

**ПРИРОДА РАЗЛИЧНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОЙ  
ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

**В.Д. Евсеев**

*Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет, г. Томск, Россия*

Вопрос о природе временной зависимости прочности неорганических диэлектриков  $\sigma = \sigma(t)$ , где  $t$  – время действия нагрузки, занимает умы исследователей на протяжении практически всего двадцатого и части двадцать первого веков. Но ответ на него не дан и к настоящему времени. Отсутствие ответа на этот вопрос почти сто лет считается недостатком теории А.А.Гриффита. Все исследователи связывали появление зависимости  $\sigma = \sigma(t)$  с зависимостью величин, входящих в известную формулу, предложенную А.А. Гриффитом для оценки  $\sigma$  диэлектрика, от времени  $t$ . Таких величин в формуле А.А. Гриффита две: удельная свободная поверхностная энергия  $\gamma_0$  и длина начального дефекта (трещины)  $l$ . По нашему мнению, представление временной зависимости прочности в виде  $\sigma = \sigma(t)$ , как следствие наличия зависимостей  $\gamma_0 = \gamma_0(t)$ ,  $l = l(t)$ , не соответствует физике разрушения неорганических диэлектриков. Это и не позволило вскрыть природу временной зависимости прочности неорганических диэлектриков.

Между тем, ответ на поставленный вопрос может быть получен из энергетической теории прочности А. А. Гриффита, если принять во внимание физическое явление, известное в науке уже более 60 лет как «электризация при разрушении».

При разработке электрической теории адгезии экспериментально было установлено, что образование свежей поверхности при росте трещины нормального отрыва не только адгезионного, но и когезионного происхождения в неорганическом диэлектрике,

сопровождается появлением на противоположных поверхностях трещины разноименных свободных электрических зарядов плотностью  $q$  [1]. Электрические заряды вызывают эмиссию электронов высоких энергий при сколе диэлектриков в вакууме [2], генерирование электромагнитных сигналов при разрушении диэлектриков [3]. Эти электрофизические процессы, сопровождающие разрушение диэлектриков, активно исследовались. Но совершенно не обращалось внимание на то, что электрические заряды создают дополнительное силовое взаимодействие между поверхностями трещины, препятствующее ее росту.

Появление электрических зарядов на образующихся при разрушении диэлектриков свежих поверхностях ведет к возникновению механических потерь энергии электростатической природы  $\gamma_1$ , зависящих от  $q$  [4,5], которые определяют эффективную энергию разрушения  $\gamma_{eff} = \gamma_0 + \gamma_1$ , прочность  $\sigma$  диэлектрика при данной длине  $l$  находящейся в нем трещины:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_{eff}}{\pi l}}. \quad (1)$$

Появление свободных электрических зарядов на свежей диэлектрической поверхности совпадает во времени и с началом их релаксации. Это позволяет представить временную зависимость прочности в виде  $\sigma = \sigma(t, T)$ , где  $T$  – время релаксации электрических зарядов, характеризующее физическое состояние разрушаемого диэлектрика. Численное значение  $T$  даже у одного диэлектрика может изменяться на порядки в зависимости от загрязненности диэлектрика электролитическими соединениями.

Уравнение, описывающее снижение плотности электрических зарядов на свежей поверхности диэлектрика, полученной при испытании

в вакууме, и при отсутствии на поверхности диэлектрика адсорбционного водного слоя, представим в виде

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (2)$$

где  $q_0$  – начальная плотность зарядов,  $t$  – время, прошедшее после образования свежей поверхности,  $T = \varepsilon_s \varepsilon_0 / \chi_s$ , – время релаксации электрических зарядов в диэлектрике,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon_s$ ,  $\chi_s$  – относительная диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность диэлектрика, соответственно.

Аналогичное уравнение будет характеризовать и изменение интенсивности  $J$  эмиссии электронов высокой энергии с ювенильной поверхности, полученной при сколе диэлектрика в вакууме:

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

где  $J_0$  – начальная интенсивность эмиссии электронов, вызываемая зарядом  $q_0$ . Величины  $T$  в формулах (2), (3), будут равны только в том случае, когда образцы диэлектрика подвергаются одинаковой подготовке перед проведением эксперимента.

