

О.О. Пальчиков

## ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МИКРОННОГО ДИАПАЗОНА В КОНДЕНСАТОРНОЙ БУМАГЕ

*Отримана в роботі залежність напруженості електричного поля повітря від довжини розрядного проміжку задовільно пояснює значення пробивних напруг зразків конденсаторного паперу при зміні їх марок і товщини. Побудована залежність пробивної напруженості повітря при нормальних умовах в діапазоні 1,36...5,54 мкм на підставі розрахунку електростатичних полів в моделях конденсаторного паперу з сегментними поперечними перетинами циліндричних об'ємів повітря і води. Проведено зіставлення отриманої залежності з відомими експериментальними даними. Отримані дані в діапазоні 2...5,54 мкм найбільш близькі експериментальним даним Пешо. Бібл. 11, табл. 3, рис. 5.*

*Ключові слова:* електричний пробій, модель конденсаторного паперу, мікронний проміжок, електростатичне поле, метод скінченних елементів.

*Полученная в работе зависимость напряженности электрического поля воздуха от длины разрядного промежутка удовлетворительно объясняет значения пробивных напряжений образцов конденсаторной бумаги при изменении их марок и толщины. Построена зависимость пробивной напряженности воздуха при нормальных условиях в диапазоне 1,36...5,54 мкм на основании расчета электростатических полей в моделях конденсаторной бумаги с сегментными поперечными сечениями цилиндрических объемов воздуха и воды. Проведено сопоставление полученной зависимости с известными экспериментальными данными. Полученные данные в диапазоне 2...5,54 мкм наиболее близки экспериментальным данным Пешо. Библ. 11, табл. 3, рис. 5.*

*Ключевые слова:* электрический пробой, модель конденсаторной бумаги, микронный промежуток, электростатическое поле, метод конечных элементов.

**Введение.** При нарушении технологического режима пропитки (недостаточное давление при пропитке) в толщине конденсаторной бумаги остаются воздушные включения, в которых при эксплуатации под высоким напряжением возникают разряды. Поэтому возникает необходимость выполнить оценку пробивного напряжения воздушных включений конденсаторной бумаги.

В данной работе предлагается определение пробивного напряжения промышленной частоты воздуха в микронном диапазоне на основе косвенных оценок расчетных значений, выполненных на основании численного моделирования электростатического поля в конденсаторной бумаге с воздушными включениями. Конденсаторная бумага является трехкомпонентным диэлектриком, состоящим из целлюлозы, воздуха и воды. Выбор такого диэлектрика основан на предположении, что изменение пробивного напряжения при изменении толщины объясняется развитием полного пробоя диэлектрика с частичного в воздушной области. При приложении испытательного напряжения электрическое поле распределяется неравномерно в соответствии с диэлектрической проницаемостью и расположением компонентов. Так для рассматриваемого изоляционного материала в воде модуль напряженности электрического поля (НЭП) наименьший, а в воздухе наибольший. Затем проводится проверка возможности пробоя для участка с практически однородным как по модулю, так и по направлению вектором НЭП. Если проверка удовлетворяется, то эта область заменяется на идеально проводящую. И все повторяется, пока разряд не распространится по всей толщине диэлектрика.

**Обзор литературы.** В 1889 г. Фридрих Пашен установил, что пробивное напряжение в газах зависит от произведения давления газа и расстояния между электродами. Дальнейшие исследования показали отклонения от данного закона подобия газовых разрядов. Обзоры экспериментальных исследований пробоя воздуха при нормальном атмосферном давлении и

микронных промежутках приведены в [1-3], а новейшие данные в [4]. В результате чего установлено, что при нормальном давлении левая ветвь зависимости Пашена падает при уменьшении произведения давления и расстояния между электродами, а также определена зависимость пробивного напряжения от материала электродов. Однако экспериментальные данные различных авторов сильно разнятся и иногда даже противоречат друг другу.

Также установлено, что для воздуха пробивное напряжение не зависит от частоты при  $f = 0...50$  Гц в разрядных промежутках до 600 см. Для воды и твердых диэлектриков увеличение электрической прочности наблюдается при времени воздействия напряжения соизмеримого со временем прорастания канала разряда (для жидкостей – 0,01 мкс при толщинах 10...100 мкм, для твердых диэлектриков 0,1 мкс при толщине 1 мм) [5].

