

01

## Исследование эффекта электрического пробоя диэлектрика на участке спада импульса напряжений на основе подхода инкубационного времени

© Ю.В. Петров, В.А. Морозов, И.В. Смирнов, А.А. Лукин

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ur@UR1004.spb.edu

(Поступило в Редакцию 24 марта 2014 г. В окончательной редакции 19 марта 2015 г.)

Представлены результаты исследования временных эффектов электрического пробоя, который может происходить как на стадии роста, так и на стадии снижения импульса напряжения, приложенного к электродному промежутку. Получены экспериментальные значения импульсной электрической прочности известняка, песчаника, глины, парафина и воды при фиксированном импульсе электрического напряжения, но при различных диэлектрических промежутках. Результаты экспериментов находят объяснение в рамках структурно-временного подхода, основанного на использовании критерия инкубационного времени. Получено, что пробой происходит не в результате достижений предельного значения электрического поля, но в результате создания необходимого силового импульса (электрической энергии) за характерное время.

### Введение

В работе рассматриваются временные эффекты импульсного пробоя, выражающиеся в скоростных зависимостях электрической прочности и влиянии параметров истории ввода энергии на предельные значения поля, при котором происходит пробой. В частности, изучается эффект пробоя диэлектрика на участке спада импульса напряжений [1,2]. Анализ эффекта строится на основе критерия инкубационного времени электрического пробоя [3] и направлен на исследование зависимости между временем пробоя и электрической прочностью различных сред.

При быстром росте напряжения, которое происходит в случае импульсного режима, предельное напряжение электрического поля проявляет сильную временную зависимость, что приводит к неустойчивому поведению электрической прочности диэлектрика. Причем важнейшим производным явлением выступает конкуренция различных механизмов и соответствующих временных характеристик прочности материала при быстром вводе энергии в среду, что может быть выражено, например, в смене пути разряда на границе жидкости и твердого диэлектрика при изменении крутизны фронта импульса напряжения („эффект Воробьевых“) [4,5].

Помимо того, что вольт-секундная характеристика зависит от многих условий эксперимента [6–9], она не всегда может быть построена при достаточно коротких импульсах электрического воздействия. Это связано с тем, что для динамического испытания диэлектрического промежутка используются треугольные или трапециевидные импульсы напряжения с участком роста и спада напряжения, при этом пробой, как правило, происходит на фронте импульса. Однако, как показывают исследования [1,2], пробой может происходить и на участке спада напряжения или на участке стабильно-

го напряжения (в случае трапециевидного импульса). Поскольку вольт-секундная зависимость не учитывает таких особенностей пробоя, она не может быть использована как универсальная характеристика электрической прочности материала и должна определяться для каждого индивидуального случая.

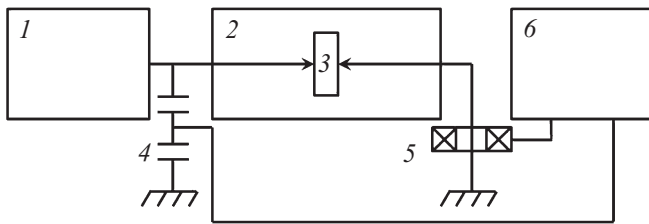
Таким образом, важной проблемой является разработка феноменологических критериев, которые позволят объяснить и предсказать неустойчивое поведение электрической прочности на простом инженерном уровне. Такой критерий должен учитывать влияние микрофизических факторов на развитие механизма пробоя за счет параметров, измеренных на макроскопическом уровне.

Подобный подход был предложен в [3]. Предложенная концепция позволяет интерпретировать разрушение твердых тел и жидкостей, а также электрического пробоя в диэлектриках с единой позиции — критерия инкубационного времени [3,10,11]. Более того, в работе [12] показано, что подход инкубационного времени может быть эффективно использован для моделирования импульсной электрической прочности, а также объяснения и прогнозирования эффекта перенаправления канала пробоя на границе раздела твердой и жидкой фаз.

### 1. Методика и результаты эксперимента

Для получения данных об электрическом пробое на ниспадающем участке импульса напряжений были проведены эксперименты по импульсному электрическому воздействию на горные породы и жидкость.

Электроимпульсный способ разрушения твердых непроводящих тел (горных пород, руд) основан на использовании взрывного действия канала разряда при электрическом пробое материала от приложенного им-



**Рис. 1.** Схема установки для электроимпульсного способа разрушения твердых непроводящих тел: 1 — генератор коротких высоковольтных импульсов, 2 — экспериментальная камера с электродами, 3 — образец, 4 — измеритель напряжения, 5 — измеритель тока, 6 — осциллограф.