При разрушении диэлектрика в вакууме реализуется самый простой случай временной зависимости прочности, т.к. в этом случае жидкость не вмешивается в механизм разрушения диэлектрика. Представляя трещину нормального отрыва в виде конденсатора, на противоположных поверхностях которого находятся свободные электрические заряды, текущие через разрушаемый диэлектрик (ток  $j_2$ ), механические потери энергии электростатической природы представим в виде

$$\gamma_l = q_0^2 \exp\left(-2\frac{t}{T}\right) h / 4\varepsilon_0, \quad (4)$$

где  $h$  – расстояние между сторонами трещины,  $t$  - время действия разрушающего усилия.

Из уравнений (1-4) следует, что уменьшение величин  $q$ ,  $J$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma$  обеспечивается увеличением симплекса  $t/T$ , т.е. величины  $q$ ,  $J$ ,  $\gamma_1$ ,  $\sigma$  снижаются не только при увеличении  $t$ , но и при уменьшении  $T$ . Под понятием «временная зависимость прочности» будем понимать зависимость прочности от симплекса  $t/T$ :  $\sigma = \sigma(t/T)$ . Выводы отсюда можно сделать следующие:

1) уменьшение  $T$  диэлектрика ускоряет снижение плотности электрических зарядов на свежей поверхности, сокращает длительность эмиссии и снижает параметры эмиссии электронов высокой энергии, генерируемой поверхностью диэлектрика (энергия и интенсивность эмиссии электронов), способствует снижению прочности диэлектрика;

2) величины  $q$ ,  $J$ ,  $\sigma$  будут изменяться симбатно при одинаковой подготовке образцов к исследованию и одинаковых условиях проведения эксперимента;

3) при экспериментальном определении величин  $q$ ,  $J$ , и  $\sigma$  необходимо контролировать  $T$  диэлектриков;

4) для снижения прочности диэлектрика необходимо использовать такие физические воздействия на диэлектрик, которые обеспечивают снижение времени релаксации электрических зарядов, появляющихся на свежих поверхностях растущих трещин;

5) с ростом прочности диэлектриков (при данном значении  $l$ ) будет увеличиваться энергия электронов и интенсивность эмиссии электронов высокой энергии, эмитируемых с поверхности, полученной при разрушении диэлектриков в вакууме.

Величина симплекса  $t/T$  меняется в большом диапазоне из-за зависимости  $T$  диэлектрика от его чистоты. При химической чистоте

электропроводность диэлектрика достигает минимальных величин  $\chi_s = 10^{-17} - 10^{-20}$  S/m, а  $T$ , соответственно, - максимальных значений  $T_{\max} = 10^6 - 10^9$  s. При технической чистоте диэлектрика его электропроводность с ростом содержания электролитических загрязнений возрастает до  $10^{-15} - 10^{-12}$  S/m и более и обеспечивает снижение  $T$  диэлектрика на несколько порядков по сравнению с величиной  $T_{\max}$ . Такое непостоянство  $T$  диэлектриков обеспечит различную величину  $q$ ,  $J$ ,  $\sigma$  при одинаковом времени действия механического усилия (времени, прошедшего после скалывания диэлектрика). В этой связи уместно сказать о том, что попытка зафиксировать эмиссию электронов высокой энергии со свежей поверхности кристаллов NaCl увенчалась успехом только тогда, когда образцы диэлектриков, хранившиеся во влажном воздухе, перед испытанием подверглись термовакуумной тренировке [2], которая обеспечила рост  $T$  образцов диэлектрика. Без проведения процедуры обезвоживания образцов эмиссия не была зафиксирована и был сделан ошибочный вывод об отсутствии этого явления при разрушении кристалла NaCl [6].

