

УДК 544.723.237

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА П.А. РЕБИНДЕРА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

В.Д. Евсеев

Томский политехнический университет

E-mail: evseevd@mail.ru

Дано объяснение эффекта П.А. Ребиндера при разрушении горных пород, минералов в присутствии жидкостей различной природы с учетом возникающей при разрушении электризации свежих поверхностей растущих трещин. Указана причина невозможности использования эффекта П.А. Ребиндера при бурении скважин.

Ключевые слова:

Неорганические диэлектрики, горная порода, полярные и неполярные жидкости, электрическая проводимость, время релаксации электрических зарядов, прочность, твердость, бурение.

Key words:

Nonorganic dielectrics, rock, polar and nonpolar liquids, electrical conductivity, rock electrical conductivity, relaxation time electrical charge, strength, indentation hardness, drilling.

Изменение твердости горных пород, происходящее в присутствии различных по природе жидкостей, практически всегда связывается с уменьшением удельной свободной поверхностной энергии (УСПЭ) γ_0 разрушаемых минералов, входящих в состав горной породы, при избирательной физической адсорбции молекул жидкости на возникающих свежих поверхностях адгезионного или когезионного происхождения (эффект П.А. Ребиндера) [1]. С этим эффектом на протяжении нескольких десятилетий связывались надежды в увеличении механической скорости бурения. Надежды не оправдались. Возникла странная ситуация: при лабораторном исследовании вносимый в воду химический реагент (понижитель твердости) обеспечивает значительное снижение твердости образца горной породы (первые десятки процентов), но введение этого же реагента в буровой раствор на водной основе практически всегда не обеспечивает прироста механической скорости бурения. По нашему мнению, появление этого парадокса связано с неверной трактовкой природы эффекта П.А. Ребиндера при разрушении горных пород, минералов.

Традиционное объяснение природы эффекта П.А. Ребиндера вызывает следующее возражение. Вывод об изменении прочности разрушаемых минералов вследствие снижения их УСПЭ был сделан исходя из формулы А.А. Гриффита, связывающей прочность σ и γ_0 тела $\sigma = \sqrt{\sigma_0 \gamma_0 / l}$, где l – длина трещины в теле (первичный дефект). Дальнейшие исследования показали, что в таком виде формула А.А. Гриффита неточна: рост трещины нормального отрыва в твердых телах сопровождается механическими потерями энергии (пластическая деформация в вершине трещины, например) $\gamma_{мп}$ и эта добавка определяет величину эффективной энергии разрушения $\gamma_{эфф} = \gamma_0 + \gamma_{мп}$ – важнейшую прочностную характеристику разрушаемого тела. Величина $\gamma_{мп}$ у металлов, например, превосходит значение их УСПЭ в $10^2 \dots 10^4$ раз [2]. Долгое время оставался открытым вопрос о природе механических потерь

энергии при разрушении хрупких диэлектрических минералов: согласно [2], величина $\gamma_{эфф}$ превосходит значение γ_0 минералов в 1,5...10 раз.

Для понимания механизма влияния жидкости на разрушение минералов, горных пород необходимо внести новые ключевые понятия, характеризующие процесс разрушения. Известно [3], что развитие трещин нормального отрыва при разрушении неорганических диэлектриков, какими являются основные породобразующие минералы, сопровождается пространственным разделением противоположных по знаку электрических зарядов: на свежобразованной поверхности возникает электрический заряд плотностью q_0 и наблюдаются эмиссии:

- электронов высоких энергий;
- электромагнитная.

В [4] явление электризации свежих поверхностей при разрушении легло в основу модифицирования модели эффекта П.А. Ребиндера, но парадокс, упомянутый выше, рассмотрен не был. В данной статье мы намерены ликвидировать это упущение.

Разрушение минералов-диэлектриков при их механическом нагружении сопровождается механическими потерями энергии электростатической природы $\gamma_{эл} = \gamma_{эл}(q_0, T, \tau, l)$, где T , τ – время релаксации зарядов в разрушаемом диэлектрике и жидкости, проникающей в полость растущей трещины, соответственно. Рост энергии разрушения $\gamma_{эфф}$ и увеличение прочности тела объясняется появлением дополнительных электрических сил взаимодействия между разноименными избыточными электрическими зарядами, возникающими на противоположных сторонах растущей трещины нормального отрыва.

