

УДК: 621.3.048

**Г.З. Усманов, В.В. Лопатин,  
М.Д. Носков, А.А. Чеглоков**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ<sup>1</sup>**

В работе представлена модель, описывающая распространение упругой волны и формирование трещин под действием расширяющегося разрядного канала. Представлены результаты моделирования разрушения разрядным каналом, расположенным вблизи свободной поверхностью образца.

**Ключевые слова:** импульсный генератор, плазменный канал, деформации, разрушение, математическое моделирование.

Изучение процессов, происходящих при электроразрядном разрушении твердых диэлектриков, представляет как теоретический, так и практический интерес благодаря интенсивному развитию технологий электроразрядного разрушения, которое является более эффективным и экономичным по сравнению с традиционными механическими способами обработки материалов. Важность исследований электроразрядного разрушения обусловлена также необходимостью оптимизации энергозатрат в таких технологических процессах, как разрушение подлежащих утилизации бетонных конструкций, бурение скважин в твердых породах или сооружения подземных выработок под технологические установки [1, 2].

Для количественного описания разрушения диэлектрика импульсным электрическим разрядом необходимо создание физико-математической модели, описывающей работу генератора импульсов высокого напряжения, закономерности развития разряда в диэлектрике и разрушение диэлектрика под действием ударных волн, как взаимосогласованные процессы. Вследствие сложности и нелинейности этих процессов их аналитическое описание представляет значительные трудности и поэтому целесообразно использовать методы математического моделирования. В настоящей работе представлена модель, взаимосогласованно описывающая работу генератора, расширение разрядного канала, распространение упругих волн, формирование и рост трещин в твердом диэлектрике. Модель разработана на основе стохастически-детерминистического подхода [3].

### **Формулировка самосогласованной модели**

Работа генератора импульсных напряжений моделируется с помощью эквивалентной схеме колебательного контура, содержащего генерирующий конденсатор емкостью  $C$ , переменное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$  цепи (рис. 1).

Генераторы, описываемые подобной схемой, обычно используются в экспериментальных и технологических установках. Нагрузкой является разрядный промежуток. Переменное сопротивление учитывает сопротивление проводов и искровых разрядников ключа  $K$  генератора. Полагается, что после коммутации цепи

<sup>1</sup> Работа поддержана грантом РФФИ (08-08-01016-а).

(момент времени  $t = 0$ ) сопротивление  $R$  обычно используемых газовых коммутаторов уменьшается по экспоненциальному 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, величина которого составляет 1,5 – 3 Ом для 3 – 5-ступенчатых генераторов Маркса;  $\theta_R$  – характерное время коммутации цепи. Паразитная емкость цепи  $C_s$  представляет собой сумму паразитных емкостей элементов конструкции и емкости разрядного промежутка. После замыкания ключа  $K$  сумма напряжений на элементах цепи равна нулю:

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

где  $U_C$  – напряжение на емкости;  $U_R = IR$  – напряжение на сопротивлении  $R$ ;  $U_L = -L \, dI/dt$  – напряжение на индуктивности  $L$ ;  $U_D$  – падение напряжения на разрядном промежутке;  $I = -C \, dU_C/dt$  – ток, протекающий через генерирующий конденсатор  $C$ . Ток  $I$  равен сумме тока через паразитную емкость  $I_s = -C_s \, dU_D/dt$  и тока через разрядный промежуток  $I_D = G \cdot U_D$ :

$$I = I_s + I_D. \quad (3)$$

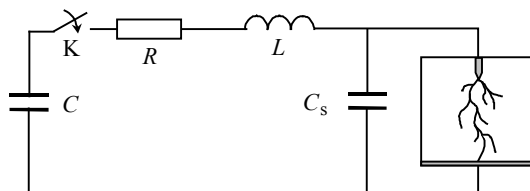


Рис. 1. Схема замещения генератора импульсных напряжений и нагрузки.  $C$  – емкость генератора,  $K$  – ключ,  $L$  – индуктивность цепи,  $R$  – переменное сопротивление цепи,  $C_s$  – паразитная емкость

