

На правах рукописи

Усманов Гаяр Закирович

**СТОХАСТИЧЕСКИ-ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

01.04.02 теоретическая физика
01.04.07 физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте высоких напряжений
Томского политехнического университета,
Северской государственной технологической академии и
Томском государственном университете.

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Носков Михаил Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор
Лопатин Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Трифонов Андрей Юрьевич

доктор физико-математических наук, профессор
Лисицына Людмила Александровна

Ведущая организация: Институт физики прочности и материаловедения,
СО РАН

Защита состоится “ 4 ” июня 2009 г. в 16³⁰ часов на заседании диссертационно-
го Совета Д 212.267.07 в Томском государственном университете по адресу:
634050, г.Томск, пр.Ленина 36.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государ-
ственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

И.В. Ивонин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследование электроразрядного разрушения твердых материалов, благодаря интенсивному развитию электроразрядных технологий, представляет как теоретический, так и практический интерес. Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, последовательной теории, описывающей все аспекты электроразрядного разрушения, до сих пор не создано. Препятствием служат как сложность экспериментальных методик изучения развития разряда в твердом диэлектрике и его последующего разрушения, так и теоретические трудности, связанные с нелинейностью и многомасштабностью протекающих процессов. Существующие модели описывают отдельные стадии электроразрядного разрушения. В экспериментальных работах также рассматриваются только отдельные аспекты явления. Таким образом, отсутствует не только физико-математическая модель этих процессов в их взаимосвязи, но и их единое феноменологическое описание. Теоретические трудности обусловлены как сложностью аналитического описания стохастически развивающихся разрядных каналов и трещин, так и проблемой совместного рассмотрения электрических и механических процессов. Кроме того, разрядные каналы и трещины образуют трехмерные структуры, форма которых может существенно влиять на процесс разрушения, поэтому использование одно- и двумерных приближений не всегда оправдано. В связи с этим, для теоретического изучения электроразрядного разрушения целесообразно использовать метод компьютерного моделирования. Таким образом, тематика настоящей работы, посвященная созданию самосогласованной модели электроразрядного разрушения, является актуальной.

Цель работы: создание комплексной физико-математической модели электроразрядного разрушения, установление закономерностей электрического разряда в конденсированных диэлектриках и характеристик разрушения твердого материала плазменным каналом пробоя.

В соответствии с целью работы были сформулированы следующие задачи:

1. Определение основных процессов, влияющих на характер электроразрядного разрушения материалов, и установление взаимосвязей между ними.
2. Создание самосогласованной физико-математической модели, описывающей работу источника импульсных напряжений, рост разрядных каналов, перенос зарядов и перераспределение электрического поля в диэлектрике, изменение состояния плазменного канала пробоя, деформацию материала, распространение упругих волн и формирование структуры трещин в нем.
3. Разработка на основе модели численного алгоритма и программного обеспечения, позволяющего проводить исследование закономерностей электрического пробоя конденсированных диэлектриков и разрушения твердых материалов с помощью вычислительных экспериментов.
4. Выбор параметров модели сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными.
5. Установление закономерностей развития разряда и разрушения твердого материала, расширяющимся плазменным каналом пробоя.

Методы исследования включают в себя анализ феноменологии и физических процессов, ответственных за рост структур разрядных каналов и трещин, использование стохастически-детерминистического подхода для построения комплексной модели электроразрядного разрушения, проведение численных исследований с помощью созданного проблемно-ориентированного программного обеспечения, установление закономерностей формирования структур разрядных каналов и трещин на основе анализа результатов моделирования и сопоставления с экспериментальными данными.

Научная новизна работы заключается в:

- создании комплексной модели, взаимосогласованно описывающей все стадии электроразрядного разрушения твердых материалов;
- количественном описании всех основных процессов, происходящих при электроразрядном разрушении с учетом их взаимосвязи;
- определении характеристик траектории разряда в системе электродов, наложенных на твердый диэлектрик, находящийся под слоем жидкости.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов, протекающих при электроразрядном разрушении материалов, а также развитию методов математического моделирования электрического пробоя и разрушения. Разработанное программное обеспечение позволяет прогнозировать траекторию разряда и оценивать эффективность разрушения для различных условий. Результаты исследований могут применяться для выбора параметров импульсных генераторов и геометрии электродных систем с целью оптимизации технологий электроразрядного разрушения.

На защиту выносятся:

- комплексная физико-математическая модель электроразрядного разрушения, взаимосогласованно описывающая работу источника импульсных напряжений, развитие разрядной структуры, расширение канала пробоя, деформацию окружающего материала и формирование трещин;
- объяснение эффекта внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в жидкость, в системе наложенных на его поверхность электродов и вероятностные характеристики траектории внедренного канала пробоя;
- пространственно-временные, токовые и полевые характеристики разрядных структур, кинетические и динамические характеристики формирования трещин.

Личный вклад автора заключается в участии в постановке задачи исследований, анализе процессов протекающих при электроразрядном разрушении, создании физико-математической модели, разработке численных алгоритмов расчета и проблемно-ориентированного программного обеспечения (при участии Чеглокова А.А.), проведении численных исследований закономерностей пробоя конденсированных диэлектриков и разрушения твердого материала, анализе и интерпретации полученных данных. Все основные положения и выводы диссертации получены автором лично.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: Научная сессия МИФИ (Москва 2005); Все-

российская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск 2005); XI всероссийская научно-техническая конференция "Энергетика: экология, надежность, безопасность" (Томск 2005); отраслевая научно-техническая конференция «Технология и автоматизация атомной энергетики» (Северск 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 гг); XI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ» (Томск 2005, 2006); Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск 2005, 2007); III всероссийская конференция молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии» (Томск 2006); научно-практическая конференция: «Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения» (Северск 2007, 2008); 10th International conference on gas discharge plasmas and their technological application (Tomsk 2007); 15th International Symposium on High Current Electronics (Tomsk 2006, 2008); Международная школа-семинар «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения» (Томск 2008); Всероссийская конференция по математике и механике (Томск 2008).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 27 работах, в том числе в 20 научных статьях, 5 из которых опубликованы в реферируемых журналах. В ходе выполнения работы было подготовлено 5 отчетов о НИР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал работы изложен на 109 страницах, включает 4 таблицы, содержит 45 рисунка и список литературы из 151 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна результатов, перечислены защищаемые положения, отражены практическая ценность работы и достоверность полученных результатов, представлены структура и объем диссертации.

