

## Потери на ионизацию газовых включений и неполный пробой диэлектриков на основе стекла

КУСТОВ Е.Ф., СЕРЕБРЯННИКОВ С.В., КУСТОВ М.Е.

Выведена формула относительной плотности тока при ионизации газовых включений в диэлектрике, которая объясняет увеличение диэлектрических потерь, уменьшение результирующей диэлектрической проницаемости и электрической прочности. Показано, что с увеличением размеров газовых включений значение тока ионизации уменьшается, зависимость электрического поля от напряженности становится пологой кривой, насыщение наступает при меньших значениях  $E$ . Исследуется явление неполного пробоя стекла за счет ионизации воздушных включений, выведена формула для пробивной напряженности  $E_{пр}$  при разрушении стекла по микротрещинам, рассчитаны значения  $E_{пр}$  для многих неорганических материалов, щелочно-галогидных соединений, стекол. Рассматривается явление электрического упрочнения диэлектриков в магнитном поле. Магнитное поле уменьшает ток ударной ионизации и увеличивает электрическую прочность. Влияние магнитного поля зависит от подвижности носителей заряда, поэтому электрическое упрочнение должно наблюдаться в материалах с большой подвижностью зарядов.

Ключевые слова: диэлектрик, газовые включения, ионизация, плотность тока, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность

Свойства электрической изоляции в существенной степени зависят от степени неоднородности материала, а для изоляции на основе стекла – от газовых включений. В электрических полях происходит ионизация газовых включений, увеличиваются диэлектрические потери, уменьшаются диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность.

**Простейшая теория ударной ионизации газовых включений.** Пусть к сечению  $x$  газового включения в единицу времени подходит  $n$  электронов, тогда в толщине слоя  $dx$  вследствие ударной ионизации возникнет  $dn = a n dx$  электронов, где  $a$  – коэффициент ударной ионизации. Решение этого уравнения приводит к результату

$$n = n_0 e^{ax}.$$

Плотность тока при ударной ионизации газовых включений размером  $d$  равна

$$j = en = j_0 e^{ad},$$

где  $j_0 = en_0$ .

Если имеется  $N_0$  газовых включений с нормальным распределением по размерам, то количество

газовых включений равно  $N_d = CN_0 e^{-\frac{(d-d_0)^2}{D^2}}$ , где

$d_0$  – размер наиболее вероятных включений;  $D$  – ширина разброса газовых включений по размерам;  $C$  – нормировочный коэффициент. Можно упростить эту формулу, введя безразмерные параметры  $z = d/d_0$ ,  $z_0 = d_0/D$ , тогда плотность тока ударной ионизации всех газовых включений:

$$\bar{j} = N_0 j_0 C \int_0^\infty e^{-z_0(z-1)^2 + az} dz$$

или

$$\frac{\bar{j}}{j_0} = C \int_0^\infty e^{-z_0(z-1)^2 + az} dz,$$

где  $\bar{j}_0 = N_0 j_0$ .

Окончательно относительная плотность тока за счет ионизации газовых включений

$$\frac{\bar{j}}{j_0} = e^{\frac{a(a+4z_0)}{4z_0} \operatorname{erf}\left(\frac{a+2z_0}{2\sqrt{z_0}}\right)} \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{a+19998z_0}{2\sqrt{z_0}}\right)}{\operatorname{erf}(\sqrt{z_0}) + \operatorname{erf}(9999\sqrt{z_0})}.$$

На рис. 1 показана зависимость тока  $\frac{\bar{j}}{j_0}$  от па-

раметра  $a$  ударной ионизации газовых включений.

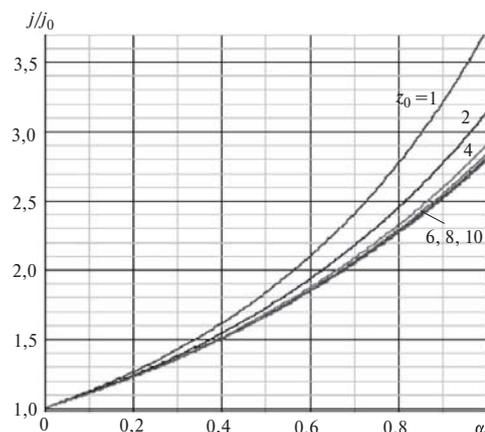


Рис. 1

С увеличением относительного размера газовых включений  $z_0 = d_0 / D$  ток ионизации уменьшается и стремится к постоянному значению  $\bar{j} / \bar{j}_0 = 2,725$ .