Детальное описание динамики разрядного канала требует рассмотрения изменения состояния плазмы в процессе развития разряда, течения плазмы вдоль разрядных каналов, а также учета неоднородностей распределения параметров плазмы (температуры, плотности, проводимости и т.д.) в объеме разрядного канала. При описании динамики плазменного канала используются следующие упрощающие предположения:

- разрядный канал описывается набором цилиндрических элементов фиксированной длины  $l$  и зависящего от времени радиуса  $r_{ch}$ , предполагается, что  $r_{ch} \ll l$ ;
- расширение каждого элемента рассматривается независимо от других элементов;
- для каждого элемента предполагается однородное распределение всех физических величин в объеме элемента.

Изменение состояния канала описывается уравнением баланса энергий:

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dA}{dt} + N_l = N_J, \quad (4)$$

где  $W$  – внутренняя энергия плазмы в канале,  $A$  – работа расширения канала,  $N_J = I_D U_D$  – мощность джоулева энерговыделения,  $N_l$  – мощность потерь энергии в

окружающее пространство в результате излучения и теплопереноса. Внутренняя энергия  $W$  разрядного канала описывается выражением

$$W = \frac{PV}{\gamma_* - 1}, \quad (5)$$

где  $P$  – давление плазмы;  $V = l \cdot S$  – объем элемента канала длиной  $l$ ,  $S = \pi r_{\text{ch}}^2$  – площадь поперечного сечения элемента канала  $r_{\text{ch}}$ ,  $\gamma_*$  – эффективный показатель адиабаты плазмы. Работа расширения элемента плазменного канала определяется соотношением

$$dA = P l dS = P l 2\pi r_{\text{ch}} dr_{\text{ch}}. \quad (6)$$

Мощность тепловых потерь предполагается пропорциональной внутренней энергии плазмы

$$N_l = \psi \frac{P l S}{\gamma_* - 1}, \quad (7)$$

где  $\psi$  – коэффициент тепловых потерь.

С учетом выражений (5) – (7) уравнение баланса энергий (4) можно записать в виде

$$\frac{1}{\gamma_* - 1} \frac{d(PS)}{dt} + P \frac{dS}{dt} + \frac{PS}{(\gamma_* - 1)} = \frac{1}{l} \frac{d}{dt} (I_D U_D). \quad (8)$$

Моделирование распространения деформаций в твердом материале осуществлялось на основе уравнения

$$\rho \frac{d^2 u_i}{dt^2} = \sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $u_i$  – компоненты вектора смещения,  $\sigma_{ij}$  – тензор деформаций,  $x_k$  – координаты. Связь между тензором деформаций  $e_{ij}$  и тензором напряжения  $\sigma_{ij}$  определяется законом Гука для однородного и изотропного материала:

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda e_{kk} \delta_{ij}; \quad (10)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (11)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\lambda$ ,  $\mu$  – постоянные Ламэ. Возникающие в результате смещений элементов среды механические напряжения приводят к накоплению микрповреждений, что может вызвать образование макроскопической трещины. Образование трещины в материале определяется с помощью интеграла повреждений [4]:

$$K = \int_{t_c}^t \theta(\sigma(t) - \sigma_c) \cdot [\sigma(t) - \sigma_c]^n dt, \quad (12)$$

где  $\theta$  – ступенчатая функция,  $\sigma(t)$  – мгновенное значение локального напряжения. Локальное разрушение материала может происходить при выполнении условия  $K = K_c$ . Значения параметров разрушения  $K_c$ ,  $\sigma_0$  и  $n$  выбираются из сопоставления результатов экспериментов и моделирования. Постоянная  $K_c$  характеризует динамическую прочность материала. Характер формирования трещин существенно зависит от наличия микронеоднородностей и дефектов в материале, как существующих до нагружения, так и появляющихся в процессе деформации. В рамках