Первая глава диссертации посвящена феноменологическому описанию разряда в конденсированных диэлектриках и разрушения твердых материалов, а также математических методов, используемых для моделирования электрического разряда и разрушения. Сделан обзор различных видов неустойчивостей приводящих к развитию разряда. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие при пробое. Проведен анализ существующих методов моделирования электрического пробоя. Рассмотрены основные механизмы и критерии формирования трещин в твердом теле под действием деформаций. Представлен обзор подходов к моделированию различных типов деформации и разрушения.

Во второй главе диссертации на основе анализа процессов, происходящих при электроразрядном разрушении, построена комплексная физико-математическая модель, взаимосогласованно описывающая пробой и разрушение твердого материала. Модель основана на стохастически-детерминистическом подходе к изучению роста неупорядоченных структур и

состоит из четырех частей, описывающих работу генератора импульсных напряжений, развитие разрядной структуры, динамику плазменного канала пробоя, деформацию и разрушение материала.

Работа генератора импульсных напряжений моделируются на основе эквивалентной схемы, содержащей генерирующий конденсатор емкостью C , переменное сопротивление R , индуктивность L , паразитную емкость C_S и нагрузку, (Рис. 1). Сопротивление R изменяется по следующему закону:

$$R = R_1 + (R_0 - R_1)e^{-t/\theta_R}, \quad (1)$$

где R_0 - начальное сопротивление при $t=0$, R_1 - предельное минимальное значение сопротивления. Изменение токов и падений напряжения на элементах цепи рассчитывается на основе правил Кирхгофа:

$$U_C + U_R + U_L + U_D = 0, \quad (2)$$

$$I = I_S + I_D, \quad (3)$$

где U_C – напряжение на емкости C ; $U_R = IR$ – напряжение на сопротивлении R ; $U_L = -L(dI/dt)$ – напряжение на индуктивности L ; U_D – напряжение на разрядном промежутке;

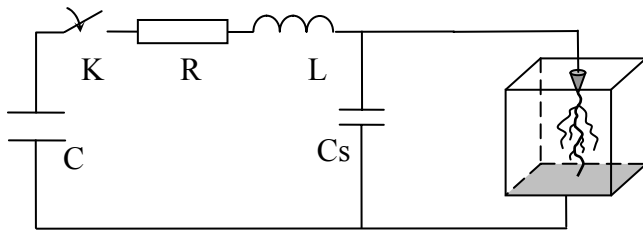


Рис. 1 Схема замещения генератора импульсных напряжений и нагрузки. C – емкость генератора, K – ключ, L – индуктивность цепи, R – переменное сопротивление цепи, C_S – паразитная емкость.

$I = C(dU_C/dt)$ – полный ток, протекающий через генерирующий конденсатор C ; $I_S = C_S(dU_D/dt)$ – ток через паразитную емкость; I_D – ток через разрядный промежуток. Напряжение на разрядном промежутке $U_D(t)$ и ток через него $I_D(t)$ рассчитываются по уравнениям (1)-(3) взаимосвязано с моделированием развития разряда в диэлектрике.

Образование разрядных каналов происходит в результате локального фазового перехода диэлектрика в проводящее состояние и описывается стохастической зависимостью. Плотность вероятности ω_n роста проводящего канала в направлении n принимается прямо пропорциональной квадрату проекции локальной напряженности электрического поля E_n на данное направление, если величина проекции превосходит некоторое критическое:

$$\omega_n = \alpha \theta(E_n - E_c) E_n^2, \quad (4)$$

где α – коэффициент вероятности роста, E_c – критическая напряженность поля для роста разрядных каналов, $\theta(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда ($\theta(x)=1$, при $x>0$ и $\theta(x)=0$ при $x<0$). Квадратичная зависимость вероятности роста разрядного канала от напряженности электрического поля обусловлена тем, что на образование проводящей фазы затрачивается энергия электрического поля. Предполагается, что новые ветви разрядной структуры могут развиваться только с потенциального электрода или уже существующих ветвей.

Распределение потенциала электрического поля ϕ рассчитывается на основе теоремы Гаусса для диэлектриков:

$$\nabla(-\varepsilon \cdot \nabla \phi) = \rho / \varepsilon_0, \quad (5)$$

где ε_0 и ε – абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости, ρ – объемная плотность свободных зарядов в разрядных каналах и диэлектрике.

Изменение плотности зарядов в объеме диэлектрика и вдоль разрядного канала рассчитываются из уравнения сохранения заряда:

$$\frac{\partial \rho_V}{\partial t} = \nabla(\sigma_V \nabla \phi), \quad \frac{\partial \rho_l}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \lambda}(\gamma \cdot E_l), \quad (6)$$

где ρ_V – объемная плотность зарядов в диэлектрике, σ_V – удельная проводимость диэлектрика, ρ_l – линейная плотность зарядов вдоль канала, γ – погонная проводимость разрядного канала, равная произведению площади S поперечного сечения канала на удельную проводимость σ_{ch} плазмы в канале, l – координата вдоль канала, E_l – проекция напряженности электрического поля на направление канала.

Изменение погонной проводимости разрядных каналов в процессе развития разряда описывается модифицированным уравнением Ромпе-Вайцеля:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} = \chi \gamma E_l^2 - \xi \gamma, \quad (7)$$

где χ и ξ – коэффициенты возрастания и убывания проводимости соответственно. Первое слагаемое в правой части уравнения (7) описывает рост проводимости за счет энерговыделения в разрядном канале. Второе слагаемое связано с уменьшением проводимости каналов в результате рассеяния энергии в окружающее пространство.