Влияние воздушных полостей на развитие разряда в полимере с учетом распределения электростатического поля и механических напряжений проанализировано в [6], однако в качестве условия пробоя берется зависимость Пашена.

**Цель работы** – определение пробивного напряжения воздушных включений микронного диапазона в конденсаторной бумаге на основе численно-полевых моделей электрического поля с сегментными поперечными сечениями цилиндрических объемов воздуха и воды в целлюлозе.

**Математическая модель.** Объемное соотношение компонентов конденсаторной бумаги определяется на основе уравнений:

$$\begin{cases} V_p \rho_p (1-y) = V_c \rho_c + V_a \rho_a; \\ V_w \rho_w = V_p \rho_p y; \\ V_p = V_c + V_a + V_w, \end{cases}$$

где  $V_p$ ,  $V_c$ ,  $V_a$  и  $V_w$  – объемы бумаги, целлюлозы, воздуха и воды соответственно;  $\rho_p$ ,  $\rho_c$ ,  $\rho_a$  и  $\rho_w$  – плотности бумаги, целлюлозы, воздуха и воды соответственно;  $y$  – относительное массовое содержание воды в изоляционной бумаге.

Тогда радиус пор, содержащих воздух и воду, длиной  $l$  и количеством  $N$  в объеме целлюлозы находится

$$r = [(V_a + V_w)/(\pi \cdot l \cdot N)]^{0.5}.$$

Пример расположения объемов воздуха и воды в поре приведен на рис. 1. Поперечные сечения цилиндрических объемов материалов поры делятся центральными криволинейными трапециями на три области. Основы таких трапеций составляют 20 % от длины линии раздела воздушной и водной сред. Это сделано для того, чтобы выделить подобласти с практически однородной НЭП в воздушной и водной областях.

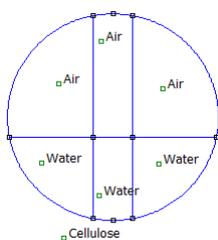


Рис. 1. Фрагмент расчетной области

Расчет электрического поля в поперечном сечении относительно длины  $l$  конденсаторной бумаги с шириной  $b$  и толщиной  $h$  основывается на следующих дифференциальных уравнениях [7], составленных для каждой изотропной области с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ :

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0; \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi; \\ \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}, \end{cases}$$

где  $\varphi$  – скалярный электростатический потенциал;  $\mathbf{E}$  – вектор НЭП;  $\mathbf{D}$  – вектор электрической индукции;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

На границе раздела двух сред удовлетворяется условие постоянства скалярного электростатического потенциала и условие равенства нормальных составляющих векторов электрической индукции этих сред, принимающее вид для двух диэлектриков или диэлектрика и проводника соответственно [7]:

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n_{12}} - \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n_{12}} = 0; \quad \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n_{12}} = \sigma,$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – относительные диэлектрические проницаемости первой и второй сред соответственно;  $n_{12}$  – нормаль из первой во вторую среду;  $\sigma$  – поверхностный заряд на границе разделов двух сред.

На верхней и нижней плоскостях, перпендикулярных толщине рассматриваемого объема, задаются скалярные электростатические потенциалы, равные по модулю половине амплитуды пробивного напряжения конденсаторной бумаги, указанные в [8], но с разными знаками. Область решения ограничивается цилиндрической поверхностью с радиусом 200 мкм, длиной 100 мкм и нулевым потенциалом на ее поверхности.

Для реализации связи значения пробивной НЭП материала с его геометрией область, занимаемая материалом, разбивается на ряд подобластей прямоугольной или криволинейно трапециевидной формы так, чтобы вектора НЭП отдельных их элементов были параллельны направляющим векторам двух сторон подобластей (называемые в дальнейшем боковыми) с заданной точностью, а значения модулей векторов НЭП изменялись незначительно. В дальнейшем усредняется вектор НЭП по площади подобласти  $S$

$$\mathbf{E}_A = \frac{1}{S} \int_S \mathbf{E} dS.$$

Тогда модуль полученного вектора будет равен нормальной его составляющей, определенной для основы подобласти. Следовательно, при таком подходе модуль вектора НЭП определяет наступление пробоя в разрядном промежутке равно длине боковой стороны  $L$  рассматриваемой подобласти.