Время релаксации электрических зарядов неорганических диэлектриков с плотной упаковкой решетки при низких температурах определяется подвижностью ионов-примесей, наличием газожидких примесей в минералах. Электропроводность минералов-диэлектриков при нормальной температуре не является постоянной величиной,

изменяется в больших пределах. Более рыхлая структура диэлектриков с неплотной упаковкой решетки обеспечивает не только большую подвижность ионов, но и проникновение молекул воды в объем диэлектрика. Бóльшее влияние на изменение величины T в диэлектрике оказывает наличие в нем открытой пористости, капиллярных каналов. Это обеспечивает снижение времени релаксации T зарядов в диэлектрике и должно приводить к снижению его прочности. Так как величина T диэлектрических минералов достигает значений, превышающих 10^5 с [5], то снижение прочности будет обнаруживаться только при длительных временах действия механического усилия, удовлетворяющих условию $t \gg T$.

Появление электрических зарядов q_0 на сторонах растущих трещин при разрушении неорганических диэлектриков, обладающих величиной T , приводит к появлению релаксационного тока j_1 , текущего через разрушаемый диэлектрик, и тока j_2 , текущего через жидкость, проникающую в полость трещины, если диэлектрик разрушается в присутствии жидкости. В последнем случае жидкость может внести серьезные изменения в развитие релаксационных процессов в вершине трещины при выполнении неравенства $\tau < T$.

В соответствии с наличием двух токов релаксации электрических зарядов, следует различать объемный и поверхностный эффекты П.А. Ребиндера. Объемный эффект П.А. Ребиндера – снижение величины $\gamma_{\text{нп}}$ и прочности диэлектрика в результате снижения T разрушаемого диэлектрика. Поверхностный эффект П.А. Ребиндера – снижение прочности разрушаемого в присутствии жидкости неорганического диэлектрика в результате релаксации электрических зарядов через жидкость, проникающую в полость трещины нормального отрыва. Иными словами, поверхностный эффект П.А. Ребиндера – стремление механически нагруженной неравновесной системы диэлектрик-жидкость к равновесному состоянию, возникающему при полной релаксации зарядов со свежей поверхности.

Доля участия токов j_1, j_2 в релаксации зарядов и влияния на уменьшение прочности диэлектрика определяется соотношением времен релаксации зарядов T и τ : при $T > \tau$ доминирует поверхностный эффект, при $T < \tau$ – объемный. Практический интерес представляют два случая: а) максимальное облегчение разрушения диэлектрика с помощью жидкости, б) сдерживание разрушения тела с помощью жидкости. Первый случай будет реализован при выполнении неравенства $T \gg \tau$, прочность диэлектрика при этом снизится до минимального значения $\sigma_{\text{мин}}$, второй – при разрушении диэлектрика в присутствии диэлектрической жидкости, когда времена релаксации зарядов в диэлектрике и жидкости соизмеримы. В последнем случае прочность диэлектрического минерала будет иметь максимальное значение $\sigma_{\text{макс}}$ в течение длительного времени действия нагрузки. Разница $\sigma_{\text{макс}} - \sigma_{\text{мин}} = \Delta\sigma$

определяет диапазон искусственного изменения прочности диэлектрика.

Так как величина T неорганических диэлектриков определяется, главным образом, примесными ионами и, в частности, существенно зависит от способности диэлектрика к абсорбции воды, то способность диэлектрика к изменению прочности под влиянием жидкости, в присутствии которой происходит механическое нагружение тела, будет определяться начальным значением времени релаксации электрических зарядов в диэлектрике T . Для снижения тока j_1 необходимо уменьшить содержание влаги в испытываемых образцах (длительное выдерживание образцов над гигроскопическими веществами типа P_2O_5 , H_2SO_4 в эксикаторе, либо высокотемпературное высушивание образцов в вакууме). Несоблюдение этого условия приведет к снижению плотности электрических зарядов за счет объемного эффекта П.А. Ребиндера, т. е. снижению чувствительности разрушаемого диэлектрика к влиянию жидкости, в присутствии которой происходит разрушение, к снижению интенсивности протекания упомянутых выше электрофизических процессов.