пульса высокого напряжения. Способ позволяет разрушать материалы, располагая на них систему высоковольтных и заземленных электродов. Возможно два способа расположения электродов: либо на одной поверхности разрушаемого образца, либо на противоположных сторонах. В настоящей работе использовался второй способ расположения электродов (рис. 1).

Для предотвращения электрического пробоя по поверхности между электродами все устройство помещается в ванну с жидкостью, в качестве которой, например, может служить вода. При пробое (внедрение разряда) горных пород, помещенных в жидкость, требуется выполнение достаточно жестких условий, предъявляемых к параметрам электрического импульса напряжения: крутизна, длительность фронта импульса, время до пробоя и т. д.

Для реализации электроимпульсного способа разрушения использовалась экспериментальная установка на базе генератора коротких высоковольтных импульсов ГКВИ-300 со следующими параметрами: энергия  $W \approx 60$  J, амплитуда напряжения  $U = 100\text{--}300$  kV, длительность импульса  $T = 100\text{--}300$  ns. В каждом эксперименте с помощью емкостного делителя напряжений контролировался импульс напряжения, прикладываемый между электродами, а с помощью пояса Роговского замерялся ток, проходящий через образец. Параметры импульса напряжений представлены в таблице.

Параметры импульса напряжения и соответствующие параметры электрической прочности горных пород и воды

Материал	$A$ , kV	$T_{fr}$ , ns	$T_{dp}$ , ns	$E_c$ , kV/mm	$\tau$ , ns
Вода	$141 \pm 7$	$10 \pm 1$	$96 \pm 9$	$37 \pm 3$	$56 \pm 5$
Парафин	$134 \pm 11$	$13 \pm 3$	$96 \pm 8$	$7 \pm 1$	$44 \pm 6$
Глина	$150 \pm 18$	$8 \pm 1$	$92 \pm 13$	$12 \pm 2$	$61 \pm 8$
Известняк	$157 \pm 21$	$9 \pm 2$	$101 \pm 14$	$10 \pm 2$	$105 \pm 17$
Песчаник	$138 \pm 20$	$7 \pm 1$	$81 \pm 3$	$10.5 \pm 1$	$117 \pm 12$

Примечание.  $A$  — амплитуда импульса,  $T_{fr}$  — время нарастания импульса,  $T_{dp}$  — время спада импульса,  $E_c$  — квазистатическая электрическая прочность,  $\tau$  — инкубационное время электрического пробоя.

По разнице во времени между началом осциллограмм напряжения и тока определялся момент электрического пробоя и соответственно величина напряжения, при которой произошел пробой. В качестве образцов использовались бруски известняка, глины, песчаника и парафина длиной 26 mm, шириной 14 mm, толщинами от 1 mm до максимальной толщины, при которой происходит пробой (максимальный „пробивной“ промежуток). В эксперименте рассматривалось время электропробоя с увеличением толщины бруска при фиксированной амплитуде и длительности импульса.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Здесь  $H$  — толщина бруска,  $E^*$  — электрическая прочность ( $U^*/H$ ,  $U^*$  — напряжение электропробоя),  $t^*$  — время электропробоя,  $l$  — время от пика импульса до момента электропробоя (время ожидания). Параметры, используемые при расчетах, представлены в таблице.

С увеличением толщины бруска (диэлектрического промежутка) уменьшается электрическая прочность и увеличивается время электрического пробоя, при этом электропробой происходит на стадии спада напряжений. Наибольшую импульсную электрическую прочность в данных экспериментах показала вода, а наименьшую — парафин.

## 2. Обсуждение

При достаточно медленном росте напряжения эффективный прогноз электрической прочности может быть сделан с помощью критерия предельной напряженности электрического поля  $E(t)$  [7]:

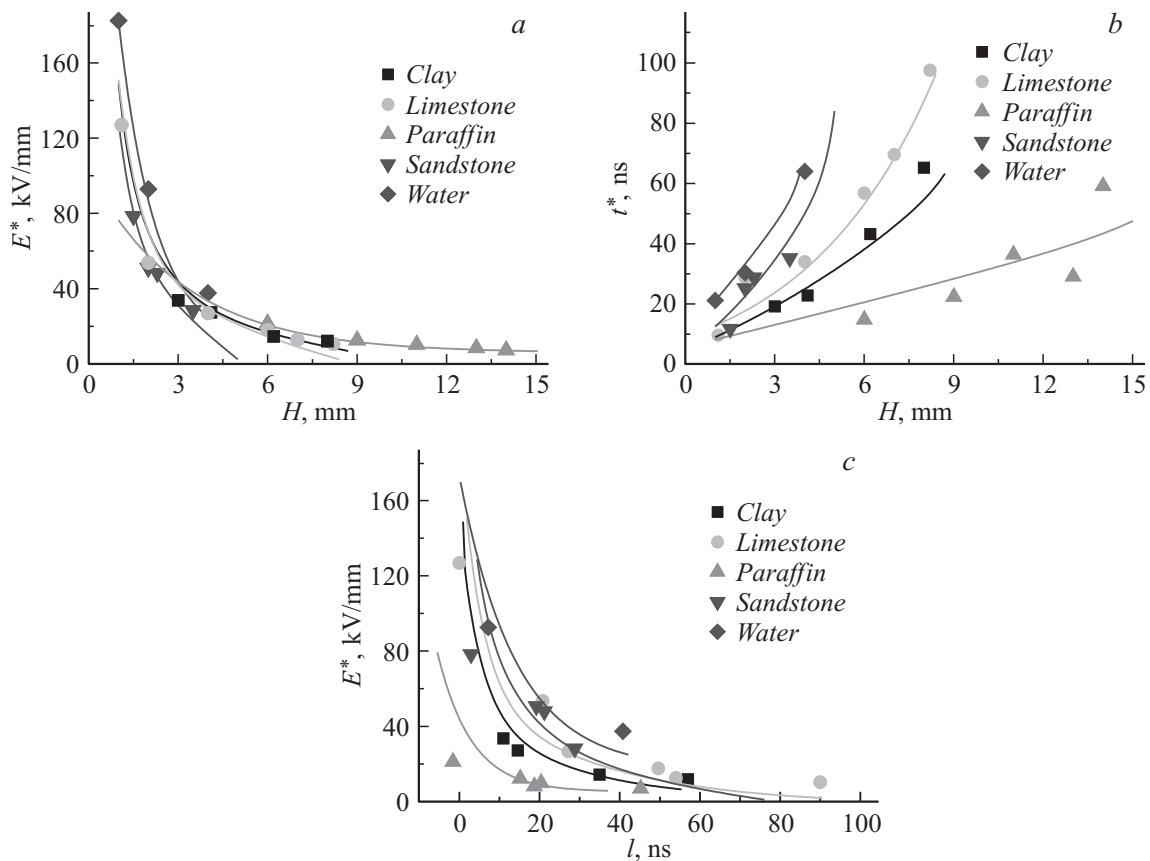
$$E(t) \geq E_c, \quad (1)$$

где  $E_c$  — критическая напряженность,  $t$  — время. Критические значения электропрочности зависят от качества контакта и геометрических факторов, включая толщину диэлектрического промежутка. Тем не менее для заданных параметров критическая напряженность остается постоянной.

Критерий инкубационного времени в случае электрического пробоя может быть представлен в следующей форме:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t E(t') dt' \geq E_c, \quad (2)$$

где  $E_c$  — квазистатическая электрическая прочность материала, которая может зависеть от межэлектродного расстояния,  $\tau$  — инкубационное время пробоя, определяемое качеством контакта и геометрическими факторами промежутка, влияющими на кинетику лавинного размножения электронов при разряде. Время, при котором впервые выполняется равенство в (2), соответствует времени пробоя  $t^*$ . Феноменологические и физические основы критерия (2) обсуждались в [3,10].



**Рис. 2.** Импульсная электрическая прочность горных пород (известняк, глина, песчаник, парафин) и воды. *a* — зависимость электрической прочности  $E^*$  от толщины бруска  $H$ ; *b* — зависимость времени электропробоя  $t^*$  от толщины бруска  $H$ ; *c* — зависимость электрической прочности  $E^*$  от времени ожидания  $l$  (время от пика импульса до момента электропробоя).

Важной особенностью критерия инкубационного времени является то, что при медленном вводе энергии он переходит в критерий (1).

Дальнейший анализ экспериментальных данных строится на основе предельного условия (2), при этом физические особенности пробиваемой среды и промежутка, а также влияющий на автоэмиссию микрорельеф поверхности электродов учитываются интегрально за счет параметров критериального условия.