Коэффициент ионизации зависит от напряженности электрического поля по формуле  $a = Ape^{-\frac{Bp}{E}}$ , где  $p$  – давление;  $A, B$  – параметры ионизации. Тогда относительная плотность тока за счет ионизации газовых включений

$$\frac{\bar{j}}{\bar{j}_0} = \frac{\frac{\exp\left(-\frac{Bp}{E} + 2z_0\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{Ape^{-\frac{Bp}{E}}}{2\sqrt{z_0}}\right)} + \frac{\exp\left(-\frac{Bp}{E} + 19998z_0\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{Ape^{-\frac{Bp}{E}}}{2\sqrt{z_0}}\right)}}{\operatorname{erf}\left(\sqrt{z_0}\right) + \operatorname{erf}\left(9999\sqrt{z_0}\right)}$$

$$\cdot \exp\left(\frac{Ap}{4z_0} - \frac{2Bp}{E} + Ape^{-\frac{Bp}{E}}\right)$$

На рис 2 показана зависимость значения  $\bar{j} / \bar{j}_0$  от напряженности электрического поля  $E$  при размерном факторе газовых включений  $z_0 = d_0 / D = 1, 2, 5$  и параметрах ударной ионизации  $Ap=1$  и  $Bp=1$ . С увеличением размеров газовых включений ток ионизации уменьшается по значению, кривая зависимости становится пологой, насыщение наступает при меньших значениях напряженности электрического поля.

На рис. 3 представлена зависимость тока  $\bar{j} / \bar{j}_0$  от давления газа при напряженностях электрического поля  $E=3, 6, 10$  кВ/мм, размерном факторе газовых включений  $z_0=1$  и параметрах ударной ионизации  $A=1$  и  $B=1$ . При малом давлении газа ( $p=0, 0,2$ ) ток утечки при ионизации увеличивается

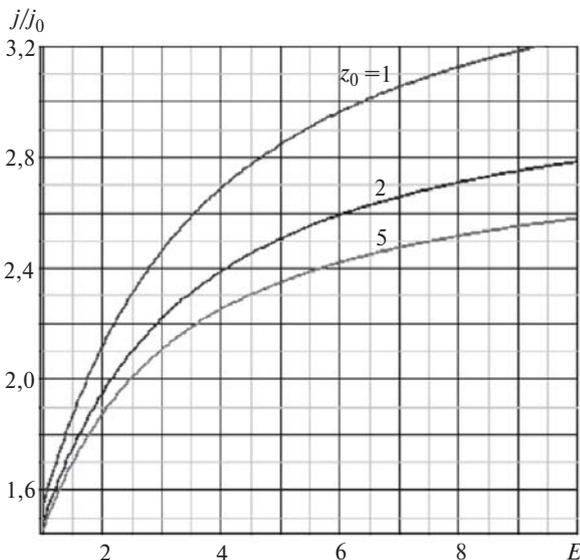


Рис. 2

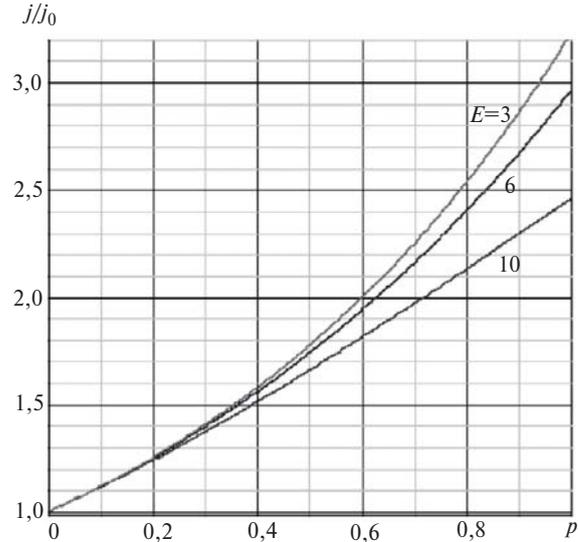


Рис. 3

линейно и не зависит от напряженности электрического поля. С увеличением давления ток ионизации увеличивается, зависимость становится нелинейной, ток растет с увеличением напряженности электрического поля.