В результате развития разряда образуется плазменный канал, замыкающий электроды, который описывается набором цилиндрических элементов фиксированной длины l и зависящего от времени радиуса r_{ch} ($r_{ch} \ll l$). Расширение каждого элемента рассматривается независимо от других элементов; для каждого элемента предполагается однородное распределение температуры, давления и проводимости. Моделирование изменения состояния плазменного канала пробоя основывается на уравнении баланса энергий:

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dA}{dt} + N_l = N_J, \quad (8)$$

где W – внутренняя энергия плазмы в канале, A – работа расширения канала, N_l – мощность потерь энергии на излучение и теплоперенос в диэлектрике, N_J – мощность энерговыделения.

Внутренняя энергия W плазмы элемента разрядного канала описывается выражением (адиабатическое приближение):

$$W = PV / (\gamma_* - 1), \quad (9)$$

где γ_* – эффективный показатель адиабаты, P и V – давление и объем плазмы соответственно.

Работа расширения элемента плазменного канала длиной l и радиусом r_{ch} определяется соотношением:

$$dA = P dV = Pl 2\pi r_{ch} dr_{ch}, \quad (10)$$

где $S = \pi r_{ch}^2$ – площадь поперечного сечения.

Мощность потери энергии предполагается пропорциональной внутренней энергии плазмы

$$N_l = \psi \cdot PIS / (\gamma_* - 1), \quad (11)$$

где ψ – коэффициент потери энергии.

Мощность энерговыделения определяется проводимостью γ и проекцией напряженности E_l на элемент канала:

$$N_j = \gamma E^2 l, \quad (12)$$

Распространение деформаций в твердом материале описывается вторым законом Ньютона для элементарного объема:

$$\rho_m \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (13)$$

где ρ – плотность материала, u_i – компоненты вектора смещения, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, x_k – координаты. Связь между тензором деформаций e_{ij} и тензором напряжения σ_{ij} в упругой среде определяется законом Гука для однородного и изотропного материала:

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda \left(\sum_k e_{kk} \right) \delta_{ij}, \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (14)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, λ , μ – постоянные Ламэ.

В качестве критерия трещинообразования используется интеграл повреждений Тулера-Бучера :

$$K = \int_{t_c}^t \theta(\sigma(t) - \sigma_c) \cdot [\sigma(t) - \sigma_c]^2 dt, \quad (15)$$

где $\sigma(t)$ – мгновенное значение локального напряжения. Локальное разрушение материала может происходить при превышении интегралом повреждений K критического значения K_c ($K \geq K_c$). Значения параметров разрушения K_c , σ_c выбираются из сопоставления результатов экспериментов и моделирования. Поскольку в разрушаемых материалах распределение неоднородностей механических свойств является случайным, для их учета вводится вероятностная функция образования трещины:

$$\omega_{cr} = \beta \theta(K - K_c) \cdot K, \quad (16)$$

где β – коэффициент вероятности образования трещины.

Сопряжение расчетов работы генератора и развития разряда осуществляется с помощью согласования тока и напряжения на разрядном промежутке в цепи генератора с распределением потенциала и тока в разрядном промежутке:

$$\int_{S_p} \left(-\varepsilon \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left(\nabla \phi \right) - \sigma_V \nabla \phi \right) d\mathbf{s} + \sum \gamma E_l = I_D, \quad \phi|_{S_p} = U_D, \quad \phi|_{S_0} = 0, \quad (17)$$

где S_p (S_0) – граница потенциального (заземленного) электрода. Первое слагаемое под интегралом в выражении (17) соответствует току смещения через

поверхность потенциального электрода, второе – объемному току проводимости. Сумма в выражении (17) соответствует току проводимости по разрядным каналам, растущим с потенциального электрода.

Для согласованного решения уравнений цепи генератора и уравнения баланса энергий (8) предполагается, что удельная проводимость σ_{ch} внутри канала пропорциональна удельной внутренней энергии канала:

$$\sigma_{ch} = \eta \cdot W / V, \quad \gamma = \eta \cdot P(t) \pi r_k^2(t) / (\gamma_* - 1), \quad (18)$$

где η – параметр возрастания проводимости. Радиус канала определяется из совместного решения уравнения (8) и условия равенства давлений внутри и снаружи канала:

$$P = \frac{1}{3} \int_S \sum_{k=1}^3 \sigma_{kk} ds / 2\pi r_{ch} l. \quad (19)$$

В третьей главе приводятся результаты численных исследований закономерностей пробоя и разрушения материалов. Параметры модели выбирались на основе сопоставления формогенеза, токовых и полевых характеристик разрядных структур, а также скоростей упругих волн и трещин в твердых диэлектриках,

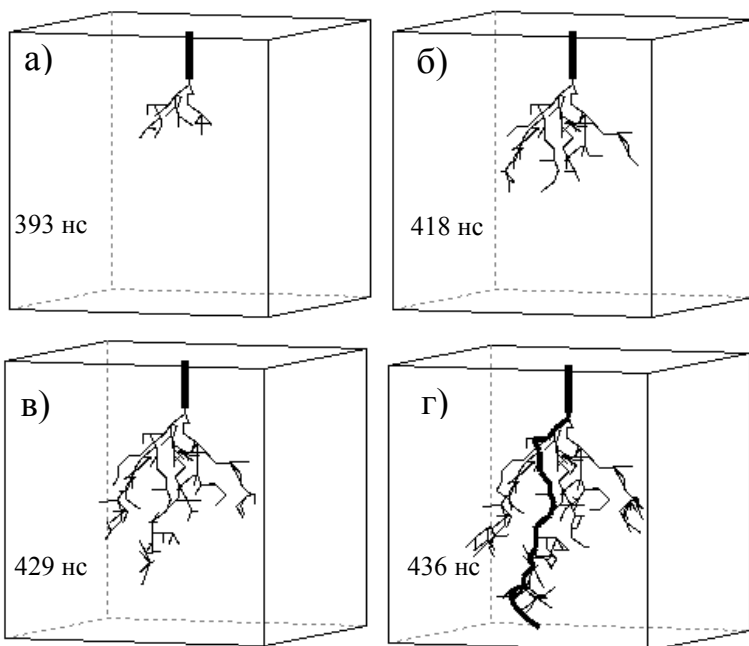


Рис.2 Рост разрядной структуры в воде. $\varepsilon = 81$, $E_c = 15$ МВ/м, $\alpha = 3 \cdot 10^{-8}$ м²·В²/с, $\gamma_0 = 1,5 \cdot 10^{-9}$ См·м, $\chi = 1 \cdot 10^{-5}$ См·м²/Дж, $\xi = 1,5 \cdot 10^7$ с⁻¹, начальное напряжение на емкости генератора 200 кВ, межэлектродный промежуток 2 см.