макроскопического подхода явное рассмотрение микроповреждений невозможно. В настоящей модели для описания влияния микронеоднородностей на рост стохастически изгибающихся и ветвящихся трещин вводится вероятностная функция образования трещины. Плотность вероятности  $\omega_{cr}$  роста трещины принимается прямо пропорциональной интегралу повреждений  $K$ , если величина  $K$  превосходит некоторое критическое значение:

$$\omega_{cr} = \beta \theta(K - K_c) \cdot K, \quad (13)$$

где  $\beta$  – коэффициент вероятности образования трещины.

Взаимосогласованное решение системы уравнений, описывающих работу генератора, динамику канала и деформацию твердого диэлектрика, обеспечивается с помощью граничных условий. Для согласованного решения уравнений цепи генератора и уравнения баланса энергий используется предположение о том, что проводимость канала пропорциональна внутренней энергии канала:

$$G = \chi \cdot W = \eta \frac{PLS}{\gamma_* - 1}. \quad (14)$$

Работа расширения (6) совершается против сил механического давления, действующих на стенку канала со стороны окружающего материала. Для взаимного согласования расширения канала и деформации твердого диэлектрика предполагается, что в каждый момент времени давление внутри канала равно усредненно по боковой поверхности канала механическому давлению со стороны окружающего материала:

$$P = \frac{1}{3} \frac{\int \sigma_{kk} dS}{2\pi r_{ch} l}. \quad (15)$$

### Численная схема

На основе модели был создан трехмерный численный алгоритм и программное обеспечение, позволяющее проводить моделирование распространения упругих волн и образования трещин в твердом материале. Численный алгоритм основан на конечно-разностной аппроксимации уравнений модели по явно-неявной схеме с помощью метода разделения по физическим процессам, с фиксированным временным шагом  $\Delta t$ , индекс  $n$  нумерует шаги по времени. Область моделирования покрывалась равномерной сеткой, узлы которой расположены по схеме гексагональной плотной упаковки. Состояние узла определяется свойствами диэлектрика в элементарном объеме, окружающем данный узел. Моделирование деформации диэлектрика осуществлялось на основе конечно-разностной аппроксимации уравнений (2), (3), (8) – (10). Область моделирования покрывается равномерной гексагональной сеткой состоящей из  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  узлов  $k$  направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно (рис. 2). Выбор гексагональной сетки обусловлен большей ее изотропностью по сравнению с кубической. Состояние узла сетки определяется свойствами элементарного объема, окружающего данный узел. В настоящей схеме элементарный объем для каждого узла представляет собой ромбоэдрический додекаэдр, грани которого представляют собой одинаковые ромбы площадью  $S_{ff}$ . В настоящей модели предполагается, что изменение формы и размеров элементарного объема незначительны и площадь грани  $S_{ff}$  остается постоянной в процессе деформирования материала.