**Неполный пробой стекла.** При исследовании электрического пробоя стекла в неоднородных электрических полях было установлено явление неполного пробоя [1]. Неполный пробой (НП) характеризуется тем, что шнур пробоя прорастает сквозь толщу стекла до противоположного электрода, но не происходит разрушения стекла, которое является основным определяющим признаком электрического пробоя. Неполный пробой сопровождается появлением в местах неоднородности электрического поля точек светящихся разрядов, размеры которых увеличиваются с увеличением напряженности электрического поля.

Разряды НП локализуются вдоль силовых линий неоднородного электрического поля, и в этих местах происходит механическое разрушение стекла в виде выкрашивания его осколков на поверхности. С дальнейшим увеличением напряженности электрического поля число разрядов возрастает, их размеры увеличиваются, растет глубина проникновения разрядов в толщу стекла. «Прорастание» разрядов на всю толщину стекла приводит к короткому замыканию источника напряжения и уменьшению напряжения или к отключению источника электропитания. При повторных испытаниях НП может появиться в том же или в другом месте. Можно заключить, что напряжение возникновения НП растет с увеличением толщины стекла. Скорость роста длины трещин и разрядов опережает соответствующее увеличение амплитуды напряжения электрического поля. При высоких частотах протяженность разрядов пропорциональна длительности импульса и обратно пропорциональна

его крутизне. При повторении импульсов напряжения НП возникает в новом месте и не повторяет предыдущий маршрут.

Полный пробой стекла возникает, когда приложенное напряжение превысит напряжение неполного пробоя, мощность станет достаточной для обеспечения большого значения тока в режиме короткого замыкания неполного пробоя.

Разряды при НП возникают в воздушных включениях и носят дискретный характер: чем меньше размеры включений, тем более сильные поля вызывают разряды. Можно считать, что пробивная напряженность в воздушных включениях равна 3,3 кВ/мм [1].

В электрическом поле на поверхности включений появляются заряды. Когда напряженность поля, вызванная этими поверхностными зарядами, достигнет напряжения пробоя воздушных включений, начинается ионизация воздуха. Ионизация будет происходить до тех пор, пока ионы воздуха не нейтрализуют поверхностные заряды, при этом напряжение, приложенное к газовому включению, уменьшается до нуля. Продолжительность пробоя воздуха равна  $10^{-10}$  с. После спада напряжения примерно за  $10^{-6}$  с ионизация прекращается. Емкость газового включения начинает вновь заряжаться и через 2–3 с поверхностные заряды восстанавливаются. Затем цикл разряда повторяется.

**Динамика микроразрушения в электрических полях.** Реальная прочность твердых тел  $P_{\text{реал}}$  (Н/м<sup>2</sup>) определяется уравнениями Гриффитса:

$$P_{\text{реал}} = \sqrt{\frac{2Eg}{\rho l}}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $g$  – поверхностное натяжение;  $l$  – длина зародышевой трещины, которая при напряжении  $P_{\text{реал}}$  начинает самопроизвольно расти.

В теории используется произведение модуля Юнга  $E$  на поверхностное натяжение  $g$ . Если использовать формулы [2–4], то

$$Eg = 5,31 \times 10^{-57} N_V^{7/3} \frac{n-1}{2n} \frac{n+2}{(n+1)n^{n-1}} - \frac{3}{2n^{n-1}} \frac{\sigma}{\rho l} \quad (2)$$

тогда реальную прочность твердых тел можно вычислить по формуле

$$P_{\text{реал}} = 7,29 \times 10^{-29} N_V^{7/6} \sqrt{\frac{n-1}{2n} \frac{n+2}{(n+1)n^{n-1}} - \frac{3}{2n^{n-1}} \frac{\sigma}{\rho l}}. \quad (3)$$

Обозначив  $\rho l = l \phi N_V^{-1/3}$ , где  $l \phi$  – длина трещины в относительных единицах расстояния между атомами, получим окончательно

$$P = 7,29 \times 10^{-29} N_V^{4/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l \phi}} \quad (\text{Па или Н/м}^2), \quad (4)$$

где  $f(n) = \sqrt{\frac{n-1}{2n} \frac{n+2}{(n+1)n^{n-1}} - \frac{3}{2n^{n-1}} \frac{\sigma}{\rho l}}$ ,  $n$  – параметр

материала.