При  $t/T \ll 1$  неравновесная компонента эффективной энергии разрушения увеличит  $\sigma$  диэлектрика до максимального значения (при данном размере  $l$ ), соответствующего величине  $q_0$  на свежей поверхности. Прочность диэлектрика химической чистоты при испытании в вакууме будет не только максимальной, но и менее всего склонной к уменьшению с течением времени, т.к. обеспечить выполнение условия равновесности разрушения  $t \gg T_{\max}$  в этом случае практически невозможно. Разрушение химически чистого диэлектрика будет неравновесным при любой скорости роста трещины.

При разрушении в вакууме неорганического диэлектрика, находящегося в состоянии технической чистоты, условие равновесности

разрушения  $t \gg T$  будет выполнено при значительно меньших временах  $t$  действия нагрузки на диэлектрик и прочность его быстрее будет снижаться к равновесной величине - пределу статической усталости  $\sigma_{eq}$ .

Для контроля прочности образцов диэлектрика необходимо обращать внимание не только на длину дефекта  $l$ , но и на величину  $T$  образцов: при различных значениях  $T$  прочность образцов диэлектрика в вакууме будет отличаться и тем значительней, чем больше отличие величин  $T$ .

Так как  $T$  диэлектрика определяется, в основном, величиной и изменением  $\chi_s$ , то изменение  $\sigma$  диэлектрика следует ожидать от таких воздействий на диэлектрик, которые способны изменить  $\chi_s$  диэлектрика. К таким воздействиям можно отнести повышение температуры диэлектрика, облучение его различными видами излучений, удаление из диэлектрика электролитических загрязнений (молекул воды, в частности), разрушение диэлектрика в присутствии жидкостей, способных изменить время релаксации зарядов. Выяснение механизма влияния жидкости на изменение  $\sigma$  диэлектрика имеет большой самостоятельный научный и практический интерес, так как жидкость и разрушаемый диэлектрик объединяет такое ключевое научное понятие как «эффект П.А. Ребиндера».

При разрушении неорганического диэлектрика в присутствии жидкости дополнительно к току  $j_2$  возникает релаксационный ток  $j_1$ , текущий через жидкость, проникающую в полость растущей трещины. Ток  $j_1$  ответственен за появление и величину эффекта П.А. Ребиндера: обеспечит снижение прочности диэлектрика, если жидкость уменьшит время релаксации зарядов до величины  $\tau < T$ , а еще лучше до  $\tau \ll T$ . Величина эффекта П.А. Ребиндера зависит и от релаксационного тока  $j_2$ :

чем меньшее снижение  $\sigma$  диэлектрика вызовет ток  $j_2$ , тем значительней будет эффект П.А. Ребиндера при разрушении диэлектрика в жидкости, обеспечивающей при проникновении в полость трещины выполнение неравенства  $\tau \ll T$ . И наоборот, чем большее происходит увеличение электропроводности  $\chi_s$  диэлектрика при росте содержания в нем электролитических загрязнений, тем меньший будет эффект П.А. Ребиндера при разрушении диэлектрика в присутствии электропроводящей жидкости.

Уменьшение тока  $j_2$  удалением электролитических соединений (молекул воды, в частности) из неорганических диэлектриков, находящихся в состоянии технической чистоты, длительным выдерживанием их вместе с гигроскопическими веществами типа  $P_2O_5$ ,  $H_2SO_4$  в эксикаторе, либо высокотемпературным высушиванием образцов в вакууме, вызовет рост  $T$  диэлектриков, т.е. вызовет не только увеличение  $\sigma$  диэлектрика, повышение чувствительности  $\sigma$  к действию жидкости (рост эффекта П.А.Ребиндера), возрастание параметров, характеризующих эмиссию электронов высоких энергий со свежей диэлектрической поверхности (величину энергии электронов, плотность потока электронов), но и обеспечит симбатность изменения  $\sigma$ ,  $J_0$  при одинаковой подготовке образцов к исследованию.