Основные допущения модели: диэлектрические материалы не обладают проводимостью; заряды на границах их раздела отсутствуют; объемные заряды в диэлектрических материалах отсутствуют, а их объемы под действием электростатического поля не меняются; идеальные проводники с бесконечно малой толщиной – источники электростатического поля; время развития пробоя в объеме исследуемых образцов меньше 1 мкс.

Численный расчет электростатического поля методом конечных элементов реализован в программе FEMM.

Теорией точечных дефектов может объясняться повышение пробивного напряжения бумаги при уменьшении толщины и увеличении плотности в связи с тем, что уменьшаются дефекты структуры собственно целлюлозы [9]. Альтернативным объяснением может являться известный эффект увеличения пробивного напряжения тонких образцов однокомпонентных изоляционных материалов. В нашем случае гипотеза, что с уменьшением толщины конденсаторной бумаги уменьшаются области, занятые целлюлозой, а их пробивное напряжение будет соответственно увеличиваться. Рассмотрим образцы конденсаторной бумаги различных марок и одинаковой толщины, приведенные в табл. 1 [8]. Если в таком случае воздушные объемы не определяют пробивное напряжение изоляционного материала, то выходит, что у бумаг с меньшей средней плотностью пробивное напряжение должно быть больше, чем у бумаг с большей плотностью, так как у них области, занятые целлюлозой, будут меньше. Однако это противоречит опыту. Следовательно, эта гипотеза об объяснении изменения пробивного напряжения ряда конденсаторной бумаги различной толщины не может быть состоятельной. Влияние водных объемов на результирующее пробивное напряжение образца несущественно, как показало моделирование. Это связано с незначительным падением напряжения в указанной области, а при ее пробое распределение электростатического поля в бумаге пренебрежительно мало изменится.

Таблица 1  
Пробивное напряжение конденсаторной бумаги

Марка бумаги	Амплитуда пробивного напряжения $U$ , В
МКОН 0,8-10	495
СКОН 1-10	594
КОН 2-10	537
КОН 3-10	594

В справочной литературе для целлюлозы значения пробивной НЭП находятся в пределах 120...320 МВ/м [10]. Зависимость пробивной НЭП воды от длины разрядного промежутка приведена на рис. 2. Точки получены в [11] при импульсном напряжении амплитудой 800 В при крутизне фронта 0,5 мкс. Указанную на рис. 2 закономерность предлагается аппроксимировать зависимостью

$$E_w = 6,9 - 0,017 \cdot L. \quad (1)$$

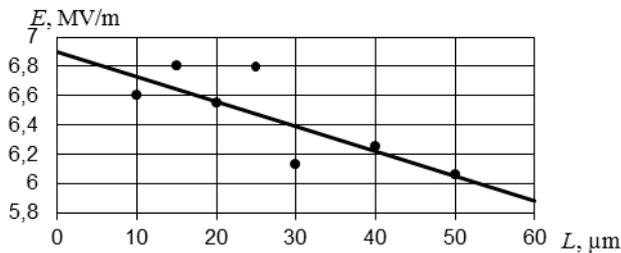


Рис. 2. Зависимость пробивной напряженности электрического поля водного промежутка от его длины

Однозначность определения пробивной НЭП воздуха обеспечивается информацией о размере поры, но такие сведения в [8] отсутствуют. Поэтому для объяснения различия пробивного напряжения марок

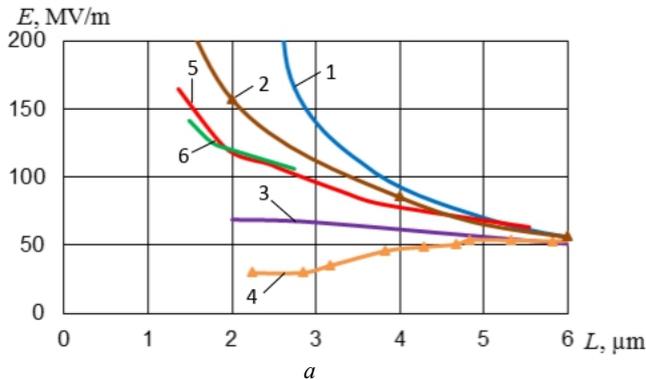


Рис. 3. Зависимости пробивной напряженности (а) и пробивного напряжения (б) воздушного промежутка от его длины, определенные по кривым Пашена (1), Пешо (2), Таева (3), Слейда (4), и рассчитанные по предложенной модели для ряда бумаг КОН 2 (5), КОН 3 (6)

