотных осцилляции, связанных с неравномерностью процесса сверления.

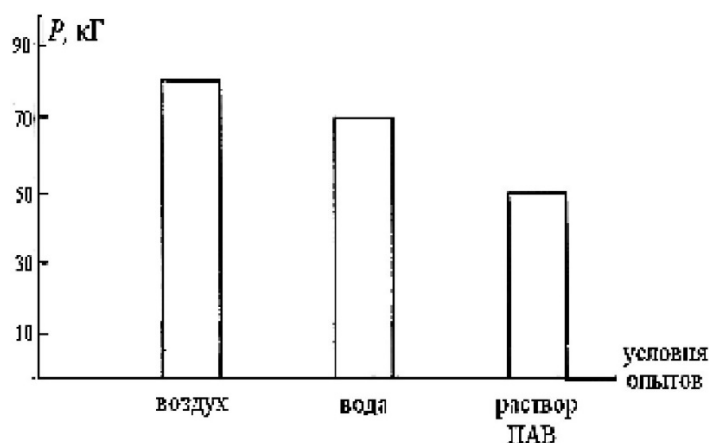


**Таблица 3** – Силовые параметры сверления алевролита в различных средах

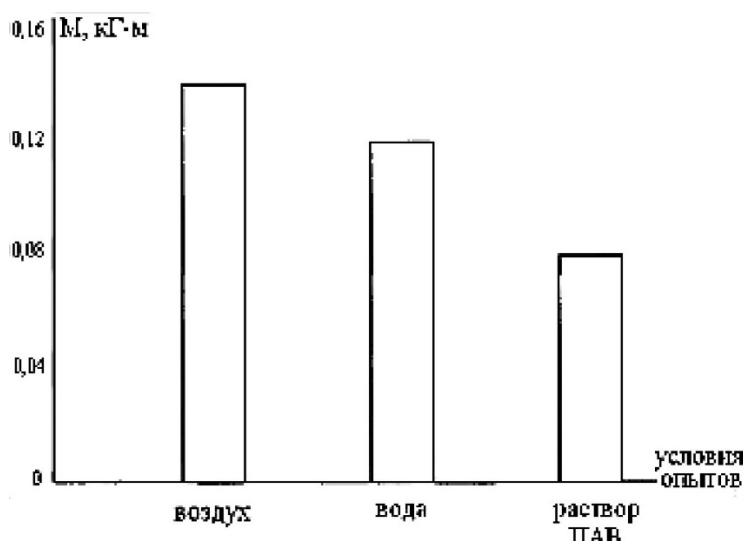
Среда	P, Н	$\Delta(P)$ , Н	M, Н·м	$\Delta(M)$ , Н·м
Воздух	820	320	1,4	1,2
Вода	690	300	1,2	0,9
Раствор ПАВ	520	200	0,8	0,3

Примечание:  $\Delta(P)$ ,  $\Delta(M)$  – среднеквадратичные отклонения соответствующих величин.

При сверлении «всухую» были получены высокие значения P и M, а режущая кромка сверла почти сразу необратимо повреждалась. Из этих опытов становится очевидным, что обработка таких твердых пород «всухую» на большие глубины очень затруднительна. На рисунке 9 и 10 показана зависимость параметров P и M для вышеописанных экспериментальных условий. Использование чистой воды при сверлении дает некоторое уменьшение силовых параметров процесса сверления и это подтверждает известный факт, что вода является активной средой по отношению к компонентам горных пород, понижающей их поверхностную энергию, а следовательно и механические свойства этих горных пород. При добавлении небольшого количества ПАВ в дистиллированную воду происходит резкое облегчение процесса сверления алевролита. Средние значения характеристик процесса сверления P и M уменьшаются практически в 1,5 раза. Это свидетельствует об охрупчивающем действии данного раствора ПАВ.