Подтверждением этого вывода является, например, сравнение потока электронов, эмитируемых с поверхности образцов кварца, хранящихся во влажном воздухе ( $1,1 \cdot 10^4$  имп/с·см<sup>2</sup>), с потоком электронов, эмитируемых с поверхности образцов кварца, прошедших перед испытанием трехчасовое высушивание при температуре 125 °С ( $7,2 \cdot 10^4$  имп/с·см<sup>2</sup>), и с потоком электронов, эмитируемых со свежей поверхности образцов кварца, которые перед сколом выдерживались течение трех часов в вакууме  $10^{-5}$  тор при температуре 300 °С в ( $2,3 \cdot 10^5$

имп/с·см<sup>2</sup>): удаление влаги обеспечило рост потока электронов с поверхности образцов кристаллического кварца на порядок [7]. Величина потока электронов при скалывании образцов кристалла LiF, прошедших предварительно процедуру высушивания при температуре 125 °С в течение трех часов, возрастает в два раза по сравнению с потоком электронов, эмитируемых с поверхности образцов кристалла LiF, хранившихся во влажном воздухе [7]. При сколе же кристалла NaCl эмиссия была зафиксирована только после предварительного удаления влаги из образцов высушиванием кристаллов при температуре 125 °С в течение трех часов [7]. Обнаружение эмиссии электронов высокой энергии с ювенильной поверхности неорганического стекла также произошло только после отжига образцов стекла в вакууме [8]. И, наконец, в [9] показано, что  $\sigma$  образцов кристалла LiF при одноосном сжатии в вакууме и величина начальной интенсивности эмиссии электронов  $J_0$  изменяются симбатно при изменении температуры отжига образцов фтористого лития (в этой работе не объясняется причина симбатности величин  $\sigma$  и  $J_0$ , а только обращается внимание на наличие этой связи).

В соответствии с (1, 2), прочность диэлектрика определяется двумя слагаемыми

$$\sigma^2 = \sigma_{eq}^2 + \sigma_{neq}^2,$$

где  $\sigma_{eq}$  является равновесной величиной. Ее численное значение определяется формулой (1), в которой  $\gamma_1 = 0$ . Такая формула была предложена А.А. Гриффитом для оценки прочности тела. Второе слагаемое  $\sigma_{neq}$ , появление которого связано с возникновением и релаксацией электрических зарядов на сторонах трещины, является неравновесной величиной. Ее численное значение зависит от  $q_0$  и

значения симплекса  $t/T$ . Слагаемое  $\sigma_{neq}$  ответственно за то или иное проявление временной зависимости прочности диэлектрика.

В соответствии с (1, 2), уравнение, характеризующее временную зависимость прочности диэлектрика при испытании в вакууме, примет вид:

$$\frac{\ln \sigma_{neq}}{\ln \sigma_m} + \frac{t}{T \ln \sigma_m} = 1 \quad (3)$$

где  $\sigma_m$  – максимальное значение неравновесной компоненты прочности диэлектрика, зависящее от величины  $q_0$  на свежей поверхности диэлектрика и длины трещины в нем:

$$\sigma_m = (E q_0^2 h / 2 \varepsilon_0 \pi l)^{0,5}.$$

Уравнению (3) в координатах  $\ln \sigma_{neq} - t$  соответствует прямая линия, наклоненная к оси времени под углом  $\alpha$ . Положение прямой на координатной плоскости зависит от величины углового коэффициента  $k = \operatorname{tg} \alpha = -T^{-1}$  и постоянной  $\sigma_m$ .

Временная зависимость прочности химически чистых неорганических диэлектриков при испытании в вакууме не претерпит существенных изменений, когда разрушение их будет происходить в присутствии жидких диэлектриков – неполярных насыщенных углеводородов, также находящихся в состоянии химической чистоты, т.к. в этом случае их удельная электропроводность достигает минимальных значений  $10^{-18} - 10^{-17}$  S/m [10], обеспечивающих величину времени релаксации  $\tau$  вполне сопоставимую с  $T_{\max}$  разрушаемого диэлектрика. В таких условиях испытания при любом значении симплекса  $V/V_1$  разрушение диэлектрика является неравновесным и прочность его будет практически неизменной. В этих условиях испытания будет наблюдаться залечивание трещин в диэлектрике при

снятии с него нагрузки. Смыкание сторон трещины будет сопровождаться вытеснением диэлектрической жидкости из полости трещины.