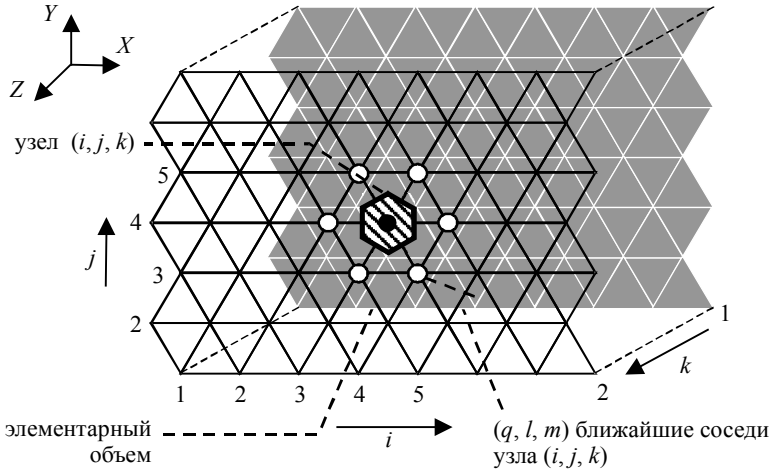


Рис. 2. Пространственная решетка

Каждый узел характеризуется плотностью вещества  $\rho_{ijk}$ . В каждый момент времени состояние узла решетки определяется проекциями вектора смещениями от положения равновесия  $u^n_{x,ijk}$ ,  $u^n_{y,ijk}$ ,  $u^n_{z,ijk}$  и вектора скорости  $v^n_{x,ijk}$ ,  $v^n_{y,ijk}$ ,  $v^n_{z,ijk}$ , на оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , соответственно. Каждая связь, соединяющая узлы  $(i,j,k)$   $(l,p,q)$ , характеризуется следующими параметрами: жесткостью  $Y_{ijk\ lpq}$ , критическим напряжением  $\sigma^c_{ijk\ lpq}$ , коэффициентом вероятности формирования трещины  $\beta_{ijk\ lpq}$ , критическим значением интеграла повреждений  $K^c_{ijk\ lpq}$ . Состояние связи между узлами  $(i,j,k)$  и  $(l,p,q)$  описывается длиной  $d^n_{ijk\ lpq}$  и параметром состояния связи  $\delta^n_{ijk\ lpq}$ ,  $\delta^n_{ijk\ lpq} = 1$ , если связь не разорвана, и  $\delta^n_{ijk\ lpq} = 0$ , если разорвана. Состояние связи может быть изменено только со значения 1 на значение 0, восстановление связи не рассматривается. Изменение состояния связи происходит, если случайное число с равномерным распределением на отрезке  $[0...1]$  окажется меньше, чем вероятность, рассчитанная по конечно-разностной аппроксимации уравнения (13), и не происходит в противном случае. Взаимодействие узлов решетки, связь между которыми разорвана, рассматривается только для случая сжатия  $d^n_{ijk\ lpq} \leq \Delta h$ .

В каждый момент времени состояние генератора определяется значениями токов через основную емкость генератора  $I_C^n$ , через паразитную емкость  $I_S^n$ , через разрядный промежуток  $I_D^n$  и падениями напряжений на емкости, сопротивлении, индуктивности и разрядном промежутке  $U_C^n$ ,  $U_L^n$ ,  $U_R^n$ ,  $U_D^n$  соответственно, а также сопротивлением генератора  $R^n$  и проводимостью разрядного промежутка  $G^n$ .

Изменение тока и падений напряжений в цепи генератора рассчитывается на основе конечно-разностной аппроксимации уравнений (1) – (3):

$$R^n = R_0 + (R_1 - R_0)e^{-n\Delta t/\theta_R}; \quad (16)$$

$$R^n C \frac{U_C^{n+1} - U_C^n}{\Delta t} + CL \frac{U_C^{n+1} - 2U_C^n + U_C^{n-1}}{\Delta t^2} + U_D^n = U_C^{n+1}; \quad (17)$$

$$I^{n+1} = C \frac{U_C^{n+1} - U_C^n}{\Delta t}; \quad (18)$$

$$I^{n+1} = I_D^{n+1} + C_s \frac{U_D^{n+1} - U_D^n}{\Delta t}; \quad (19)$$

$$I_D^{n+1} = G^{n+1} U_D^{n+1}. \quad (20)$$

Разрядный канал представляется в виде цилиндрической полости, соединенной с ближайшими узлами связями, перпендикулярными стенке канала. Моделирование расширения канала пробоя осуществлялось на основе конечно-разностной аппроксимации уравнения (8):

$$\frac{1}{\gamma_* - 1} (r_{ch}^n)^2 \frac{P^{n+1} - P^n}{\Delta t} + 2P^n r_{ch}^n \frac{\gamma_*}{\gamma_* - 1} \frac{r_{ch}^{n+1} - r_{ch}^n}{\Delta t} + \xi \frac{1}{\gamma_* - 1} (r_{ch}^n)^2 P^n = \frac{I_D^{n+1} U_D^{n+1}}{\pi l}, \quad (21)$$

где  $P^{n+1}$ ,  $r_{ch}^{n+1}$  – давление и радиус разрядного канала на  $n+1$  шаге.