Необходимо отметить, что используемые в условии (2) параметры лишь в определенной мере характеризуют свойства диэлектриков и не могут использоваться как универсальные характеристики исследуемых сред, так как они зависят от различных факторов схемы и условий испытаний, в частности, таких как материал электродов, их геометрия, размер и конфигурация межэлектродного промежутка. Влияние на параметры критерия может оказывать и качество электродных поверхностей, которые могут быть источниками предваряющих пробой микровзрывов и соответствующих электронных процессов [5]. Тем не менее при определенном соблюдении однотипности процедур и условий экспериментов введенные критериальные параметры могут быть удобным и эффективным инструментом классификации

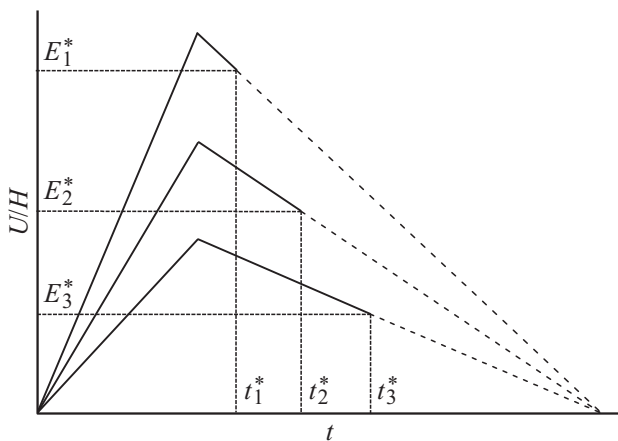
и сравнения различных диэлектрических сред и материалов по их статическим и динамическим пробивным характеристикам.

Предположим, что у нас в каждом испытании импульс имеет одну и ту же форму (рис. 3) и не отклоняется от заданных параметров ( $A = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ )

$$V(t) = \frac{At}{T_{fr}} [H(t) - H(t - T_{fr})] + \left( A \left( 1 + \frac{T_{fr}}{T} \right) - \frac{A(1 + \frac{T_{fr}}{T})t}{T} \right) [H(t - T_{fr}) - H(t - T)], \quad (3)$$

где  $H(t)$  — функция Хевисайда,  $T$  — длительность импульса. Далее, подставляя (3) в (2) и проводя численный расчет, мы получим зависимости электрической прочности и времени разрушения от толщины бруска (диэлектрического промежутка) (рис. 2).

При проведении расчетов параметры импульса задавались путем усреднения экспериментальных данных (см. таблицу). Инкубационное время  $\tau$  определялось полуэмпирическим методом, т.е. путем вариации  $\tau$  для наилучшего приближения расчетных кривых к экспериментальным точкам. Поскольку в данных экспериментах



**Рис. 3.** Электрический пробой на стадии спада импульса напряжений.  $U$  — напряжение,  $H$  — толщина диэлектрического промежутка,  $t$  — время,  $E_i^*$  — электрическая прочность для данного промежутка и данного импульса,  $t_i^*$  — время электропробоя. Амплитуда импульса  $A = U_{\max} = \text{const}$ , длительность импульса  $T = \text{const}$ .

рассматривались различные диэлектрические промежутки для фиксированного импульса, то в качестве квазистатической электрической прочности  $E_c$  рассматривалось значение электрической прочности при максимальном „пробивном“ промежутке.

Поскольку электропробой происходит на спаде импульса напряжения, то становится ясно, что определяющим фактором электропробоя здесь является не мгновенный уровень действующего силового поля, а временная динамика всего процесса, происходящего в течение определенного периода, предшествующего моменту пробоя.

Здесь нужно заметить, что представленная зависимость на рис. 2, *c* не является общепринятой вольт-секундной характеристикой материала, так как в данном случае значения электрической прочности и времени пробоя соответствуют разным межэлектродным расстояниям. Однако примечателен тот факт, что, имея всего два параметра характеризующих электрическую прочность ( $E_c$  и  $\tau$ ), можно получать различные зависимости, такие как вольт-секундная характеристика, время пробоя и электрическая прочность для различных диэлектрических промежутков.