При разрушении диэлектриков в отсутствии влияния жидкости (разрушение в вакууме) максимальной прочностью (при данном значении l) будет обладать диэлектрик, который после подготовки к исследованию (подсушивания) приобрел максимальное значение времени релаксации электрических зарядов $T_{\text{макс}}$. В этом случае ток релаксации j_1 обеспечивает длительное существование неравновесной составляющей эффективной энергии разрушения $\gamma_{\text{нп}}$, т. е. обеспечивает относительно постоянное значение величины $q_0 = \text{тах}$ во времени. В этих условиях испытания диэлектрика будет наблюдаться смыкание сторон трещин нормального отрыва при снятии механической нагрузки. Подобный процесс будет наблюдаться и при нагружении диэлектрика в присутствии чистой диэлектрической (неполярной) жидкости, обладающей незначительной электропроводностью: диэлектрическая неполярная жидкость будет вытесняться из полости трещины при смыкании ее сторон. Для наблюдения такого явления необходима тщательная очистка неполярной жидкости от электролитических загрязнений, воды.

Вода является наиболее широко распространенным жидким загрязнением диэлектрических (неполярных) жидкостей, в которые она попадает непосредственно из воздуха. Это приводит и резко (на порядки) увеличению электропроводности этих жидкостей. Дополнительное снижение τ диэлектрической жидкости при проникновении в нее воды произойдет при наличии в жидкости твердых загрязнений в результате диссоциации молекул этих загрязнений. Например, насыщенные углеводороды в состоянии технической чистоты имеют электропроводность $10^{-10} \dots 10^{-8}$ См/м, тогда как в состоянии наивысшей химической чистоты их электропроводность $10^{-18} \dots 10^{-17}$ См/м [6], т. е. значительно меньше.

Время релаксации электрических зарядов, создаваемое жидкостью в полости растущей трещины нормального отрыва, является показателем способности жидкости изменять прочность диэлектрика: чем меньше τ , тем меньше и прочность («заземляющее» действие жидкости). Использование электропроводящей жидкости для снижения прочности диэлектрика будет тем эффективней, чем больше q_0 на свежей поверхности. Наоборот, с уменьшением q_0 влияние жидкости на облегчение разрушения будет снижаться. Один и тот же диэлектрик будет иметь различную чувствительность к действию на него жидкости, в присутствии которой происходит разрушение, если прочностному испытанию образца предшествуют процедуры, в различной степени обеспечивающие обезвоживание диэлектрика.

Оценка времени релаксации электрических зарядов, создаваемого жидкостью в полости растущей трещины, основанная на измерении относительной диэлектрической проницаемости и удельной объемной электропроводности жидкости, в присутствии которой происходит разрушение, представляет собой лишь приближение к тому значению τ , которое реально возникает в полости трещины и определяет развитие разрушения. Это связано с изменением электропроводящих свойств жидкости в полости трещины из-за:

- растворения разрушаемого тела в жидкости;
- обменных процессов в полости трещины между жидкостью и диэлектриком;
- ориентирующего влияния на молекулы жидкости сближающихся сторон трещины;
- диссоциации загрязнений, находящихся в диэлектрике и жидкости;
- изменения поверхностного натяжения жидкости и ее коэффициента динамической вязкости, влияющих на скорость проникновения жидкости в полость трещины.

Значительная зависимость электропроводности неполярных жидкостей от их загрязненности означает, что и величина поверхностного эффекта П.А. Ребиндера при разрушении неорганических диэлектриков, обладающих большой величиной T , в присутствии неполярных жидкостей будет зависеть от чистоты последних: снижение прочности диэлектрика в присутствии неполярной жидкости тем меньше, чем меньше электропроводность этих жидкостей. Контроль содержания воды в неполярной жидкости, в присутствии которой происходит разрушение диэлектрика, как и контроль содержания воды в самом диэлектрике — является контролем влияния токов релаксации j_1, j_2 на изменение величины q_0 на свежей поверхности, т.е. на изменение прочности диэлектрика.