**Рисунок 9** – Величина осевого усилия при сверлении алевролита в различных условиях



**Рисунок 10** – Величина крутящего момента при сверлении алевролита в различных условиях

Одновременно добавка ПАВ уменьшает и осцилляции силовых параметров, характеризуемые параметрами  $\Delta[P]$ ,  $\Delta[M]$  (табл. 3), т.е. процесс сверления в присутствии ПАВ протекает более равномерно. Действительно, большие осцилляции величин P и M обусловлены скачкообразным характером актов разрушения обрабатываемой породы. Сценарий появления этих скачков следующий. При достижении определенного уровня механических напряжений в зоне резания происходит мгновенное



хрупкое разрушение относительно большого участка породы, и сверло скачком перемещается на определенное расстояние с малым усилием. Затем оно ударяется режущей кромкой о еще не разрушенную часть материала, и картина повторяется. Именно этими ударами, скорее всего, и вызвано разрушение режущей кромки инструмента. В присутствии среды – воды и, особенно, раствора ПАВ, разрушение породы происходит при меньших напряжениях, но более медленно. Кинетика процесса определяется скоростью поступления среды в зону разрушения и адсорбцией ПАВ. Поэтому при сверлении породы в присутствии растворов ПАВ сила ударов сверла значительно слабеет, а их частота падает, что приводит к уменьшению мощности и интенсивности скачков и, следовательно, к увеличению стойкости инструмента [34, 36].

Совокупность полученных экспериментальных результатов позволяет говорить о проявлении эффекта адсорбционного понижения прочности алевролита в слабых растворах додециламина гидрохлорида. Этот эффект заключается в резком снижении прочности и увеличении хрупкости горной породы. Он может быть обусловлен облегчением зарождения и роста трещин в зоне резания и возможностью изменения заряда и подвижности дислокаций в приповерхностном слое в присутствии водных растворов ПАВ.

### Заключение

Результаты проведенных до настоящего времени исследований свидетельствуют о возможности значительного снижения энергоемкости и стоимости бурения и измельчения в условиях отечественных месторождений за счет рационального подбора адсорбционно-активных технологических сред. На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы [37].

1. Эффективными буровыми жидкостями, понижающими прочностные характеристики горной породы и оптимизирующими энергосиловые параметры процесса бурения, являются технологические среды, содержащие водные растворы электролитов и ионногенных ПАВ. Для опытно-промышленной отработки соответствующих технологий целесообразно использовать водные суспензии буровой мелочи, стабилизированные добавками щелочей (KOH, NaOH) в количестве, необходимом для достижения устойчивых значений показателя pH = 10–12.

2. Введение в оборотную воду щелочей с активными добавками ПАВ обеспечивает ускорение процесса измельчения горных пород отечественных месторождений. Слабощелочные растворы могут быть использованы также для кондиционирования продукта дробления и/или измельчения горной породы.

### Литература

1. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – М. : Наука, 1979. – 384 с.
2. Алексеев А.Д. Эффективная поверхностная энергия горных пород и поверхностно-активные среды // Сб. «Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем». – Киев, 1981. – Вып. 13. – С. 65–71.
3. Щукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. – М. : Нобель Пресс, 2015. – 679 с.
4. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Phil. Trans. of the Roy. Soc. London. – 1921, Ser. A. – № 221. – P. 163–198.
5. Разрушение / Ред. Либовиц Г. Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М. : Мир, 1973. – Т. 1. – 243 с.
6. Герасимов Я.И., Древинг В.П., Еремин Е.Н., Киселев А.В., и др. Курс физической химии. – Т. 1, 2. – Л. : Химия, 1987. – 881 с.
7. Об адсорбционном понижении прочности высокодисперсных пористых структур / Е.Д. Щукин [и др.] // ДАН СССР. – 1966. – Т. 167. – С. 1109–1112.
8. Charles R.J. Static fatigue of glass // J. Appl. Phys. – 1958. – Vol. 29. – № 11. – P. 1549–1560.
9. Wiederhorn S.M. Fracture surface energy of soda-lime glass // Materials Science Research. – 1966. – Vol. 3. – P. 503–528.
10. Wiederhorn S.M. Influence of water vapour on crack propagation in soda-lime glass // J. Amer. Ceram. Soc. – 1967. – Vol. 50. – № 8. – P. 407–414.
11. Wiederhorn S.M. Crack growth as an interpretation of static fatigue // J. Non-Cryst. Solids. – 1975. – Vol. 19. – P. 169–181.
12. Wiederhorn S.M., Friemen S.W., Fuller E.R. Jr., Simmons C.J. Effects of Water and Other Dielectrics on Crack Growth // J. Mater. Sci. – 1982. – Vol. 17. – № 12. – P. 3460–3478.
13. Берштейн В.А. Механогидролитические процессы и прочность твердых тел. – Л. : Наука, 1987. – 320 с.
14. Разрушение неметаллов и композитных материалов / Ред. Г.М. Либовиц. – М. : Мир, 1976. – Т. 7. – 636 с.
15. Малкин А.И., Дячкин А.А., Никитин Н.В. Кинетические модели роста трещин и статистика долговечности твердых тел // Доклады РАН. – 1997, 1988. – Т. 354. – № 3. – С. 327–330.
16. Малкин А.И. Кинетические модели в физико-химической механике разрушения : автореферат дис. ... доктора физ.-мат. наук. – М. : ИПРИМ РАН, 1998. – 50 с.