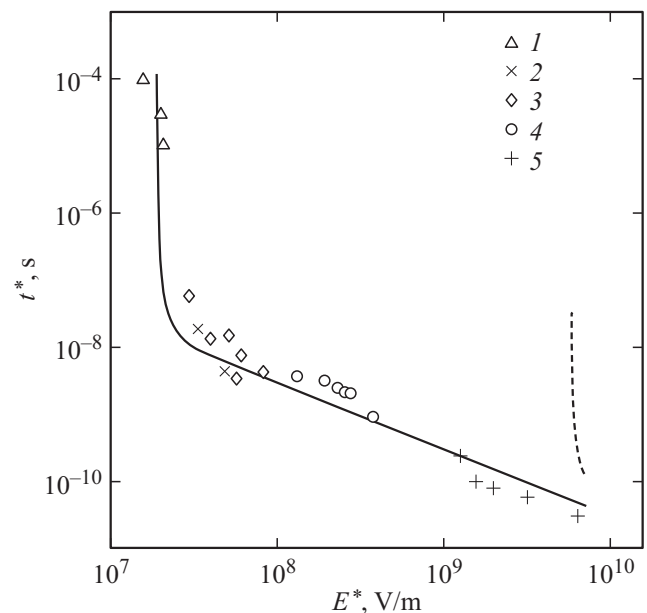
Например, критерий инкубационного времени электропробоя позволяет получить [12] временные зависимости электрической прочности, которые наблюдались в экспериментах [9, 13–16]. На рис. 4 показана экспериментальная и расчетная зависимости времени вакуумного пробоя от электрической прочности.

Экспериментальные данные отчетливо проявляют две ветви временной зависимости, одна из которых относится к медленному квазистатическому росту напряжения, а вторая — динамическому вводу энергии. При этом расчетные кривые, полученные из условия (2), демон-

стрируют аналогичный эффект и достаточно хорошо ложатся на экспериментальные точки.

Расчеты показали, что квазистатическая ветвь определяется, главным образом, значением параметра  $E_c$ , тогда как динамическая ветвь обусловлена приближением длительностей фронта импульса прикладываемого напряжения к величине инкубационного периода пробоя  $\tau$ . Таким образом, величина  $\tau$  может рассматриваться как параметр, интегрально характеризующий динамическую электрическую прочность соответствующего промежутка, зависящего от качества электродов и поверхности контакта пробиваемой среды. В таком случае пара ( $E_c, \tau$ ) полностью определяет электрическую прочность во всем временном диапазоне воздействий.

Расчитанная при других значениях параметров критерия пунктирная кривая на рис. 4 качественно согласуется с зависимостью из [17], прогнозирующей пробивные характеристики того же промежутка после процесса кондиционирования электродов. При этом оказывается, что величина макроскопического „кванта“, определяемая произведением  $Q_c = E_c \tau$ , практически не меняется ( $Q_c \approx 1.5\text{--}2.1 \cdot 10^{-1} \text{ Vs/m}$ ), тогда как оба значения статической и динамической прочности исходного и „кондиционного“ промежутков изменяются на два порядка. Представляется естественной физической интерпретация данного параметра как минимальной („пороговой“) величины импульса силового поля, достаточной для того, чтобы „вырвать“ необходимое количество электронов для образования последующей лавины, и в этом качестве он вполне может рассматриваться



**Рис. 4.** Зависимость времени вакуумного пробоя от электрической прочности для медных электродов. Точки — экспериментальные данные: 1 — [13], 2 — [9], 3 — [14], 4 — [15], 5 — [16]. Кривые — расчет по критерию (2): сплошная —  $\tau = 0.75 \cdot 10^{-8} \text{ s}$  и  $E_c = 2 \cdot 10^7 \text{ V/m}$ , пунктир —  $\tau = 0.35 \cdot 10^{-10} \text{ s}$  и  $E_c = 6 \cdot 10^9 \text{ V/m}$ .

как характеристика материала электродов, инвариантная относительно степени кондиционирования. Несомненно, является важным более подробный физический анализ возможности влияния на критериальные параметры специальных процессов обработки, уменьшающих коэффициент усиления локального поля на микронеоднородностях поверхностей электродов.

Еще одно замечание нужно сделать о конкурентном эффекте развития канала пробоя в граничащих диэлектрических средах. В данных экспериментах (разд. 1) образцы пород помещались в ванну с водой, и в зависимости от толщины бруска породы и интенсивности импульса напряжений электропробой происходил по каналу либо в воде, либо в породе. Таким образом, несмотря на большую электрическую прочность воды, возможны такие комбинации диэлектрического промежутка и параметров импульса, которые будут приводить к инверсии электрической прочности воды и горной породы (например, воды и известняка на рис. 2). Возможность моделирования данного эффекта на основе критерия инкубационного времени была показана в работе [12].