Оценка разупрочняющего действия жидкости по величине времени релаксации электрических зарядов, создаваемого ею в полости растущей трещины, позволяет определить условия, которые необходимо выполнять для исследования влияния жидкости на изменение прочности диэлектрических тел (условия корректности эксперимента):

- очистка жидкости от инородных электролитических жидких и твердых загрязнений;
- очистка диэлектрика (ликвидация капиллярной, гигроскопической влаги, удаление адсорбционного слоя с поверхности).

Так как величина времени релаксации электрических зарядов определяется, в основном, электропроводностью (относительная диэлектрическая проницаемость ε лишь корректирует значения T и τ), то именно электропроводность разрушаемого диэлектрика и жидкости, в присутствии которой происходит разрушение, определяет то или иное проявление эффекта П.А. Ребиндера.

Предлагаемая модель эффекта позволяет ответить на многие важные вопросы, возникавшие при проведении экспериментов и не получившие до настоящего времени объяснения. В частности, причина различного действия на прочность полярных и неполярных жидкостей, причина значительного снижения прочности диэлектриков в воде и водных растворах и пр. Одно из центральных мест среди этих вопросов занимает выяснение причины минимальной прочности неорганического стекла в воде. По нашему мнению, значительное снижение прочности стекла в воде связано с уменьшением величины τ в возникающем при проникновении воды в полость трещины водном растворе продуктов гидролиза. Диффузия катионов Na^+ , K^+ , Li^+ и пр. в воду обеспечивает рост электропроводности водных растворов до значений 1,0 См/м и выше [7].

Характер изменения электропроводности водных растворов, возникающих в полости трещин нормального отрыва при разрушении стекол различного химического состава (электропроводность водных растворов продуктов гидролиза в полости трещины от химического состава стекол приобретает косвенный характер [8]), объясняет обнаруженное в [9] сближение прочности этих стекол при увеличении времени действия механического усилия.

Непрерывное увеличение электропроводности водных растворов во времени в условиях исследования статической усталости неорганического стекла обеспечит ускорение снижения прочности стекла в присутствии воды. Эффект ускорения будет отсутствовать при исследовании статической усталости стекла в присутствии других жидкостей. Это объясняет расхождение величины прочности стекла в условиях наблюдения статической усталости в воде и других жидкостях, установленное в [10]. Объясняет и то, что статическая усталость кварцевого стекла на воздухе всегда менее выражена, чем усталость щелочного стекла [11].

Оценка разупрочняющего действия жидкости по величине их электропроводности объясняет суть «исключительного» действия нитробензола и формамида на прочность стекла, обнаруженные в [12, 10]: несмотря на большое значение относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon=36$, нитробензол отличает высокие диэлектрические свойства [6], а формамид, будучи более полярным

($\varepsilon=111$), чем вода ($\varepsilon=81$), но не обладая способностью к гидролизу, не обеспечивает снижения прочности стекла, достигнутого в присутствии воды.

Условия нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях и горной породы забоя скважины резко отличны. Выполнение условий корректности эксперимента (подсушивание образцов горной породы) перед определением твердости методом Л.А. Шрейнера в лабораторных условиях (в воздухе) обеспечивает снижение тока j_1 и, как следствие, увеличение твердости горной породы до максимально возможного значения H_{\max}^n . Для максимального снижения твердости горной породы в присутствии жидкости с помощью поверхностного эффекта П.А. Ребиндера необходимо ускорить релаксацию электрических зарядов, возникающих на сторонах растущих трещин нормального отрыва в ядре сжатия горной породы под пятном контакта.