При механических напряжениях  $P$ , начиная с критической длины трещины  $l \phi$  происходит ее неконтролируемый рост, приводящий к разрушению материала.

Если материал находится в электрическом поле напряженностью  $E_{\text{пр}}$ , то условие потери механической прочности за счет прорастания трещин можно определить как  $P = qE_{\text{пр}}$ , где  $q$  – плотность зарядов на поверхности трещины. Тогда напряженность электромеханического пробоя – разрушения (ЭМНР) – будет  $E_{\text{пр}} = E/q$  (В/м). Представив поверхностную плотность зарядов в виде  $q = eN_S = eN_V^{2/3}$ , запишем выражение для напряженности электромеханического пробоя – разрушения:

$$E_{\text{пр}} = 4,56 \times 10^{-10} N_V^{2/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l \phi}}$$

или

$$E_{\text{пр}} \sqrt{l \phi} = 4,56 \times 10^{-10} N_V^{2/3} f(n). \quad (5)$$

Объемная плотность атомов  $N_V = \frac{\rho}{Mm}$ , где  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $M$  – масса молекулы;  $m = 1,66 \times 10^{-27}$  кг – единица атомной массы. Тогда (5) с использованием плотности диэлектрика будут иметь вид:

$$E_{\text{пр}} = 4,56 \times 10^{-10} \frac{\rho}{\epsilon Mm} \frac{\sigma}{\rho}^{2/3} f(n) \sqrt{\frac{1}{l \phi}}$$

или

$$E_{\text{пр}} \sqrt{l \phi} = 4,56 \times 10^{-10} \frac{\rho}{\epsilon Mm} \frac{\sigma}{\rho}^{2/3} f(n).$$

Ниже приведены рассчитанные по (5) значения  $E_{\text{пр}} \sqrt{l \phi}$  для некоторых веществ:

Вещество	$E_{\text{пр}} \sqrt{l \phi}$ МВ/м <sup>1/2</sup>	Вещество	$E_{\text{пр}} \sqrt{l \phi}$ МВ/м <sup>1/2</sup>
CuCl	10274	AlSb	8658
CuBr	9436	GaP	10948
CuI	8808	GaAs	10203
AgI	7679	GaSb	8735
BeS	13685	InP	9428
MnS	11776	InAs	8861
MnSe	11008	InSb	7739

ZnS	11100	BP	15486
ZnSe	10306	SiC	17072
ZnTe	9428	SiO <sub>2</sub>	15 034
CdTe	7735	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43605
HgS	9499	BeO	50172
HgSe	8791	MgO	57072
HgTe	7785	ZrO <sub>2</sub>	63533
AlP	11001	ThO <sub>2</sub>	40561
AlAs	10078	Стекло	87
Стекло 1	10	кварцевое непрозрачное	
Стекло 2	10	кварцевое прозрачное	
Стекло 3	11	электровакуумное	
Стекло 4	11	электроизоляционное	
Стекло 5	143	крон	
Стекло 6	114	флинт	

Критерий электромеханического пробоя  $E_{пр} \sqrt{l\phi}$

и оценка критической длины трещин по характеристикам ЭМПР некоторых кристаллов с кристаллической решеткой типа NaCl сведены в таблицу:

Кристалл	$a$ , нм	$E_{пр} \sqrt{l\phi}$ МВ/м <sup>1/2</sup>	$E_{пр}^{(exp)}$ , МВ/м	$\sqrt{l\phi}$	$l$ , нм
LiF	0,4	18431	3100	5,95	14,2
LiCl	0,51	11324	—	—	—
LiBr	0,55	9885	—	—	—
LiI	0,6	8244	—	—	—
NaF	0,46	13906	2400	5,79	15,5
NaCl	0,56	9419	1500	6,28	22,2
NaBr	0,6	8398	1000	8,40	42,1
NaI	0,65	7141	800	8,93	51,5
KF	0,54	10353	1800	5,75	17,7
KCl	0,63	7571	1000	7,57	36,1
KBr	0,66	6892	700	9,85	64,0
KI	0,71	5992	600	9,99	70,5
RbF	0,56	8910			
RbCl	0,66	6820	800	8,53	47,8
RbBr	0,69	6314	600	10,52	75,9
RbI	0,73	5541	500	11,1	90,2
CsF	0,6	7871	—	—	—
AgF	0,49	10900	—	—	—
AgCl	0,56	9714	—	—	—
AgBr	0,58	8974	—	—	—
MgO	0,42	14893	—	—	—
MgS	0,52	12762	—	—	—
MgSe	0,55	0	—	—	—
CaO	0,48	13005	—	—	—

### Электрический пробой стекла с проводящей пленкой, форматированной изоляционными отсечками.

Исследовался электрический пробой стекла, покрытого электропроводящей пленкой. Часть пленки шириной 2–3 мм удалялась лазером, и создавались изоляционные «отсечки». Наличие «отсечек» на поверхности стекла, покрытого проводящей пленкой, приводит к неоднородному распределению электрического поля с концентрацией по периметру изоляционных «отсечек» и в углах. Для исследования электрического пробоя были взяты образцы стекла с различными типами форматирования: линейные «отсечки», «отсечки» с периметрами квадрата или прямоугольника. На нижнем электроде пробивной установки пластина стекла лежала «чистой» стороной, верхний электрод устанавливался на пленку, окруженную «отсечками» или изолированными полосками без пленки.

Стекло, пленка на котором была форматирована «отсечками», характеризуется сравнительно низкими значениями пробивной напряженности. При пробое наблюдаются многочисленные разряды по границе пленки и изоляционной полосы. Пробой происходит в виде трещины стекла длиной 5 мм по границе «отсечки», около или вдали от верхнего электрода. Низкие значения напряженности электрического поля пробоя по сравнению с электрической прочностью стекла можно объяснить явлением электрического рифтинг-пробоя: образования трещины в электрическом поле за счет электромеханического пробоя – разрушения) (5) и электрического пробоя по поверхности трещины.

Электрический рифтинг-пробой можно представить следующим образом. В местах неоднородности электрического поля, которая проявляется в углах пленки между «отсечками» или из-за неровности электродов, напряженность электрического поля  $E$  возрастает во много раз и может достичь критического значения напряжения, при котором возникают неконтролируемый рост трещин и ЭМПР. Трещина начинает развиваться в направлении вектора напряженности электрического поля, заполняющий ее воздух ионизируется, вызывая разряды. Таким образом, вдоль границы пленки и «отсечки» возникают многочисленные разряды в местах неоднородностей электрического поля. Когда трещины пройдут толщину стекла по силовым линиям напряженности электрического поля, может возникнуть электрический пробой по воздуху или поверхности трещин. При пробое напряженность электрического поля уменьшается, трещины «схлопываются», практически восстанавливая исходную структуру.

Для исследования ЭМПР стекла, пленка на котором форматирована изоляционными полосками или «отсечками», были взяты образцы стекла с ука-

занными выше различными типами форматирования. Исследование электрического пробоя проводилось на переменном токе, на нижнем электроде лежала пластина стекла «чистой» стороной, верхний электрод устанавливался на пленку, окруженную отсечками или изолированными полосами без пленки. Пробой возникал по периферии пленки на границе с отсечками.

«Чистое» стекло и стекло с проводящей пленкой без форматирования «отсечками» характеризуются высокой пробивной напряженностью. У этих образцов электрического пробоя не наблюдалось до напряжения 50 кВ.

Стекла, пленка на которых была форматирована «отсечками», характеризуются сравнительно низкими значениями пробивной напряженности – примерно 4 кВ/мм. При пробое наблюдаются многочисленные разряды по границам пленки и изоляционной полосы, трещины стекла достигают 5 мм и проходят вдоль границы «отсечки», около или вдали от верхнего электрода (рис. 4).