полученных моделированием, с данными физических экспериментов. Основные закономерности развития разряда изучались в геометрии электродов острие-плоскость (Рис. 2). Рост разрядных каналов начинается с острия, когда напряженность электрического поля достигает критического значения ($t=334$ нс, $U_D=214$ кВ). Скорость роста увеличивается по мере нарастания напряжения и приближения каналов к заземленному электроду. Разрядные каналы формируют стохастически ветвящуюся разрядную структуру. Средняя скорость роста структуры составляет $1,96 \cdot 10^5$ м/с, что согласуется с измерениями скорости развития разряда в наносекундном диапазоне времени. В процессе ее роста происходит замыкание межэлектродного плазменным каналом пробоя, по которому в последующем протекает основной разрядный ток (показан жирной линией на Рис. 2г).

Характер развития разряда зависит от крутизны фронта импульса напряжения A (рассчитывается по стандарту Международной электротехнической комиссии). Повышение крутизны фронта напряжения приводит к увеличению

напряжения пробоя (Рис. 3), увеличению скорости роста и уменьшению времени инициирования разряда (Таблица). Исследование развития разряда в жидких

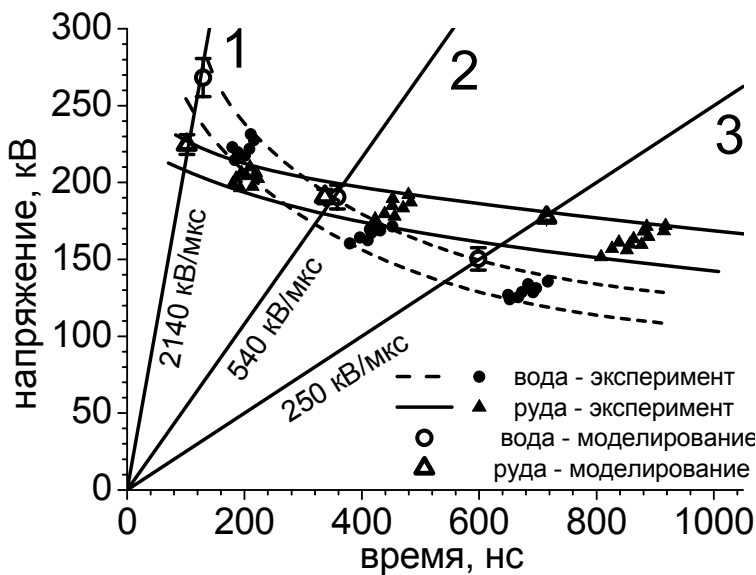


Рис.3 Вольт-секундные характеристики пробоя жидкого (техническая вода) и твердого (щерловогогорская руда) диэлектриков. Сравнение с экспериментальными данными, представленными в Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – РАН, Кольский научный центр, 1995. Вертикальными линиями показано стандартное отклонение для 10 численных экспериментов.

и твердых диэлектриках показало, что при низкой крутизне фронта (Рис. 3, прямая 3) пробой жидкого диэлектрика наступает раньше благодаря меньшему времени инициирования разряд в нем по сравнению с твердым диэлектриком.

Однако при превышении крутизной фронта некоторого значения (Рис. 3, прямая 2), пробой твердого диэлектрика наступает раньше, чем жидкого (Рис. 3, прямая 1), благодаря большей скорости развития разряда.

На основе результатов моделирования можно объяснить эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, по-

Таблица. Зависимость времени инициирования и скорости развития разряда от крутизны фронта

А, кВ/мкс	Время инициирования, нс		Скорость, км/с	
	жидкий	твердый	жидкий	твердый
250	685±12	903±1,5	166,7±10	968±69
540	423±6,2	481±2,8	210 ± 9,7	1057±50
2140	164 ± 3	180 ± 1	332 ± 13	1173±57

груженный в жидкость, в системе наложенных на его поверхность электродов, происходящий при увеличении крутизны фронта импульса напряжения (открытый в 1961 году «эффект Воробьевых»). При низких значениях крутизны фронта рост разрядных каналов начинается в жидкости благодаря меньшей критической напряженности E_c , разрядные каналы не внедряются в твердый диэлектрик, плазменный канал пробоя образуется в жидком диэлектрике. (Рис. 4а-б). При высоких значениях крутизны фронта импульса развитие разрядной структуры сначала протекает в жидком диэлектрике благодаря меньшему значению критической напряженности в нем. Внедрение происходит когда напряженность электрического поля на концах разрядных каналов пре-

взойдет критическое для твердого диэлектрика значение. Несмотря на то, что разрядная структура продолжает расти и в жидком диэлектрике, каналы, которые развиваются в твердом диэлектрике, раньше достигают заземленного электрода благодаря большей скорости роста (Таблица). Таким образом, плазменный канал пробоя формируется в твердом диэлектрике (Рис. 4в-г). Для количественного описания внедрения канала пробоя были предложены следующие величины: эффективность внедрения $P_{inc} = \int_{L_M} h_l dl_z$, максимальная глубина