В лабораторных исследованиях жидкостью, в присутствии которой определяется твердость горной породы, является дистиллированная вода, в которую дополнительно вводят ионогенные химические соединения (аналог бурового раствора на водной основе). Характерной особенностью изменения электропроводности дистиллированной воды при росте концентрации вводимого в нее ионогенного соединения является значительное (порядки) возрастание электропроводности возникающих растворов уже при малых концентрациях вводимого вещества. Это и обеспечивает снижение твердости горной породы в лабораторных условиях до минимального значения H_{\min}^n . Величина $H_{\max}^n - H_{\min}^n$ определяет диапазон возможного искусственного изменения твердости испытываемой горной породы. Агрегатная твердость горной породы в присутствии чистой диэлектрической жидкости будет равна максимальному значению H_{\max}^n .

На забое скважины условия для проявления поверхностного эффекта П.А. Ребиндера выглядят совсем иначе. Условия корректности проведения эксперимента здесь заведомо невыполнимы: на забое разрушается горная порода, находящаяся в состоянии естественной влажности. Даже при отсутствии бурового раствора на разрушение такой горной породы вдавливанием индентора будет влиять вода, в различной степени насыщенная растворенными в ней минералами. Удельное электрическое сопротивление капиллярной и гравитационной воды, а точнее, естественно возникших водных растворов, находящихся в горной породе, меняется в диапазоне от долей Ом·м при высокой общей минерализации ($M > 10$ кг/м³) до 10³ Ом·м при низкой минерализации ($M < 0,01$ кг/м³). В этих условиях максимальное значение твердости горной породы забоя скважины H_{\max}^z будет существенно уступать твердости, достигнутой в лабораторных условиях: $H_{\max}^z < H_{\max}^n$.

При положительном дифференциальном давлении горная порода забоя скважины будет разрушаться в присутствии фильтрата бурового раствора. Начальное значение электропроводности буровых растворов формируется при их приготовлении. На

ее величину влияют не только электролиты, но и различные химические реагенты, глинистые минералы. Величина исходной концентрации ионогенных соединений в буровом растворе определяет дальнейшее изменение его электропроводности при добавлении в раствор компонент, введение которых диктуется технологическими особенностями бурения, в том числе и понизителей твердости: для слабо- и среднеминерализованных растворов изменение электропроводности значительно, но при концентрации солей, превышающей 5 %, компонентный состав бурового раствора уже на его электропроводность «существенного влияния не оказывает». Этот факт известен [13], но никогда не привлекался для объяснения проявлений эффекта П.А. Ребиндера. Иными словами, введение в буровой раствор реагентов – понизителей твердости, вызывающих резкое снижение τ при добавлении их в дистиллированную воду при проведении лабораторного исследования, может совершенно не изменить τ бурового раствора. Это означает, что диапазон возможного искусственного изменения твердости горной породы на забое скважины ($H_{\max}^z - H_{\min}^z$) или значительно меньше, чем при испытании породы в лабораторных условиях, или вообще отсутствует.

Если геологический разрез позволяет использовать в качестве бурового раствора поверхностные грунтовые и дождевые пресные воды, обладающие малой электропроводностью (0,001...0,01 См/м), то введение ионогенных соединений в такой буровой раствор может обеспечить прирост механической скорости бурения (но и это произойдет только в том случае, если ток релаксации j_1 , текущий в минералах разрушаемой на забое горной породы, не обеспечивает релаксацию электрического заряда q_0), но если концентрация ионогенных веществ в растворе превышает 5 %, то надеяться на увеличение механической скорости бурения введением в раствор понизителей твердости нет никаких оснований. Различия в развитии релаксационных процессов в вершине трещины при лабораторных условиях разрушения горной породы и разрушения ее в условиях забоя скважины является причиной практического отсутствия эффекта П.А. Ребиндера при бурении скважин.

О склонности диэлектрических минералов, горных пород к проявлению эффекта П.А. Ребиндера можно судить не только по плотности электрических зарядов q_0 на свежей поверхности, но и по эмиссионным характеристикам: наличию эмиссии электронов высоких энергии, величине энергии эмитируемых электронов, интенсивности генерирования электромагнитных сигналов при механическом нагружении.