конденсаторной бумаги при изменении их толщины была предложена гипотеза, что электрические поля в рассматриваемых образцах подобны, а их количественные характеристики – потенциал и напряженность в той или иной точке отличаются только на коэффициент пропорциональности. То есть, для образцов конденсаторной бумаги различной толщины эквивалентная диэлектрическая проницаемость должна быть постоянной.

Сильно ионизированные области, возникающие при частичном или полном пробое, моделировались материалом с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 16000$ . Такое значение выбрано для практической реализации модели идеального проводника с  $\epsilon \rightarrow \infty$ , как в несколько раз больше значения максимальной диэлектрической проницаемости материалов модели. Остальные физические параметры, используемые в модели, приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Физические свойства материалов диэлектрика

Наименование	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	$\epsilon_{20}$
Целлюлоза	1530	6,5
Воздух	1,205	1,00058
Вода	998	80,2

**Результаты исследования.** Зависимости пробивных НЭП и напряжения для воздуха, полученные на основе предложенной модели для ряда конденсаторной бумаги марки КОН 2 различной толщины, приведены на рис. 3, а дополнительная информация – в табл. 3.

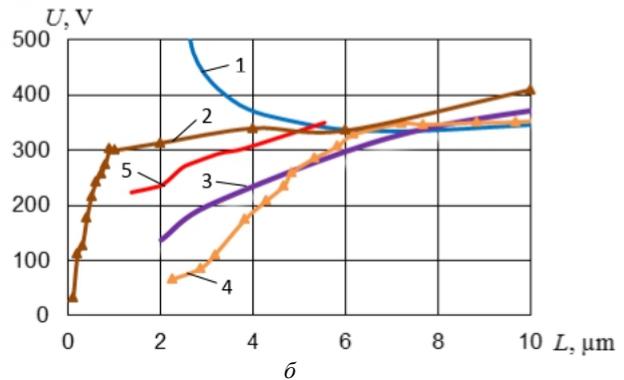


Таблица 3  
Параметры моделей конденсаторной бумаги КОН 2

Марка бумаги	Размеры $h \times b \times l$ , мкм	Амплитуда напряжения $U$ , В	Количество пор $N$	Длина воздушной поддоласти $L_a$ , мкм	Длина водной поддоласти $L_w$ , мкм	Относительная эквивалентная диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	Модуль напряженности электрического поля воды $E_w \cdot 10^{-6}$ , В/м	
							максимальный по модели	по зависимости (1)
КОН 2-30	30 × 190,08 × 100	975,80	24	5,54	3,76	5,241	2,41	6,836
КОН 2-18	18 × 202,36 × 100	721,24	33	3,78	2,56	5,241	3,44	6,856
КОН 2-15	15 × 184,72 × 100	664,68	33	3,31	2,23	5,234	3,73	6,862
КОН 2-12	12 × 165,44 × 100	622,26	37	2,63	1,79	5,217	4,30	6,870
КОН 2-10	10 × 150,84 × 100	537,40	33	2,43	1,65	5,217	4,40	6,872
КОН 2-8	8 × 134,92 × 100	494,98	33	2,07	1,39	5,238	4,34	6,876
КОН 2-6	6 × 116,80 × 100	395,98	27	1,84	1,24	5,264	5,34	6,879
КОН 2-4	4 × 95,40 × 100	339,42	27	1,36	0,92	5,232	6,60	6,884