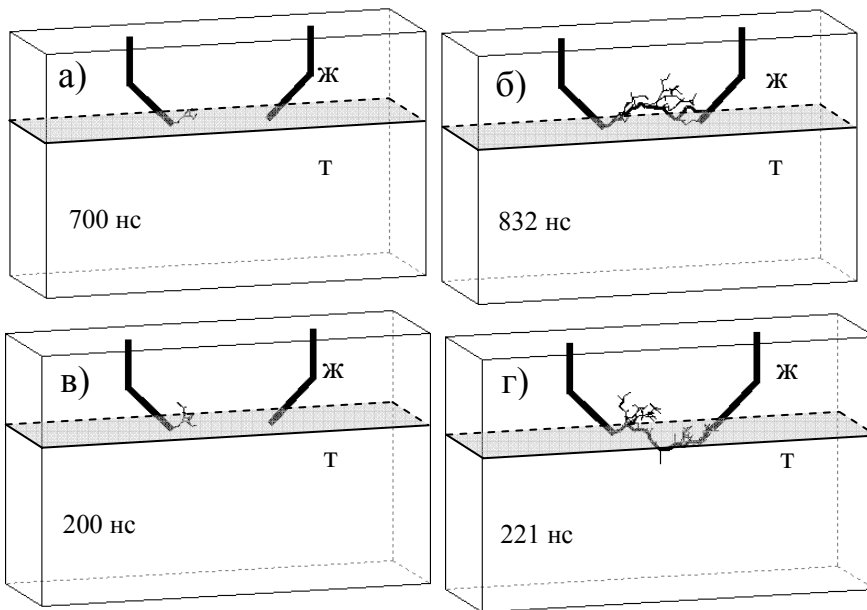


Рис.4 Развитие разрядной структуры в комбинированном диэлектрике при различной крутизне фронта напряжения А. а),б) – А = 250 кВ/мкс, в),г) – А = 2140 кВ/мкс.

внедрения $h_{\max} = \max_{L_M} h_l$ и средняя глубина внедрения $\langle h \rangle = P/l_z$. (h_l - расстояние между сегментом канала и границей раздела, dl_z - проекция сегмента dl на границу раздела, l_z - длина проекции траектории L_M на границу раздела). С повышением крутизны фронта импульса напряжения растет вероятность внедрения и увеличиваются все характеристики

заглубления разрядного канала в твердый диэлектрик (Рис. 5).

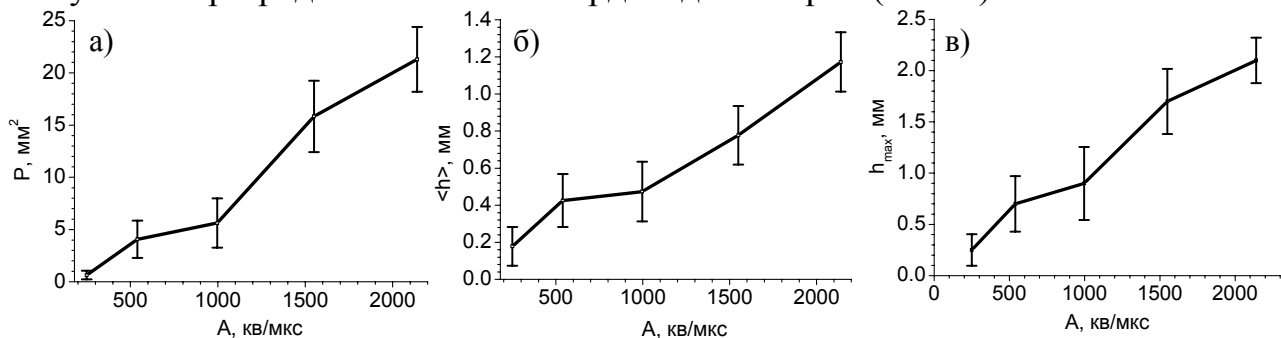


Рис. 5 Зависимость: эффективности заглубления (а), среднего заглубления (б), максимального заглубления (в) от крутизны фронта напряжения. Вертикальными линиями показано стандартное отклонение для 10 экспериментов.

Развитие разряда приводит к замыканию электродов плазменным каналом пробоя. После этого в цепи генератора начинаются затухающие колебания тока и напряжения (Рис. 6а,б), в процессе которых плазменный канал играет роль нелинейного сопротивления (Рис. 6в).

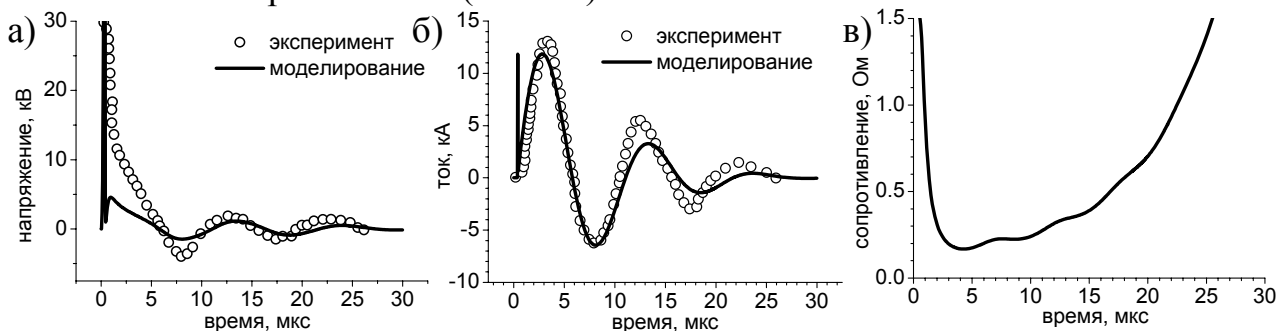


Рис. 6 Временные зависимости напряжения на разрядном промежутке (а), тока через разрядный промежуток (б), сопротивления разрядного промежутка (в). Сравнение с экспериментальными данными, представленными в К.А. Наугольных, Н.А.Рой. Электрические разряды в воде.– М.: Наука. 1971

Колебания тока и напряжения приводят к колебаниям мощности энерговыделения в канале (Рис 7а.).