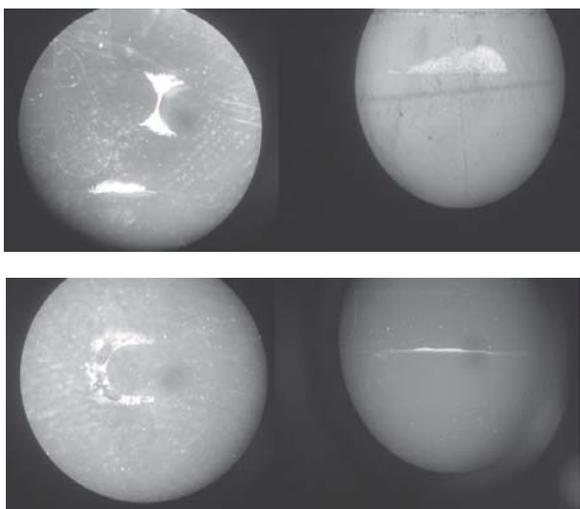


Рис. 4

На стекле типа ТСК 033.8 с материалом резистивной пленки SnO<sub>2</sub> лазером были сделаны «отсечки» в виде кругов различного расположения. При испытании нижний электрод имел диаметр 120 мм, верхний диаметром 25 мм помещался на пленку в центре стекла. Размеры образцов составляли 60×60 см, так что поверхностное перекрытие стекла между верхним и нижним электродами исключалось. На фото рис. 5 показаны следы неполных пробоев в местах «отсечек» проводящей пленки. При этом на поверхности стекла в местах ионизации воздуха возникают оплавления стекла как на верхней, так и на нижней поверхности образцов (рис. 6).

**Влияние магнитного поля на электрическую прочность материалов.** В магнитном поле (индукции *B*) траектория движения заряженных частиц будет



Рис. 5

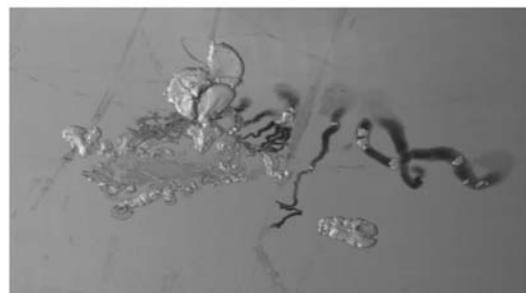
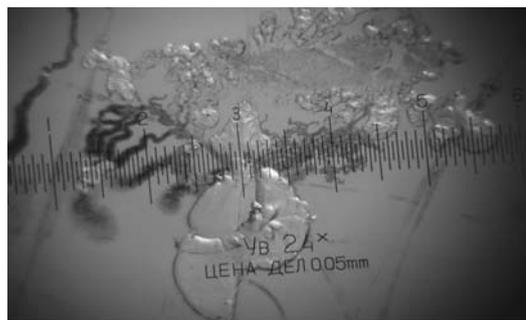


Рис. 6

представлять собой часть циклоиды длиной *l* (длина свободного пробега) и за время свободного пробега (между двумя столкновениями) пройдет путь, меньший, чем *l*, а именно,

$$L_B = \frac{\infty}{\frac{e}{c} \sqrt{1 - \frac{m^2 B^2}{2} \frac{\partial}{\partial \theta}}}$$

где *m* – подвижность носителей заряда в электрическом поле.

Тогда концентрация ионизированных зарядов будет меньше, поскольку ионизация происходит за счет ускорения электронов в электрическом поле, а силы магнитного поля недостаточно для ионизации. Магнитное поле изменяет траекторию движения электронов вдоль электрического поля, поэтому накопление энергии носителей зарядов и степень ионизации будут меньше:

$$dn = \frac{\infty}{\frac{e}{c} \sqrt{1 - \frac{m^2 B^2}{2} \frac{\partial}{\partial \theta}}} dx.$$

Решение этого уравнения приводит к результату:

$$n = n_0 e^{\frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{\pi^2 B^2 \dot{\phi}}{2 \dot{\phi}}\right)}$$