На рис. 3 также приведены зависимости, полученные на основе экспериментальной кривой Пашена [5], пересчитанной на нормальное атмосферное давление, кривой Таева для электродов из металлокомпозиции серебра и окиси кадмия [1], кривой Слейда [2] и кривой Пешо, определенной в системе позиционирования электродов высокой точности с критерием пробоя 50 нА [4]. Построение зависимостей, основанных на численном расчете электростатического поля, начиналось с создания модели бумаги КОН 2-30. Значение боковой стороны криволинейной трапеции в воздушном сегменте этой модели соответствует разрядному промежутку кривой Пашена с НЭП равной модулю усредненного по площади указанной трапеции вектора НЭП. Следует отметить, что распределение НЭП в различных воздушных секторах неодинаково. Поэтому принимается максимальное значение модуля усредненного вектора НЭП в качестве пробивного среди подобластей, расположенных в центральной части рассматриваемого образца. В дальнейшем вычислялась эквивалентная диэлектрическая проницаемость энергетическим способом аналогично [7]. Геометрия следующей модели бумаги подбиралась так, чтобы ее эквивалентная диэлектрическая проницаемость (в пределах погрешности) была равна исходной, определенной для КОН 2-30.

На основе значений боковой стороны криволинейной трапеции и максимального модуля усредненного вектора НЭП среди всех воздушных сегментов в

центральной области образца откладывались все последующие точки предлагаемых зависимостей. Проверка полученных зависимостей осуществлялась соответствием данных кривых и известной экспериментальной точкой с координатами 70 МВ/м и 5 мкм. Корректность полученных данных подтверждается значениями модулей усредненных векторов НЭП по площадям криволинейных трапеций в водных сегментах пор каждой модели, которые меньше пробивных напряжений для этих промежутков, определенных по (1). Однако после пробоя воздушного сегмента в воде достигается необходимое значение пробивной НЭП.

Для подтверждения полученных зависимостей аналогичным образом была построена зависимость на основе ряда конденсаторной бумаги марки КОН 3 различной толщины, приведенная на рис. 3,а. Расхождение значений, полученное для этого участка, не превышает 9 %.

На основании предложенной модели было определено минимальное значение НЭП, при котором начинается развиваться пробой в целлюлозе. Для бумаги марки МКОН 0,8-15 были в соответствии с предложенной кривой НЭП рассчитаны радиус и количество пор. Фрагмент области исследуемого образца представлен на рис. 4. Для подобласти целлюлозы с боковой стороной 0,34 мкм значение модуля НЭП составило 141,5 МВ/м, что в пределах указанного выше диапазона значений.

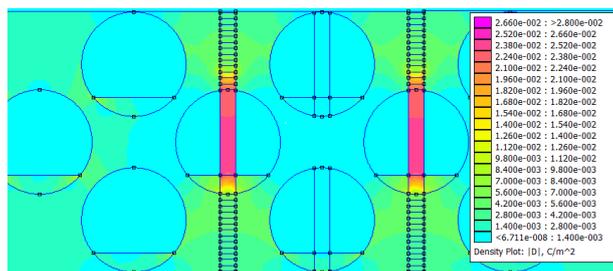


Рис. 4. Фрагмент распределения электростатического поля в МКОН 08-15 при частичном пробое

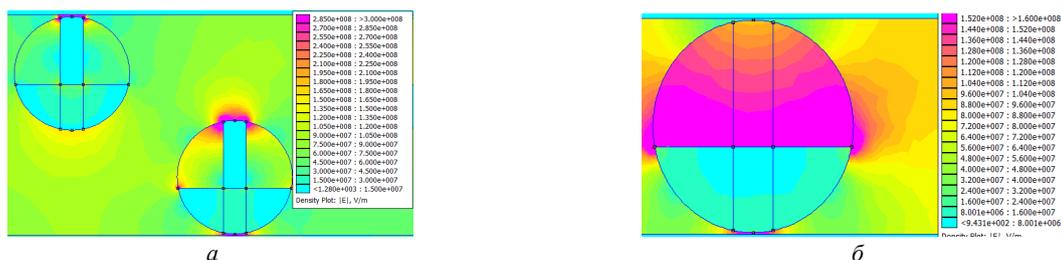


Рис. 5. Распределение электростатического поля при развитии пробоя по сценарию Таева для бумаги КОН 2-6 (а) и по сценарию Пешо для бумаги КОН 2-4 (б)

Проверка возможности использования кривой Таева для объяснения механизма пробоя конденсаторной бумаги выполнялась на примере разрядного промежутка 1,84 мкм. Соответствующее распределение электростатического поля показано на рис. 5,а. В этом случае пробивная НЭП целлюлозы превышена в 1,6 раза, что приводит к идентичности пробивного напряжения для бумаг различной толщины. При использовании кривой Пешо возникает вопрос механической поперечной прочности образцов бумаги КОН 2 с толщиной 4...6 мкм. Также невозможно объяснить значение пробивного напряжения КОН 2-4.