17. Waza T., Kurita K., Mizutani H. The effect of water on the subcritical crack growth in silicate rocks // *Tectonophysics*. – 1980. – Vol. 67. – № 1, 2. – P. 25–34.
18. Sano O., Ito J., Terada M. Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression // *J. Geophys. Res.* – 1981. – Vol. 86. – № 10. – P. 9299–9311.
19. Томашевская И.С., Хамидуллин Я.Н. Предвестники разрушения образцов горных пород // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. – 1972. – № 5. – С. 47–53; Возможность предсказания момента разрушения образцов горных пород на основе флуктуационного механизма роста трещин // *Д.АН СССР*. – 1972. – Т. 207. – № 3. – С. 580–582.
20. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. *Сопротивление материалов*. 7-е изд. – М. : Высшая школа, 2009. – 560 с.
21. Anderson O.L., Grew P.C. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1977. – Vol. 15. – № 1. – P. 77–104.
22. Atkinson B., Meredith P. Stress corrosion of quartz: a note of influence of chemical environments // *Tectonophysics*. – 1988. – Vol. 77. – № 1–2. – P. 1–11.
23. Jones R.H., Environment induced crack growth in ceramics and glasses // In: *Environment-induced cracking of materials*. Vol. 1: Chemistry, mechanics and mechanisms. Proceedings of the second international Conference of Environment-induced cracking of materials. Banff, Alberta, Canada / Eds. Shipilov S.A., Jones R.H., Olive J.M., Rebak R.B. – Amsterdam : Elsevier, 2008. – P. 449–466.
24. Westwood A.R.C., Ahern J.S., Mills J.J. Development in the theory and applications of chemimechanical effects // *Colloids and surf.* – 1981. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–35.
25. Westwood A.R.C., Macmillan N.H. Environment-sensitive hardness of nonmetals // *RIAS Technical report № 72-08*, Martin Marietta corporation, 1972, April. – 35 p.
26. Macmillan N.H., Westwood A.R.C. Surface charge-dependent mechanical behavior of non-metals // *Eight Technical report to ONR*. Martin Marietta corporation, 1972, September. – 42 p.
27. Ishido T., Nishizawa O. Effects of Zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression // *J. Geophys. Research*. – 1984. – Vol. 89. – № B6. – P. 4153–4159.
28. Изучение адсорбции сульфонов из водных растворов на поверхности известняка и ее влияние на микротвердость известняка / Н.И. Иванова [и др.] // *Ж. прикладной химии*. – 1990. – № 7. – С. 1478–1482.
29. Адсорбция сульфонов из водных растворов на поверхности известняка / Н.И. Иванова [и др.] // *Коллоидн. Журн.* – 1990. – Т. 52. – № 2. – С. 408–410.
30. Влияние адсорбции сульфонов на скорость резания известняков / Н.И. Иванова [и др.] // *Доклады XI Всесоюзной конференции «Поверхностные явления в расплавах и технология новых материалов»*. – Киев, 1991. – С. 41–43.
31. Изучение влияния адсорбции ОП-10 из водных растворов на изменение механических свойств кальцита / Н.И. Иванова [и др.] // *Ж. прикладной химии*. – 1991. – Т. 64. – № 2. – С. 457–440.
32. Курбацкий В.А. Влияние водных растворов поверхностно-активных веществ и их смесей на механические свойства известняка : автореферат дисс. ... кандидата хим. наук. – М. : МГУ им. М.В. Ломоносова, 1992. – 18 с.
33. Фрумкин А.Н. Потенциалы нулевого заряда. – М. : Наука, 1982. – 259 с.
34. Гречишников В.А., Чемборисов Н.А., Схиртладзе А.Г. [и др.]. *Резание материалов*. – Набережные Челны : Камск. гос. инж.-экон. академия, 2006. – Т. 3: Режущий инструмент. – 285 с.
35. *Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ*. – М. : Всесоюзный научно-исследовательский институт инструмента (ВНИИ), 1983. – 22 с.
36. Доценко В.А. *Изнашивание твердых тел*. – М. : Цинтихимнефтемаш, 1990. – 192 с.
37. Малкин А.И., Савенко В.И., Топоров Ю.П. *Физико-химические методы интенсификации бурения и измельчения горных пород*. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing GmbH&Co, 2017. – 130 с.