Существенное изменение временной зависимости прочности диэлектрика произойдет при его разрушении в жидкости, способной уменьшить время релаксации электрических зарядов в вершине растущей трещины до величины  $\tau \ll T$ . Такой электропроводностью обладают не только полярные, но и неполярные жидкости в состоянии технической чистоты. При разрушении образцов диэлектрика химической чистоты в электропроводящей полярной жидкости величина эффекта П.А. Ребиндера будет определяться электропроводностью жидкости: чем больше электропроводность, тем больше эффект П.А. Ребиндера; при сколе такого диэлектрика в вакууме будет наблюдаться эмиссия электронов высокой энергии максимальной интенсивности, энергия электронов достигнет максимального значения, соответствующего величине  $q_0$ . Диэлектрики, находящиеся в состоянии технической чистоты, будут менее склонны к проявлению эффекта П.А.Ребиндера, энергия электронов, интенсивность эмиссии электронов со свежей поверхности такого диэлектрика, полученной сколом в вакууме, будет уступать энергии и интенсивности эмиссии электронов, эмитируемых с ювенильной поверхности химически чистого диэлектрика.

Разупрочняющее действие полярной жидкости на диэлектрик не является постоянным: будет возрастать при введении в нее ионогенных соединений, растворяющихся в данной жидкости. Наибольшие изменения временной зависимости прочности диэлектрика вызовут электролиты, ионогенные поверхностно-активные вещества, обеспечивающие рост электропроводности возникающих растворов.

Дополнительное усиление разупрочняющего действия жидкости на диэлектрик обеспечит и растворение разрушаемого диэлектрика в ней, если в жидкости появляются носители тока – ионы. Чем меньшее время релаксации зарядов создает жидкость в полости растущей трещины, тем быстрее происходит уменьшение неравновесной компоненты прочности, обеспечивающей снижение прочности диэлектрика к равновесному значению  $\sigma_{eq}$ . Диапазон изменения прочности  $\sigma_{max} - \sigma_{eq}$  определяет величину снижения прочности при статической усталости (резерв прочности диэлектрика).

Залечивание трещины в диэлектрике и вытеснение полярной жидкости из ее полости после снятия разрушающего усилия с диэлектрика будет исчезать с ростом электропроводности полярной жидкости.

Уникальная растворяющая способность воды (способность воды к конгруэнтному и инконгруэнтному растворению) обеспечивает водным растворам ионогенных соединений наибольшую электропроводность и, тем самым, максимальное разупрочняющее действие на неорганические диэлектрики. Особенности изменения электропроводности возникающих водных растворов с ростом времени  $t$  действия нагрузки определяют особенности развития статической усталости. Например, при статической усталости кварцевого стекла разупрочняющее действие дистиллированной воды будет практически неизменным в течение длительного времени действия нагрузки, но разупрочняющее действие дистиллированной воды при статической усталости щелочного стекла будет возрастать во времени за счет обменных реакций стекла с водой. Рост электропроводности возникающих водных растворов в результате появления в растворе ионов щелочных металлов обеспечит ускоренное снижение прочности щелочного стекла во времени. В этом случае с

ростом  $t$  будет увеличиваться разница между прочностью образцов щелочного и кварцевого стекол. И наоборот, прочность образцов стекол различного химического состава в начальные моменты времени развития статической усталости в присутствии воды будет отличаться, но с увеличением времени  $t$  действия нагрузки прочность образцов стекол различного химического состава будет сближаться, так как при больших  $t$  зависимость электропроводности водных растворов продуктов гидролиза от химического состава стекол приобретает лишь косвенный характер. Именно такое развитие статической усталости было экспериментально обнаружено в [11,12], но не объяснено.