На каждом временном шаге равнодействующая сила, действующая на узел  $(i, j, k)$ , рассчитывается следующим образом:

$$F_{ijk}^n = S_{fr} \sum_{lpq}^{N_{nei}} Y_{ijk lpq} \frac{d_{ijk lpq}^n - \Delta h}{\Delta h}, \quad (22)$$

где  $(l, p, q)$  – номера соседних узлов,  $N_{nei}$  – количество соседних узлов. Скорость и смещение узла определяются из следующих соотношений:

$$v_{ijk}^n = \frac{F_{ijk}^n}{\rho_{ijk} \cdot V} \cdot \Delta t; \quad (23)$$

$$u_{ijk}^n = v_{ijk}^n \cdot \Delta t. \quad (24)$$

Вероятность изменения значения  $\delta_{ijk lpq}^n$  с 1 на 0 зависит от механического напряжения связи и рассчитывается следующим образом:

$$\Omega_{ijk lpq}^{n+1} = 1 - e^{-\beta_{jk lpq} (K_{ijk lpq}^n) \Delta t \theta(\sigma_{ijk lpq}^n - \sigma_{jk lpq}^c) \theta(d_{ijk lpq}^n - \Delta h)}; \quad (25)$$

$$\sigma_{ijk lpq}^n = Y_{ijk lpq} \frac{d_{ijk lpq}^n - \Delta h}{\Delta h}; \quad (26)$$

$$K_{ijk lpq}^n = \sum_{m=0}^n \theta(\sigma_{ijk lpq}^m - \sigma_{ijk lpq}^c) \cdot (\sigma_{ijk lpq}^m - \sigma_{ijk lpq}^c)^2 \cdot \Delta t. \quad (27)$$

В используемом алгоритме предполагается, что рост трещин возможен только от канала или с концов уже существующих трещин.

На каждом временном шаге расчеты производятся в несколько этапов. На первом этапе из выражения (16) вычисляется сопротивление  $R^{n+1}$ , затем при известном напряжении  $U_D^n$  на разрядном промежутке из уравнения (17) рассчитывается напряжение  $U_C^{n+1}$  на емкости генератора и из уравнения (18) определяется ток  $I^{n+1}$  через генератор. На втором этапе из уравнений (19), (20) определяется напряжение  $U_D^{n+1}$ . На третьем этапе рассчитываются радиус канала  $r_{ch}^{n+1}$ , давление в канале  $P^{n+1}$ , ток через разрядный промежуток  $I_D^{n+1}$ , проводимость канала пробоя  $G^{n+1}$  и сила давления канала на соседние к нему узлы решетки из совместного решения уравнений (19) – (21) с граничными условиями:

$$G^{n+1} = \frac{P^{n+1} \pi (r_{ch}^{n+1})^2 l}{\gamma_* - 1}; \quad (28)$$

$$P^{n+1} = \frac{F_{el}^n}{2\pi r_{ch}^{n+1} l}, \quad (29)$$

$$F_{el}^n = -S_{fr} \bar{Y} \sum_{i=1}^{N_{eq}^{ch}} \frac{(\bar{d}_i^{n+1} - r_{ch}^{n+1}) - (\Delta h - r_{ch}^0)}{\Delta h - r_{ch}^0}, \quad (30)$$

где  $r_{ch}^0$  – начальный радиус канала,  $d_i^{n+1}$  и  $Y$  длина и модуль Юнга связи, соединяющей стенку канала с соседним узлом решетки. Суммирование в правой части выражения (22) ведется по всем узлам, соседним к каналу (расположенным на расстоянии  $\leq \Delta h$ ). На четвертом этапе определяются смещения и механические напряжения в материале с помощью уравнений (22) – (24). На шестом этапе рассчитываются вероятности разрушения связей и происходит присоединение новых элементов к структуре трещин согласно выражениям (25) – (27).