## References

1. Rebinder P.A. *Selected works. Surface phenomena in dispersed systems. Physicochemical mechanics*. – М. : Science, 1979. – 384 p.
2. Alekseev A.D. Effective surface energy of rocks and the surface-active environments // *Coll. «Physical and chemical mechanics and lyophilicity of disperse systems»*. – Kiev, 1981. – Ep. 13. – P. 65–71.
3. Shchukin E.D., Savenko V.I., Malkin A.I. *Lectures on physicochemical mechanics*. – М. : Nobel Press, 2015. – 679 p.
4. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // *Phil. Trans. of the Roy. Soc. London*. – 1921, Ser. A. – № 221. – P. 163–198.
5. *Destruction / Red. Libovitz G. Microscopic and macroscopic bases of fracture mechanics*. – М. : World, 1973. – Vol. 1. – 243 p.
6. Gerasimov Ya.I., Dreving V.P., Eremin E.N., Kiselev A.V., and others. *Course of physical chemistry*. – V. 1, 2. – L. : Chemistry, 1987. – 881 p.
7. About adsorption reduction of strength of highly dispersed porous structures / E.D. Shchukin [et al.] // *DAN USSR*. – 1966. – Vol. 167. – P. 1109–1112.
8. Charles R.J. Static fatigue of glass // *J. Appl. Phys.* – 1958. – Vol. 29. – № 11. – P. 1549–1560.
9. Wiederhorn S.M. Fracture surface energy of soda-lime glass // *Materials Science Research*. – 1966. – Vol. 3. – P. 503–528.
10. Wiederhorn S.M. Influence of water vapour on crack propagation in soda-lime glass // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1967. – Vol. 50. – № 8. – P. 407–414.
11. Wiederhorn S.M. Crack growth as an interpretation of static fatigue // *J. None Cryst. Solids*. – 1975. – Vol. 19. – P. 169–181.