Как видно из рис. 5,б диаметр пор практически равен толщине образца бумаги КОН 2-4, и усредненная НЭП на 5,6 % меньше предсказываемого значения кривой Пешо. В диапазоне 2,09...3,28 мкм значения НЭП кривой Пешо должны быть меньше на 1,6...7,1 % для объяснения закономерности пробивных напряжений конденсаторной бумаги.

**Заключение.** Полученная в работе зависимость напряженности электрического поля воздуха от длины разрядного промежутка удовлетворительно объясняет значения пробивных напряжений образцов конденсаторной бумаги при изменении их марок и толщины.

Наилучшее совпадение полученных данных наблюдается с экспериментальной зависимостью Пешо. Максимальное расхождение кривых составило 32 % в диапазоне разрядных промежутков 2,00...5,54 мкм. Предложенная методика численного расчета пробивного напряжения воздушных включений при наличии водных включений в толщине твердой изоляции может быть применена для других видов твердой тонкослойной изоляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 198 с.
2. Fu Y., Zhang P., Verboncoeur J.P., Wang X. Electrical breakdown from macro to micro/nano scales: a tutorial and a review of the state of the art. *Plasma Research Express*, Feb. 2020, vol. 2, no. 1, p. 013001. doi: 10.1088/2516-1067/ab6c84.
3. Babrauskas V. Arc breakdown in air over very small gap distances. *Conference: Interflam 2013*, vol. 2, pp. 1489-1498.
4. Peschot A., Bonifaci N., Lesaint O., Valadares C., Poulain C. Deviations from the Paschen's law at short gap distances from 100 nm to 10 μm in air and nitrogen. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, iss. 12, p. 123109. doi: 10.1063/1.4895630.
5. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н. Электрофизические основы техники высоких напряжений. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 704 с.
6. El-Zein A., El Bahy M. M., Talaat M. A prediction methodology of electrical tree propagation in solid dielectrics. *Journal of Electrical Engineering*, 2009, vol. 9 (2), pp. 87-93.
7. Пальчиков О.О. Определение эффективной диэлектрической проницаемости гетерогенного материала. *Электротехника і електро механіка*, 2020, № 2, С. 59-63. doi: 10.20998/2074-272X.2020.2.09.
8. ДСТУ 3467-96. Папір конденсаторний. Загальні технічні умови. – К.: Держстандарт України, 1996. – 34 с.
9. Zhang T., Du J., Lei Y., Cheng Y., Liu W., Yi X., Yin J., Yu P. Effect of pores on dielectric breakdown strength of alumina ceramics via surface and volume effects. *Journal of the European Ceramic Society*, Jul. 2020, vol. 40, no. 8, pp. 3019-3026, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.024.
10. Энциклопедия полимеров. Т. 1. Под ред. В. А. Каргина. – М.: Сов. Энци., 1972. – 1224 с.
11. Осипенко В.И., Ступак Д.О., Поздеев С.В. Пробой жидкости серией искровых разрядов при электроэрозионном вырезании. *Метал та луття України*, 2009, № 11-12, С. 60-64.