Для максимального облегчения разрушения горной породы породоразрушающим инструментом на забое скважины и роста механической скорости бурения в буровой раствор на водной основе необходимо вводить такие реагенты, которые не только вызывают рост электропроводности раствора, но и стимулируют возникновение сдвиговой не-

устойчивости горной породы забоя при работе бурового долота: уменьшают коэффициент сжимаемости дисперсионной среды бурового раствора, способствуют возникновению адсорбционных слоев на поверхности разрушающихся минералов,

обладающих большим сопротивлением сжатию и малым – сдвигу. Стимулируя таким образом разрушение горной породы на забое скважины, мы одновременно провоцируем возникновение сдвиговой неустойчивости горных пород стенки скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформирования и разрушения // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108. – № 1. – С. 3–42.
2. Бартенев Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. – М.: Стройиздат, 1974. – 240 с.
3. Евсеев В.Д., Яворович Л.В. Современное состояние проблемы оценки напряженного состояния горных пород по параметрам электромагнитной эмиссии // Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства: Матер. Междунар. научно-техн. конф. / Отв. ред. Б.Д. Васильев, И.В. Гончаров. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 78–86.
4. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении неорганических диэлектриков и электрокогезионные явления // Известия вузов. Физика. – 1985. – Т. 28. – № 2. – С. 29–35.
5. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
6. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков / под ред. Г.С. Кучинского. – Л.: Энергия, 1972. – 295 с.
7. Кузнецов А.Я. К вопросу о поверхностной электропроводности стекол во влажной атмосфере // Журнал физической химии. – 1953. – Т. 27. – № 5. – С. 657–661.
8. Гуткин Н.Г., Евстропьев К.С., Кузнецов А.Я. Поверхностная электропроводность стекол во влажной атмосфере // Журнал технической физики. – 1952. – Т. 22. – № 8. – С. 1313–1324.
9. Асланова М.С. Современные воззрения на прочность стеклянного волокна. – М.: ВИНТИ, 1965. – 32 с.
10. Китайгородский И.И., Копытов Л.Н. Влияние среды на возникновение и развитие поверхностных микротрещин деформируемого стекла // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 149. – № 3. – С. 580–582.
11. Vonnegut B., Glathat J.L. The effect of temperature on the strength and fatigue of glass rods // J. Appl. Phys. – 1946. – V. 17. – № 12. – P. 1082–1085.
12. Берденников В.П. Измерение поверхностного натяжения твердых тел // Журнал физической химии. – 1934. – Т. 5. – № 2–3. – С. 358–371.
13. Давыдова Р.И., Дембицкий С.И. К оценке влияния компонентного состава промывочных жидкостей на ее электропроводность // Промывка и крепление скважин: Межвуз. научнотематич. сб. – Уфа: Изд-во Уфимс. нефт. ин-та, 1987. – С. 30–33.

Поступила 29.04.2010 г.

УДК 622.243

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПРИ РАЗВЕДКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

С.Я. Рябчиков, Р.Е. Важанин

Томский политехнический университет
E-mail: kafedrabs@mail.ru

Исследовано влияние различных типов промывочной жидкости на механическую скорость бурения скважин при разведке угольных месторождений Кузбасса. Показана связь химического состава промывочных жидкостей с эффективностью бурения. Определена оптимальная область применения различных типов алмазного породоразрушающего инструмента при бурении скважин в различных геолого-технических условиях.

Ключевые слова:

Бурение скважин, промывочная жидкость, механическая скорость, алмазная коронка.

Key words:

Well drilling, drilling mud, penetration speed, diamond core bit.

В настоящее время конкурентоспособность геологического предприятия во многом зависит от качества, стоимости и сроков выполнения разведочных работ, поэтому вопросы улучшения указанных показателей путем совершенствования технологии бурения имеют постоянную актуальность [1]. Немаловажную роль при бурении скважин играет выбор типа породоразрушающего инстру-

мента (ПРИ) и промывочной жидкости. Их рациональное использование позволяет существенно повысить технико-экономические показатели при сооружении скважин. В настоящей работе приведены результаты исследований влияния различных типов промывочной жидкости и алмазных коронок на механическую скорость бурения, полученные в последние годы на объектах ООО «БЕЛОНГЕОЛО-