12. Wiederhorn S.M., Friemen S.W., Fuller E.R. Jr., Simmons C.J. Effects of Water and Other Dielectrics on Crack Growth // *J. Mater. Sci.* – 1982. – Vol. 17. – № 12. – P. 3460–3478.
13. Berstein V.A. *Mechanohydrolytic Processes and Strength of Solids.* – L. : Nauka, 1987. – 320 p.
14. *Destruction of Nonmetals and Composite Materials / Edited by V.A. Berstein, G.M. Libovitz.* – M. : World, 1976. – Vol. 7. – 636 p.
15. Malkin A.I., Dyachkin A.A., Nikitin N.V. Kinetic models of growth of cracks and statistics of durability of firm bodies // *Reports of RAS*, 1997, 1988. – Vol. 354. – № 3. – P. 327–330.
16. Malkin A.I. Kinetic models in physical and chemical mechanics of destruction : Proc. ... Doctor of Physics and Mathematics. – M. : IPrim RAS, 1998. – 50 p.
17. Waza T., Kurita K., Mizutani H. The effect of water on the subcritical crack growth in silicate rocks // *Tectonophysics.* – 1980. – Vol. 67. – № 1, 2. – P. 25–34.
18. Sano O., Ito J., Terada M. Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression // *J. Geophys. Res. B.* – 1981. – Vol. 86. – № 10. – P. 9299–9311.
19. Tomashevskaya I.S., Khamidullin Ya.N. Precursors of Rock Sample Destruction // *Izv. of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth.* – 1972. – № 5. – P. 47–53; Possibility of Prediction of Rock Sample Destruction Moment on the Basis of Fluctuation Mechanism of Crack Growth // *D.A. USSR Academy of Sciences.* – 1972. – V. 207. – № 3. – P. 580–582.
20. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Materials resistance.* 7th ed. – M. : Higher School, 2009. – 560 p.
21. Anderson O.L., Grew P.C. Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics // *Rev. Geophys. Space Phys.* – 1977. – Vol. 15. – № 1. – P. 77–104.
22. Atkinson B., Meredith P. Stress corrosion of quartz: a note of influence of chemical environments // *Tectonophysics.* – 1988. – Vol. 77. – № 1–2. – P. 1–11.
23. Jones R.H., Environment induced crack growth in ceramics and glasses // In: *Environment-induced cracking of materials. Vol. 1: Chemistry, mechanics and mechanisms. Proceedings of the second international Conference of Environment-induced cracking of materials. Banff, Alberta, Canada / Eds. Shipilov S.A., Jones R.H., Olive J.M., Rebak R.B.* – Amsterdam : Elsevier, 2008. – P. 449–466.
24. Westwood A.R.C., Ahern J.S., Mills J.J. Development in the theory and applications of chemimechanical effects // *Colloids and surf.* – 1981. – Vol. 2. – № 1. – P. 1–35.
25. Westwood A.R.C., Macmillan N.H. Environment-sensitive hardness of nonmetals // *RIAS Technical report № 72-08, Martin Marietta corporation*, 1972, April. – 35 p.
26. Macmillan N.H., Westwood A.R.C. Surface charge-dependent mechanical behavior of non-metals // *Eight Technical report to ONR, Martin Marietta corporation*, 1972, September. – 42 p.
27. Ishido T., Nishizava O. Effects of Zeta potential on microcrack growth in rock under relatively low uniaxial compression // *J. Geophys. Research.* – 1984. – Vol. 89. – № B6. – P. 4153–4159.
28. Study of adsorption of sulfonols from aqueous solutions on the limestone surface and its influence on the microhardness of limestone / N.I. Ivanova [et al.] // *J. Applied chemistry.* – 1990. – № 7. – P. 1478–1482.
29. Adsorption of sulfonols from water solutions on the limestone surface / N.I. Ivanova [et al.] // *Colloidn. Zhurn.* – 1990. – V. 52. – № 2. – P. 408–410.
30. Effect of adsorption of sulfonols on cutting speed of limestones / N.I. Ivanova [et al.] // *Reports of XI All-Union Conference «Surface phenomena in melts and technology of new materials».* – Kiev, 1991. – P. 41–43.
31. Study of the effect of OP-10 adsorption from aqueous solutions on the change in mechanical properties of calcite / N.I. Ivanova [et al.] // *Zh. of Applied Chemistry.* – 1991. – V. 64. – № 2. – P. 457–440.
32. Kurbatsky V.A. Influence of aqueous solutions of surface-active substances and their mixtures on mechanical properties of limestone : Abstract of dissertation. ... candidate of chemical sciences. – M. : Lomonosov Moscow State University, 1992. – 18 p.
33. Frumkin A.N. Potentials of zero charge. – M. : Nauka, 1982. – 259 p.
34. Grechishnikov V.A., Chamborisov N.A., Skhirtladze A.G. and others. *Cutting of materials.* – Naberezhnye Chelny : Kamsk. gos. Ing. academy icon, 2006. – Vol. 3. Cutting tool. – 285 p.
35. Guide to the universal dynamometer UDM design VNII. – M. : All-Union Research Institute of Instrumentation (VNII), 1983. – 22 p.
36. Associated-Professor V.A. *Wearings of solid bodies.* – M. : Tsintikhimneftemash, 1990. – 192 p.
37. Mlkin A.I., Savenko V.I., Toporov Y.P. *Physical and chemical methods of intensification of drilling and grinding of rocks.* – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing GmbH&Co, 2017. – 130 p.