#### REFERENCES

1. Gitlevich A.E., Mikhailov V.V., Parkanskii N.Ia., Revutskii V.M. *Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverkhnostei* [Electrospark alloying of metal surfaces]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1985. 198 p. (Rus).
2. Fu Y., Zhang P., Verboncoeur J.P., Wang X. Electrical breakdown from macro to micro/nano scales: a tutorial and a review of the state of the art. *Plasma Research Express*, Feb. 2020, vol. 2, no. 1, p. 013001. doi: 10.1088/2516-1067/ab6c84.
3. Babrauskas V. Arc breakdown in air over very small gap distances. *Conference: Interflam 2013*, vol. 2, pp. 1489-1498.
4. Peschot A., Bonifaci N., Lesaint O., Valadares C., Poulain C. Deviations from the Paschen's law at short gap distances from 100 nm to 10 μm in air and nitrogen. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 105, iss. 12, p. 123109. doi: 10.1063/1.4895630.
5. Bortnik I.M., Beloglovskii A.A., Vereshchagin I.P., Verшинin Iu.N. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokikh napriazhenii* [Electrophysical basics of high voltage engineering]. Moscow, MEI Publ., 2016. 704 p. (Rus).
6. El-Zein A., El Bahy M. M., Talaat M. A prediction methodology of electrical tree propagation in solid dielectrics. *Journal of Electrical Engineering*, 2009, vol. 9 (2), pp. 87-93.

7. Palchykov O.O. Determination of the effective permittivity of a heterogeneous material. *Electrical engineering & electro-mechanics*, 2020, no.2, pp. 59-63. doi: 10.20998/2074-272X.2020.2.09.

8. DSTU 3467-96. Папір конденсаторний. Загальні технічні умови [State Standard 3467-96. Capacitor paper. General technical conditions]. Kyiv, Derzhstandart Ukraine Publ., 1996. 34 p. (Ukr).

9. Zhang T., Du J., Lei Y., Cheng Y., Liu W., Yi X., Yin J., Yu P. Effect of pores on dielectric breakdown strength of alumina ceramics via surface and volume effects. *Journal of the European Ceramic Society*, Jul. 2020, vol. 40, no. 8, pp. 3019-3026, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.024.

10. *Entsiklopediia polimerov. T.1. Pod red. V. A. Kargina* [Encyclopedia of polymers. Vol. 1. Edited by V.A. Kargin]. Moscow, Sov. Ents. Publ., 1972. 1224 p. (Rus).

11. Osipenko V.I., Stupak D.O., Pozdееv S.V. Break-down of liquid by a number of impulses in wire electrodischarge machining. *Metal and casting of Ukraine*, 2009, no. 11-12, pp. 60-64. (Rus).

Поступила (Received) 29.09.2020

Принята (Accepted) 16.10.2020

Опубликована (Published) 24.12.2020

Пальчиков Олег Олегович, к.т.н.,

Национальный университет кораблестроения

имени адмирала Макарова,

54025, Николаев, пр. Героев Украины, 9,

e-mail: ole2012hulk@gmail.com

O.O. Palchykov

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,

9, Heroyiv Ukraine Ave, Mykolaiv, 54025, Ukraine.

#### Breakdown voltage of micron range air inclusions in capacitor paper.

**Purpose.** To substantiate the breakdown mechanism of capacitor paper on the basis of numerical-field models with segmented cross-sections of cylindrical volumes of air and water, and also use the proposed models to determine the breakdown strength of air in micron-sized gaps under normal conditions. **Methodology.** The model bases on a finite element solution to an electrostatic problem in a volume of capacitor paper consisting of cellulose and pores with air and water. First, the possible scenarios for the growth of breakdown in capacitor paper are analyzed and to the conclusion is made, that complete breakdown developed from a partial breakdown in the air cavity. A brand of capacitor paper is chosen in such a way that when its thickness changed, the breakdown strength of the electric field changed over a wide range. Then, for the paper with the lowest average electric field intensity the possibility of explaining the complete breakdown by the breakdown of air segments on the basis of the Paschen dependence is checked. Further points of the obtained dependence by constructing models of papers of the same brand and a different thickness under the assumption of the similarity of electrostatic fields are determined. As such a criterion, the constancy of the equivalent effective permittivity are taken. **Results.** The dependence of the breakdown strength of the air in the range of 1.36...5.54 μm under normal conditions is determined. The obtained relationship is between the Peschot and Taev curves. **Originality.** For the first time, the possibility of indirectly estimation the breakdown strength of an insulating material using an electrostatic field model is indicated. **Practical value.** The proposed method for the numerical calculation of the breakdown voltage of air inclusions in the presence of water inclusions in the thickness of solid insulation can be applied to other types of solid thin-layer insulation. References 11, tables 3, figures 5.

**Key words:** electrical breakdown, model of capacitor paper, micron gap, electrostatic field, finite element method.