Добиться усиления разупрочняющего действия водных растворов ионогенных соединений на прочность неорганического диэлектрика будет невозможно тогда, когда исходная концентрация ионов в растворе столь велика, что не позволяет увеличить электропроводность раствора добавлением в него ионогенных соединений, введение которых диктуется технологическими особенностями процесса. Такой случай реализуется при бурении скважин: механическую скорость бурения невозможно увеличить введением в буровой раствор на водной основе понизителей твердости по той причине, что при большой концентрации ионогенных соединений в растворе достигается стабилизация его электропроводности.

Из (1, 4) следует, что при фиксированном значении  $l$  прочность диэлектрика тем больше, чем больше  $q_0$  и  $T$ . Зависимость (2) предъявляет серьезные требования к условиям определения  $q_0$  на поверхности диэлектрика: для сравнения величины  $q_0$  на поверхности разных диэлектриков необходимо свести к минимуму влияние тока  $j_2$  на получаемый результат, т.е. необходимо удалить носители тока из

образцов. Проводить измерения  $q_0$  необходимо в вакууме сразу после скола диэлектриков. Это обеспечит воспроизводство результатов.

Измерения величины  $q_0$  на свежей поверхности диэлектриков проводят не в вакууме, а в воздухе при различной относительной влажности. Это обеспечивает дополнительный вклад в непостоянство получаемых результатов: непостоянство  $T$  образца диэлектрика, не прошедшего процедуру обезвоживания, с одной стороны, и возникающий на свежей поверхности электропроводящий полимолекулярный слой воды, с другой стороны, приводят к тому, что величина остаточной плотности электрических зарядов  $q_{res}$ , измеряемая на свежесформированной поверхности спустя первые десятки секунд после разрушения, может быть существенно меньше плотности зарядов  $q_0$ , появляющихся на свежей поверхности при росте трещины и определяющих сопротивление трещины разрушению.

Эмиссия быстрых электронов происходит не только с поверхности, возникшей при сколе диэлектрика в вакууме, под влиянием остаточных электрических зарядов  $q_{res}$ , вызывающих постэмиссию, так и при разрушении диэлектрика в присутствии жидкости при появлении заряда  $q_0$  на свежей поверхности в вершине трещины, куда молекулы жидкости не в состоянии проникнуть. Различие плотности зарядов  $q_0$  и  $q_{res}$  определяется величиной  $T$  диэлектрика: чем больше  $T$ , тем меньше разность  $q_0 - q_{res}$ , длительней процесс постэмиссии, больше энергия эмитируемых электронов. И наоборот: чем меньше  $T$ , тем больше отличие  $q_{res}$  от  $q_0$ , короче длительность постэмиссии. Значительное снижение величины  $T$  гигроскопического диэлектрика, хранящегося во влажном воздухе, хорошо растворяющегося в воде, обеспечит ускорение снижения плотности электрических зарядов, снижение длительности эмиссии быстрых электронов со свежей поверхности вплоть до ее

полного отсутствия, уменьшение эффекта П.А. Ребиндера. В большей степени сказанное относится к поликристаллическим диэлектрикам, имеющим развитую когезионную поверхность контакта минеральных зерен, по которой молекулы воды проникают в диэлектрик, изменяя его электропроводность.

Если появление электрических зарядов на стенках растущей трещины связано с развитием пластической деформации в диэлектрике [13], то

1) прочность диэлектриков должна быть чувствительной не только к жидкостям различной природы, к температуре, но и к наличию в диэлектрических образцах точечных дефектов, в том числе наведенных радиацией, их плотности, величине их заряда, изменяющим не только электропроводность диэлектрика, но и вызывающим торможение дислокаций,

2) наблюдающиеся значения прочности диэлектриков могут быть обеспечены совместным действием деформационных потерь энергии и потерь энергии электростатической природы. В этом случае представления [14] о влиянии пластической деформации на временную зависимость прочности неорганического стекла, дополненные представлениями о потерях энергии электростатической природы, возникающих вследствие электризации поверхностей растущих трещин в неорганическом диэлектрике, получают новое развитие.

Временная зависимость прочности представляет собой не только зависимость прочности от времени действия нагрузки, но и зависимость  $\sigma$  от величины  $T$  диэлектрика.