## Заключение

В проведенных экспериментах получен и исследован эффект электрического пробоя с реализацией момента пробоя на различных стадиях истории приложенного электрического поля. Увеличение диэлектрического промежутка при фиксированном импульсе напряжений приводит не только к снижению электрической прочности рассматриваемой системы электроды-диэлектрик, но и к увеличению времени до пробоя. При этом момент электрического пробоя приходится на стадию снижения напряженности приложенного поля. Отсюда следует, что определяющим фактором является не столько мгновенный уровень действующего силового поля, сколько временная динамика всего процесса, происходящего в течение определенного периода, предшествующего моменту пробоя.

Введение инкубационного времени как основной характеристики пробиваемого промежутка позволило смоделировать наблюдаемый эффект. Показано, что в качестве характеристики импульсной электрической прочности при коротком воздействии целесообразнее использовать данный временной параметр, который инвариантен по отношению к истории импульса напряжений. Соответствующий критерий инкубационного времени позволяет построить единую временную зависимость электрической прочности, включающую как квазистатическую, так и динамическую ветвь.

Анализ имеющихся данных показывает, что предложенный подход инкубационного времени электрического пробоя позволяет проводить аналитическое прогнозирование переходных режимов при осуществлении разрядов в различных средах, в частности, конкурентного эффекта

развития канала пробоя в жидком или твердом диэлектрике в зависимости от крутизны фронта импульса напряжения. Так, если при медленном квазистатическом вводе энергии электрическая прочность твердых диэлектриков чаще превышает прочность жидких диэлектрических сред, то при быстром импульсном напряжении электрическая прочность жидкостей может оказаться выше прочности твердых диэлектриков, в том числе горных пород.

Рассмотренные эффекты важны для развития перспективных электрофизических технологий бурения и интенсификации нефтяных скважин (в том числе и сланцевых месторождений), в частности, с помощью их очистки путем электроимпульсного дробления и удаления образующегося на различных глубинах пробок и парафиновых отложений. Наличие простых и эффективных критериев для прогноза электрической прочности среды на доступном инженерном языке является важнейшим фактором успеха при практической реализации таких технологий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (12-01-33049 мол\_а\_вед, 14-01-00814), гранта СПбГУ № 6.38.243.2014, программы № 25 президиума РАН и FP7 EU MARIE CURIE Project TAMER N 610547.

## Список литературы

- [1] Кузнецов Ю.И., Важов В.Ф., Журков М.Ю. // Изв. вузов. Физика. 2011. № 4. С. 17–22.
- [2] Важов В.Ф., Козлова Н.В. // Вестник науки Сибири. Сер. 5. 2012. № 1(2). С. 79–85.
- [3] Петров Ю.В. // ДАН. 2004. Т. 395. № 5. С. 621–625.
- [4] Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971. 255 с.
- [5] Месяц Г.А. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 24. С. 51–59.
- [6] Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Чепиков А.Т. Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. А. с. № А-122 от 29.04.1998. Приоритет от 14.12.1961.
- [7] Тарасова Л.В. // УФН. 1956. Т. 56. Вып. 2. С. 321–346.
- [8] Важов В.Ф., Муратов В.М., Дацкевич С.Ю. и др. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 4. С. 666–670.
- [9] Вавилов С.П., Месяц Г.А. // Изв. вузов. Физика. 1970. № 8. С. 90–94.
- [10] Bratov V., Petrov Yu. // Int. J. Fracture. 2007. Vol. 146. P. 53–60.
- [11] Петров Ю.В., Глебовский П.А. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 53–57.
- [12] Петров Ю.В. // ДАН. 2014. Т. 454, Вып. 3. С. 289–292.
- [13] Каляцкий И.И., Кассиров Г.М., Смирнов Г.В., Фролов Н.Н. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 7. С. 1547–1550.
- [14] Кассиров Г.М. // ЖТФ. 1996. Т. 36. Вып. 10. С. 1883–1885.
- [15] Месяц Г.А., Бугаев С.П., Проскуровский Д.И. и др. // РнЭ. 1969. Т. 14. № 12. С. 222–223.
- [16] Juttner B., Rohrbeck W., Wolff H. Proc. of the IX ICPIG. Bucharest, Hungary, 1969. P. 140.
- [17] Емельянов А.А. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 9. С. 113–119.