### Результаты моделирования

Моделирование расширения канала, распространения упругих волн и последующего разрушения проводилось для прямоугольного образца размерами  $42 \times 20 \times 10$  мм. На боковых и нижней границах области моделирования граничные условия выбраны так, чтобы минимизировать отражения упругих волн. Уменьшение отражение упругих волн от границ образца реализовано введением искусственной вязкости для 3 – 5 дополнительных граничных слоев.

Верхняя граница области моделирования является свободной. Источником ударных волн являлся разрядный канал длиной 20 мм, расположенный на глубине 4,3 мм от свободной поверхности образца. Параметры моделирования были выбраны следующие:  $C = 20$  нФ,  $L = 5$  мкГн,  $C_s = 2$  нФ,  $R_0 = 1$  МОм,  $R_1 = 2$  Ом,  $\theta_R = 5$  нс,  $\psi = 3 \cdot 10^{-6}$  См/Дж,  $\eta = 10^6$  с<sup>-1</sup>,  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu = 0$ , начальное напряжение на емкости генератора  $U_C(0) = 300$  кВ. Параметры разрушения диэлектрика имели следующие значения:  $\sigma_0 = 8 \cdot 10^6$  Па,  $K_c = 8 \cdot 10^{10}$  Па<sup>2</sup>·с,  $\beta = 0,1$  с/Па<sup>2</sup>.

После уменьшения сопротивления  $R$  генератора в канале пробоя начинается интенсивное энерговыделение, приводящее к росту проводимости и тока (рис. 3, а). Увеличение энергии в канале приводит к росту давления и его быстрому расширению (рис. 3, б). Быстрое расширение разрядного канала приводит к появлению области сжимающих напряжений, которая начинает распространяться от канала в окружающий материал. Увеличение радиуса приводит к уменьшению давления в канале и, как следствие, к уменьшению скорости его расширения и через некоторое время к остановке (рис. 3, в). После падения давления в цепи генератора начинаются затухающие колебания, в процессе которых разрядный промежуток играет роль нелинейного сопротивления (рис. 3, 4). При выбранных параметрах моделирования период колебаний составил 2 мкс, логарифмический декремент затухания составил 0,51. Колебания тока и напряжения на разрядном промежутке приводят к колебаниям энергии и мощности джоулевого энерговыделения в канале пробоя. Энергия, выделившаяся в канале равна 248 Дж, что составляет 28 % от энергии, запасенной в конденсаторе генератора. В течение первого полупериода тока выделяется 43 % энергии от полной энергии, выделившейся в канале. Благодаря резкому расширению канала пробоя в течение первой микросекунды в окрестности канала образуется область сжатия (рис. 5, а). После установления постоянного значения радиуса канала, позади области сжатия образуется область растягивающих напряжений, которые вместе формируют упругую волну. Средняя скорость упругой волны составила 2500 м/с.

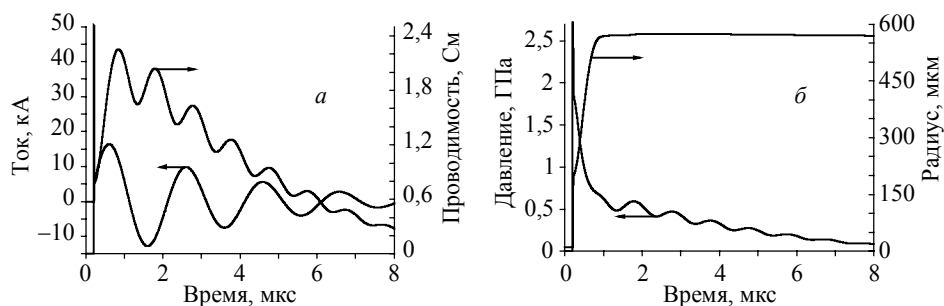


Рис. 3. Временные зависимости: *а* – тока через канал пробоя и проводимости канала, *б* – давления и радиуса канала пробоя