Плотность тока при ударной ионизации газовых включений размером  $d$  равна

$$j = en = en_0 e^{\frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{\pi^2 B^2 \dot{\phi}}{2 \dot{\phi}}\right)} d = j_0 e^{\frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 - \frac{\pi^2 B^2 \dot{\phi}}{2 \dot{\phi}}\right)}$$

Таким образом, наличие магнитного поля должно уменьшать ток ударной ионизации и увеличивать электрическую прочность. Влияние магнитного поля зависит от подвижности носителей заряда, поэтому увеличение электрической прочности должно наблюдаться у материалов с большой подвижностью зарядов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (Область сильных полей). — М.: Физматлит, 1958, 909 с.
2. Кустов М.Е., Кустов Е.Ф., Мирошниченко А. Ю., Шеметова В.К. Упругость твердых тел в модели двойного слоя. — Вестник МЭИ, 2013, № 6, с. 162–169.

3. Кустов Е.Ф., Кустов М.Е. Поверхностное натяжение расплавов неорганических веществ. — Вестник МЭИ, 2013, № 4, с. 216–226.

4. Кустов М.Е. Поверхностное натяжение и адгезия неорганических веществ. — Изв. Академии инженерных наук им. Прохорова, 2013, № 3, с. 93–105.

[19.10.15]

*Авторы: Кустов Евгений Федорович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1962 г. В 1988 г. после защиты диссертации присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. Профессор МЭИ.*

*Серебрянников Сергей Владимирович окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 1975 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Влияние электрических полей и модификации полимеров на эксплуатационные свойства материалов электротехнического назначения» в МЭИ. Зав. кафедрой физики электротехнических материалов и компонентов и автоматизации электротехнических комплексов НИУ «МЭИ».*

*Кустов Максим Евгеньевич окончил Институт экономики информационных технологий в 2006 г. Старший инженер НИИ технического стекла.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 1, pp. 66–71.*

## Losses for Ionization of Gas Inclusions and Incomplete Breakdown of Glass-Based Dielectrics

**KUSTOV Evgenii Fedorovich** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**SEREBRYANNIKOV Sergei Vladimirovich** (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

**KUSTOV Maksim Evgen'yevich** (Scientific Research Institute of Technical Glass, Moscow, Russia) — Senior Engineer

*A formula for relative density of current resulting from ionization of gas inclusions in a dielectric is derived, which describes the growth of dielectric losses, the decrease of resulting dielectric constant, and the decrease of electric strength. It is shown that, as gas inclusions grow in size, the ionization current tends to decrease, the dependence of electric field on its strength becomes flatter, and saturated state is achieved at lower values of E. The incomplete glass breakdown phenomenon caused by ionization of air inclusions is studied; a formula for breakdown field strength E<sub>br</sub> with glass fractured through microcracks is derived; and the values of E<sub>br</sub> for many inorganic materials, alkali-haloid compounds, and glasses are calculated. The phenomenon of electric strengthening of dielectrics in magnetic field is considered. Application of magnetic field results in a smaller shock ionization current and in a higher electric strength. Since the influence of magnetic field depends on the mobility of charge carriers, the electric strengthening phenomenon should be observed in materials with high mobility of charges.*

**Key words:** dielectric, gas inclusions, ionization, current density, dielectric losses, dielectric constant, electric strength

#### REFERENCES

1. Skanavi G.I. *Fizika dielektrikov (Oblast' sil'nykh polей)* (Physics of dielectrics (Strong fields)). Moscow, Publ. «Fizmatlit», 1958, 909 p.
2. Kustov M.E., Kustov E.F., Miroshnichenko A.Yu., Shemetova V.K. *Vestnik MEI — in Russ. (Bulletin of Moscow Power Engineering Institute)*, 2013, No. 6, pp. 162–169.

3. Kustov M.F., Kustov M.E. *Vestnik MEI — in Russ. (Bulletin of Moscow Power Engineering Institute)*, 2013, No. 4, pp. 216–226.

4. Kustov M.E. *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk im. Prokhorova — in Russ. (News of the Engineering Sciences Academy named Prokhorov)*, 2013, No. 3, pp. 93–105.