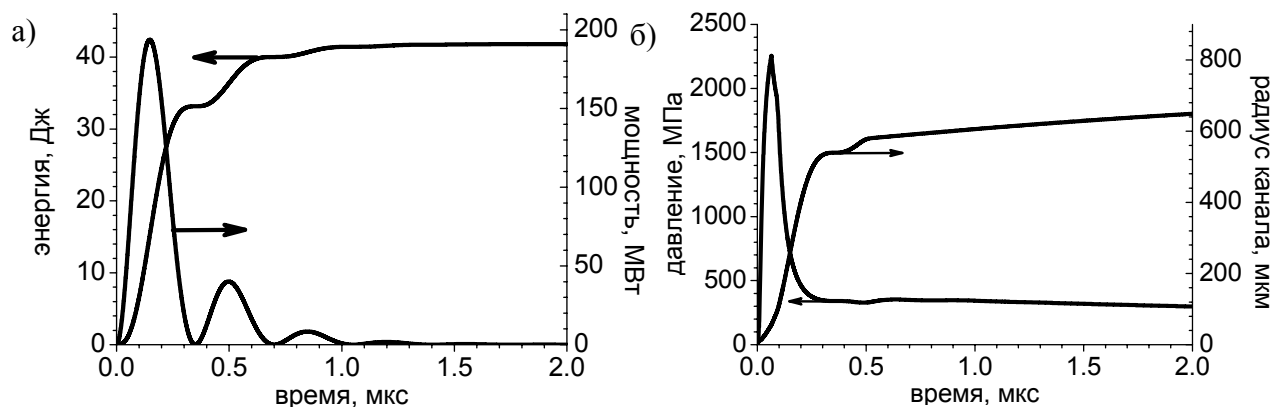


Рис. 7 Временные зависимости: мощности энерговыделения в канале и энергии выделившейся в канале (а), давления в канале и радиуса канала (б). Канал пробоя длиной 10 мм расположен на глубине 5 мм под свободной поверхностью гранитного образца.

Основное количество энергии (~80 %) выделяется в первом полупериоде колебаний тока. Интенсивное энерговыделение в канале в первый полупериод тока приводит к резкому росту давления плазмы (Рис. 7б) в канале. Повышение давления вызывает быстрое увеличение радиуса канала, после чего происходит снижение давления. Дальнейшие колебания энерговыделения оказывают незначительное влияние на давление и радиус канала. Скорость расширения канала в процессе разряда меняется в пределах 50÷1650 м/с. Расширение разрядного канала приводит к формированию области сжатия, которая начинает распространяться в окружающий материал (Рис. 8). Позади области сжатия формируется область растягивающих напряжений, благодаря чему начинается рост трещин. По мере удаления от канала амплитуда упругой волны снижается. Волна достигает свободной поверхности и отражается от нее (Рис. 8б). Средняя скорость упругой волны составляет $3,4 \cdot 10^3$ м/с. На Рис. 9 показано распространение структуры трещин в различные моменты времени. Появление первых трещин наиболее вероятно близи канала (Рис. 9а). Дальнейший рост трещин определяется распределением растягивающих напряжений в объеме диэлектрика. Вследствие интерференции отраженной волны и волны распространяющейся от канала происходит локальное усиление растягивающих напряжений в области между каналом и свободной поверхностью. Благодаря этому, наиболее интенсивный рост трещин наблюдается вблизи свободной поверхности, и происходит формирование откольной воронки (Рис. 9б). Время

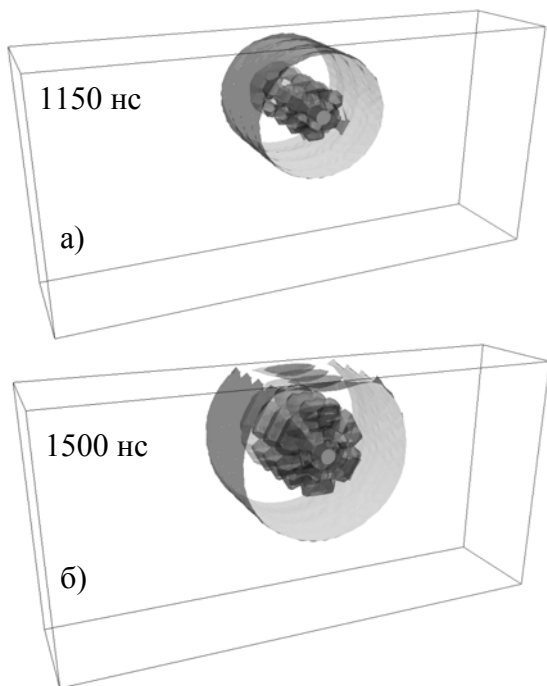


Рис. 8 Распространение упругой волны. Изоповерхность давления 10 МПа.

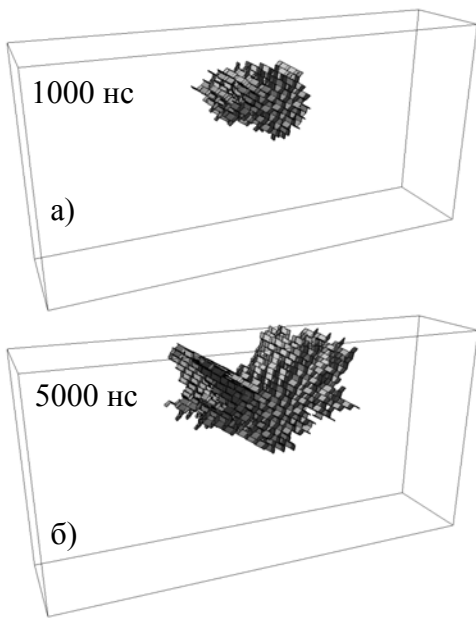


Рис. 9 Рост структуры трещин.

роста трещин значительно превосходит время выделения энергии в канале. Средняя скорость распространения трещин составляет $1,2 \cdot 10^3$ м/с.