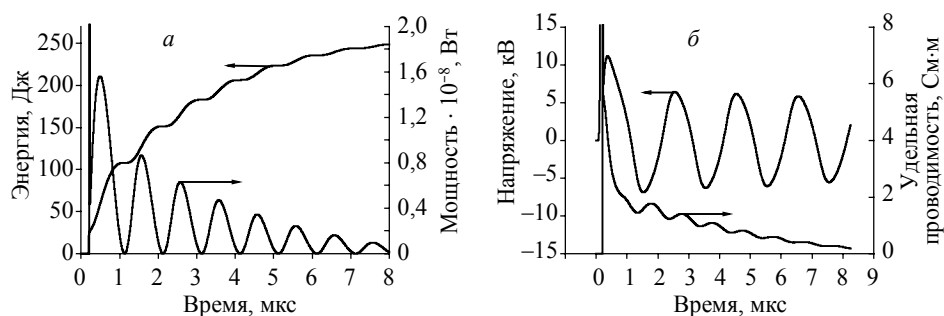


Рис. 4. Временные зависимости: *а* – энергии и мощности джоулева тепла в канале, *б* – напряжения на разрядном промежутке и удельной проводимости канала пробоя

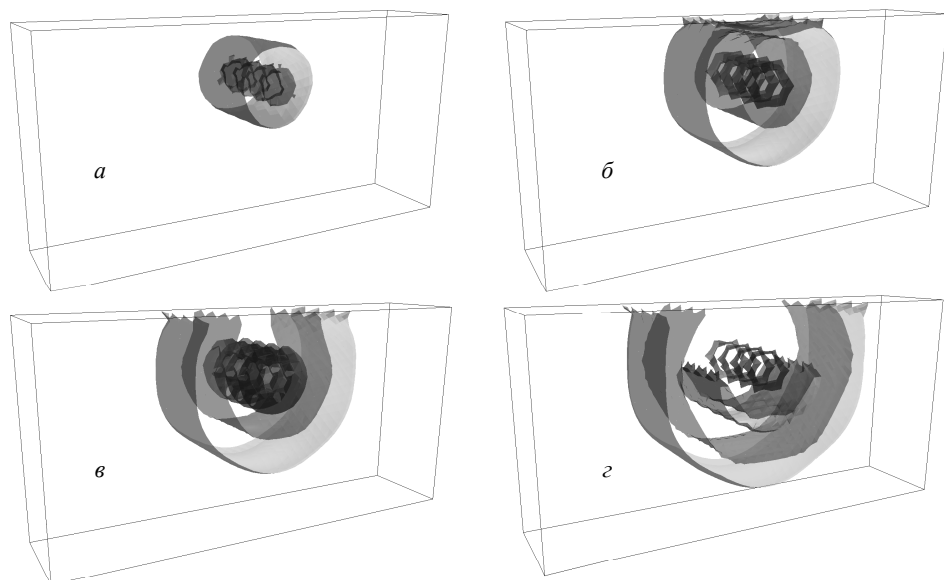


Рис. 5. Распространение упругой волны: *а* – 900 нс, *б* – 1700 нс, *в* – 2000 нс, *г* – 2500 нс. Серым цветом представлена изоповерхность механического давления, соответствующая значению 2 МПа

Зарождение трещин происходит в окрестности разрядного канала. Рост трещин происходит в основном с концов уже существующих трещин. После достижения ударной волной свободной поверхности, отраженная волна интерферирует с волной, распространяющейся от канала, что приводит к усилению растягивающих напряжений и, как следствие, к более интенсивному формированию трещин между каналом и свободной поверхностью. Средняя скорость развития трещин составила 1500 м/с. Картина распространения структуры трещин представлена на рис. 6. На форму трещин существенно влияют механические свойства материала, положение канала по отношению к свободной поверхности, проводимость плазмы в канале и параметры генератора.