Приведенное в данной статье объяснение природы временной зависимости прочности до настоящего времени никем из исследователей не предлагалось. Введение в анализ процесса разрушения факта

электризации свежих поверхностей неорганических диэлектриков и время релаксации электрических зарядов позволяет не только объяснить появление временной зависимости прочности при разрушении неорганических диэлектриков, но и дать ответ на многие сложные вопросы эффекта П.А. Ребиндера.

Энергетическая теория прочности А. А. Гриффита изначально была способна дать ответ на вопрос о природе временной зависимости прочности диэлектриков, раскрыть природу различного действия полярных и неполярных жидкостей на прочность неорганических диэлектриков и пр. Для этого нужно было только принять во внимание факт электрического заряжения возникающих при разрушении свежих поверхностей.

#### Литература

1. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
2. Chrystalev Ju.A., Krotova N.A. Emission von Elektronen hoher Energie bei der Zerstorungverschiedener fester Korper//Kristall und Technik. – 1978. – В.13, N 9. – S. 1077– 1081.
3. Источники электромагнитной эмиссии в бетонах/Фурса Т.В., Гордеев В.Ф., Ласуков В.В., Малышков Ю.П.//Письма в ЖТФ. – 1994. – Т.20, вып. 21. – С.1-5.
4. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении неорганических диэлектриков и электрокогезионные явления // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. – 1985. – № 2. – С.29–35.
6. Евсеев В.Д. Природа эффекта Ребиндера при разрушении горных пород // Нефтяное хозяйство. – 2011. – N 11. – С. 38–40.
7. Кротова Н.А., Карасев В.В. Исследование электронной эмиссии при раскалывании твердых тел в вакууме // Доклады АН СССР. – 1953. – Т.92, N 3. – С. 607-610.
8. Хрусталеv Ю.А. Исследование эмиссии электронов высоких энергий при нарушении адгезионного контакта и разрушении твердых тел: Дис. ... канд. хим. наук. – М., 1978. – 176 с.
9. Евсеев В.Д., Кузнецов В.А. Особенности температурной зависимости прочности и интенсивности электронной эмиссии при разрушении неорганического стекла. – Томск, 1979. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ 25.10.79, N 3361.

10. Кузнецов В.А. Исследования в области механической прививки полимеров на поверхности твердых минеральных тел при их разрушении: Дис. ... канд. хим. наук. – М., 1977. – 112 с.
11. Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков / Под ред. Г.С. Кучинского. – Л.: Энергия, 1972. – 295 с.
12. Китайгородский И.И., Копытов Л.Н. Влияние среды на возникновение и развитие поверхностных микрощелей деформируемого стекла // Доклады АН СССР. – 1963. – Т.149, N 3. – С.580–582.
13. Асланова М.С. Современные воззрения на прочность стеклянного волокна. – М.: ВИНТИ. – 1965. – 32 с.
14. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов // УФН. – 1968. – Т.96. – С.39–60.
15. Marsh D. Plastic flow and fracture of glass / Proc. Roy. Soc. (London), ser. A. - 1964. – Vol. 282, N 1388. – P. 33-49.

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА ИДЕАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ**

**А.В. Епихин**

*Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет, г. Томск, Россия*

### *Тенденции и проблемы развития строительства скважин*

Согласно данным «BP Statistical Review of World Energy 2013» в динамике добычи нефти, газа, угля и других полезных имеет место устойчивый восходящий тренд [1]. Не смотря на интерес мирового сообщества к альтернативным источникам энергии, можно утверждать, что традиционные энергоресурсы будут актуальны и востребованы ближайшие несколько десятилетий. Периодические экономические катаклизмы не оказывают существенного влияния на общемировые тенденции. Например, среднегодовые темпы прироста добычи нефти за период с 1970 по 2012 гг. составили 1,7% [1].

По предположениям Геологической службы США (USGS) можно прогнозировать, что в ближайшее время совокупные объемы добычи традиционных энергоресурсов будут оставаться на высоком уровне [2-3].