Увеличение энергии, запасенной в конденсаторе генератора, приводит к увеличению энергии выделившейся в разрядном канале, конечного радиуса канала, работы расширения канала, суммарной площади трещин и энергии их образования (Рис. 10–11). При этом коэффициент преобразования энергии запасенной в генераторе, в энергию, выделившуюся в канале, снижается (Рис. 11а), а коэффициент преобразования энергии канала в энергию образования трещин возрастает (Рис. 11б). Коэффициент преобразования энергии генератора в энергию образования трещин меняется в пределах $(0,082 \div 0,098)\%$, что согласуется с литературными данными.

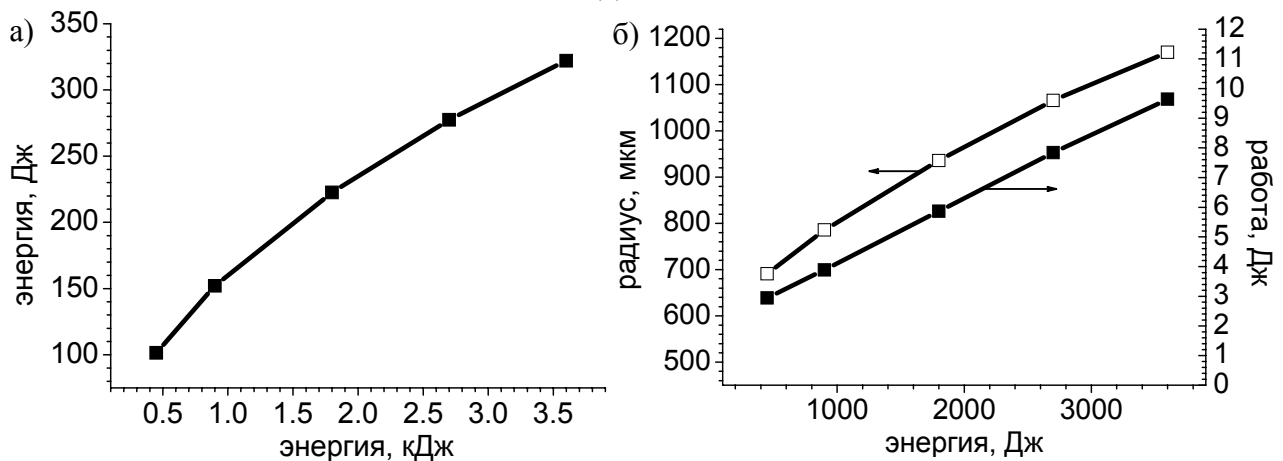


Рис. 10 Зависимость энергии введенной в канал от энергии, запасенной в генераторе (а), конечного радиуса канала и работы расширения (б), для различных энергий, запасенных в генераторе.