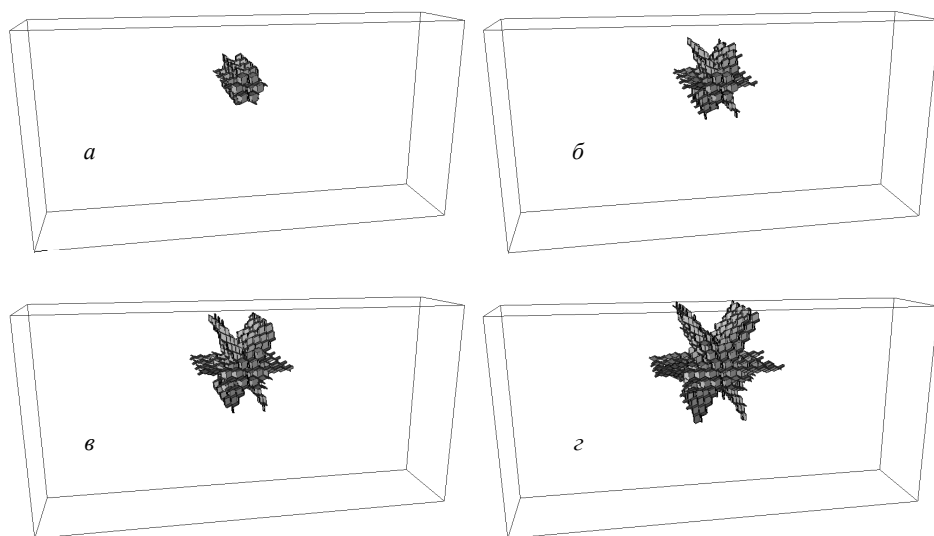


Рис. 6. Формирование структуры трещин:  
а – 1800 нс, б – 2950 нс, в – 3750 нс, г – 5000 нс

### Заключение

Представленная модель самосогласованно описывает работу генератора импульсных напряжений, расширение канала пробоя, распространение упругих волн в твердом диэлектрике, образование и рост трещин. На основе модели создан трехмерный численный алгоритм и программное обеспечение позволяющее проводить моделирование распространения упругих волн и образования трещин в твердом материале. Проведено моделирование разрушения твердого диэлектрика расширяющимся разрядным каналом. Показано, что в области между разрядным каналом и свободной поверхностью образца формируется откольная воронка.

Полученные токовые и полевые характеристики канала пробоя, а также характеристики упругой волны и структуры трещин согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность модели и возможность ее практического применения. Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать развитие трещин и варьировать режим ввода энергии в канал с целью оптимизации разрушения твердого диэлектрика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1995. 276 с.
2. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
3. Носков М.Д. Формирование Лапласовских структур в неравновесных условиях. Северск: Изд-во СГТИ, 2005. 220 с.
4. Глушак Б.Н., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 236 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

**УСМАНОВ Гаяр Закирович**, младший научный сотрудник НИИ высоких напряжений.  
E-mail: gayar@sibmail.com

**ЛОПАТИН Владимир Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, директор НИИ высоких напряжений. E-mail: lopatin@hvd.tpu.ru

**НОСКОВ Михаил Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник НИИ высоких напряжений. E-mail: nmd@ssti.ru

**ЧЕГЛОКОВ Алексей Александрович**, научный сотрудник НИИ высоких напряжений.  
E-mail: cheglok@ssti.ru

Статья принята в печать 16.01.2009 г.