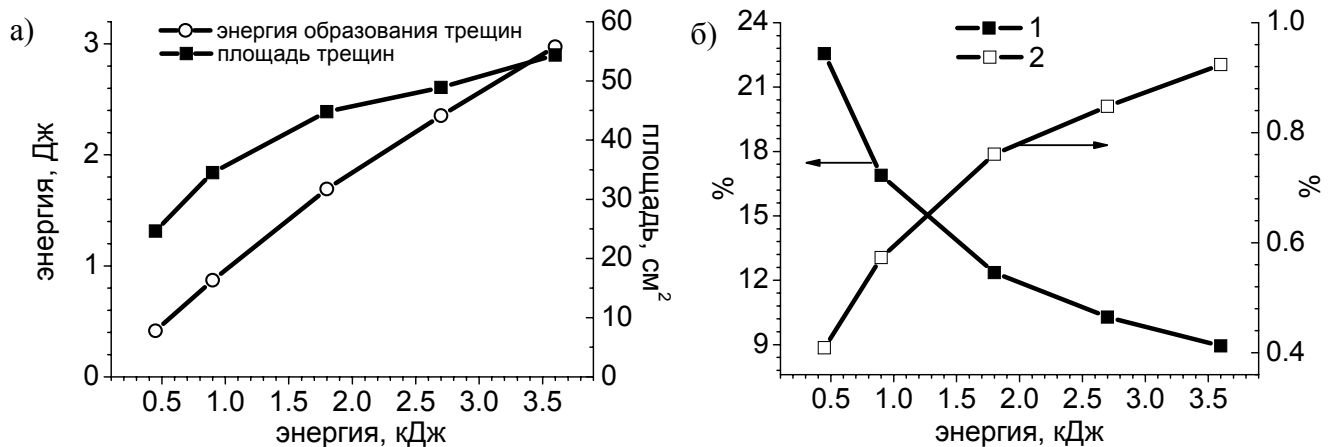


Рис. 11: Зависимости от энергии, запасенной в генераторе суммарной площади трещин и энергии образования трещин (а), коэффициенты преобразования (б): 1 – энергии запасенной в генераторе в энергию, выделившуюся в канале, 2 – энергии выделившейся в канале в энергию образования трещин.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Адекватное описание электроразрядного разрушения требует рассмотрения работы источника импульсных напряжений, роста разрядных каналов, переноса зарядов, изменения проводимости каналов, перераспределения электрического поля, расширения плазменного канала пробоя и изменения давления в нем, распространения упругих волн и разрушения материала с учетом их взаимного влияния.
2. На основе стохастически-детерминистического подхода разработана комплексная самосогласованная модель электроразрядного разрушения, описывающая работу генератора импульсных напряжений, развитие разрядных каналов, расширение канала пробоя, деформацию и разрушение твердого материала. Параметры модели имеют ясную физическую интерпретацию и могут рассматриваться в качестве интегральных характеристик основных процессов, происходящих при электроразрядном разрушении. На основе конечно-разностной дискретизации уравнений модели создан трехмерный численный алгоритм и программное обеспечение, позволяющее исследовать характеристики разрядных каналов и структуры трещин, формирующихся при электроразрядном разрушении методом компьютерного моделирования.
3. Определены закономерности, связывающие параметры генератора, величину напряжения и свойства диэлектрика с пространственно-временными и токовыми характеристиками роста разрядных структур в жидких и твердых диэлектриках. На основе сравнения характеристик развития разряда в твердых и жидких диэлектриках предложено объяснение внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в жидкость, в системе наложенных на его поверхность электродов. Установлено, что повышение крутизны фронта импульса напряжения приводит к увеличению средней и максимальной глубины внедрения разряда в твердый диэлектрик.
4. Методом математического моделирования получены характеристики разрушения твердого материала разрядным каналом, находящимся вблизи свободной поверхности образца. В частности, установлена связь между параметрами генератора и давлением, радиусом и сопротивлением плазменного канала пробоя. Показано, что увеличение энергии, выделенной в канале пробоя, приводит к увеличению суммарной площади трещин и энергии образования трещин. Установлены зависимости между энергией, запасенной в генераторе, и эффективностью ее преобразования, в энергию, выделившуюся в канале, и в энергию образования трещин.
5. Количественное соответствие результатов моделирования и экспериментальных данных подтверждает адекватность модели и достоверность полученных результатов. Таким образом, предложенная модель, основанная на стохастически-детерминистическом подходе, адекватно отражает основные физические аспекты электроразрядного разрушения. Модель может быть использована, как для исследования явления электроразрядного разрушения, так и для выбора параметров импульсных генераторов и элек-

тродных систем с целью оптимизации технологических применений электроразрядного разрушения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Моделирование электрического разряда в диэлектрике // Материалы научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики ТААЭ'2004», Северск. – 2004 – С. 51-56
2. Усманов Г.З., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Математическое моделирование электрического разряда в конденсированном диэлектрике // Научная сессия МИФИ-2005. VIII Московская международная конференция «Молодежь и наука». – С.48
3. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Моделирование внедрения разрядного канала при пробое комбинированного диэлектрика // Материалы научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики ТААЭ'2005», Северск. – 2005. – С. 158-162
4. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. 3-D моделирование внедрения разрядного канала при импульсном пробое твердых диэлектриков // XI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2005», Томск. – 2005. – С. 53-55
5. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. Математическое моделирование развития разряда в комбинированном диэлектрике // II Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск. – 2005 – С. 271-273
6. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. Заглубление разрядного канала в твердый диэлектрик под слоем жидкости с учетом электротехнических параметров импульсных генераторов // II Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск. – 2005. – С. 58-60
7. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. Моделирование разрядного канала при пробое конденсированного диэлектрика // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск. – 2005. – С. 169-170
8. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. Моделирование динамики электровзрыва в конденсированных диэлектриках // Материалы одиннадцатой всероссийской научно-технической конференции "Энергетика: экология, надежность, безопасность", Томск. – 2005 – С 101-103
9. Усманов Г.З., Носков М.Д., Лопатин В.В., Чеглоков А.А. Моделирование канальной стадии импульсного электрического разряда при пробое конденсированного диэлектрика – Материалы 3-й всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии» Томск. – 2006 – С. 393-396
10. Кузнецова Н.С., Усманов Г.З., Чуклинова Н.А. Энергетические параметры электровзрыва в твердых диэлектриках // XII Международной научно-практической

- конференции студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии СТТ 2006», Томск. – 2006. – С.243-245.
11. В.В. Лопатин, М.Д. Носков, Г.З. Усманов, А.А. Чеглоков Моделирование развития импульсного электрического разряда в конденсированном диэлектрике, // Известия ВУЗов, «Физика». – 2006. – №3. – С. 11-17
 12. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Математическое моделирование разряда в жидком диэлектрике // Технология и автоматизация атомной энергетики: Материалы отраслевой научно-технической конференции, Северск. – 2006. – С. 97-100
 13. G.Z. Usmanov, V.V. Lopatin, M.D. Noskov, A.A. Cheglovkov Simulation of the Pulse Electric Breakdown of Condensed Dielectric// Известия ВУЗов, «Физика». – 2006. – №10. – С. 227-230
 14. G.Z. Usmanov, V.V. Lopatin, M.D. Noskov, A.A. Cheglovkov Simulation of Electrical Discharge Development at Interface of Solid and Liquid Dielectrics // Известия ВУЗов, «Физика». – 2006. – №10. – С. 231-234
 15. G.Z. Usmanov, V.V. Lopatin, M.D. Noskov, A.A. Cheglovkov Simulation of Electrodischarge Destruction of Solid Dielectrics // Известия ВУЗов, «Физика». – 2007. – №9. (Приложение). – С. 380-383
 16. Усманов Г.З., Кузнецова Н.С., Чеглоков А.А. Математическое моделирование роста трещин при пробое твердого диэлектрика // IV Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск. – 2007. – С. 283-285
 17. G.Z. Usmanov, V.V. Lopatin, M.D. Noskov, A.A. Cheglovkov Mathematical Modeling of the Solid Dielectric Brittle Destruction as a Result of Pulse Electrical Breakdown. // 15th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings, 2008. – Tomsk, IAO SB RAS. – С. 274-277
 18. G.Z. Usmanov, V.V. Lopatin, M.D. Noskov, A.A. Cheglovkov Three dimensional simulation of solid dielectric destruction by discharge channel // Международная школа-семинар «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения», Томск. – 2008 – С. 110
 19. Усманов Г.З., Лопатин В.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Моделирование разрушения твердого диэлектрика импульсным электрическим разрядом. // Инновации в атомной отрасли: Сборник статей, Северск. – 2008 – С. 129-132
 20. Усманов Г.З., Лопатин В.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Математическое моделирование хрупкого разрушения материалов при электровзрыве // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2009. – №1(5). – С. 114-121.

Подписано в печать _____
Формат 60×84/16. Бумага ксероксная
Плоская печать. Печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ 1194
Изд. СГТА. Лицензия ИД №00407 от 02.11.99 г.
636036, Северск, пр. Коммунистический 65
Отпечатано в СГТА