

УДК 537.529+534.222.2

## ОБРАЗОВАНИЕ ОТКОЛЬНОЙ КАВЕРНЫ ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

В. В. Буркин, Н. С. Кузнецова, В. В. Лопатин

Научно-исследовательский институт высоких напряжений  
Томского политехнического университета, 634050 Томск  
E-mail: tevn@hvd.tpu.ru

Проведен анализ волновой динамики напряженно-деформированного состояния твердого диэлектрика при электровзрыве вблизи его поверхности. Создана количественная модель электровзрыва, описывающая работу высоковольтного генератора, расширение разрядного канала, генерацию и распространение ударно-волновых возмущений. Рассмотрены два механизма образования откольной каверны на поверхности твердого тела: менее энергоемкий, реализующийся с помощью отраженных от поверхности волн, и более энергоемкий, при котором трещины образуются вследствие воздействия прямой волны сжимающих напряжений. Оценено влияние формы поверхности отражения и режима энерговода в канал на характер возможного разрушения.

**Ключевые слова:** электровзрыв, ударно-волновые возмущения, откольная каверна, механические напряжения.

**Введение.** Импульсному пробое твердых, находящихся под слоем жидкости диэлектриков, к поверхностям которых подведены электроды (рис. 1), в определенных условиях присущ “эффект Воробьевых” [1], при котором движущийся разрядный канал внедряется в твердый диэлектрический [2–4]. Внедрение канала в твердый диэлектрический или полупроводниковый материал определяется электропроводностями и полярностями жидкости и твердого тела, соотношением импедансов высоковольтного генератора и разрядного про-

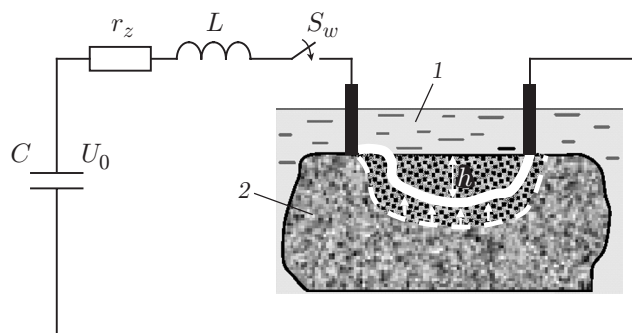


Рис. 1. Схема электроразрядного разрушения твердого диэлектрика:

1 — вода, 2 — твердое тело,  $h$  — глубина внедрения канала,  $C$  — емкость накопителя,  $U_0$  — зарядное напряжение,  $r_z$ ,  $L$  — сопротивление и индуктивность разрядной цепи соответственно,  $S_w$  — коммутатор

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-08-01016-а) и в рамках программы “Развитие научного потенциала высшей школы” (РНП.2.1.1.53.43).

межутка и происходит при высокой скорости роста напряжения, когда время запаздывания пробоя размером порядка нескольких сантиметров составляет менее  $10^{-6}$  с [2, 3]. Импульс напряжения, приложенный к электродам, инициирует рост разрядных каналов с анода преимущественно вдоль поверхности жидкость — твердое тело [3]. На расстоянии от поверхности твердого тела, равном  $0 \div S/4$  ( $S$  — расстояние между электродами) [2], один из каналов внедряется в твердый диэлектрик и за счет большей скорости движения:  $V_s/V_l \approx 1,5 \div 10,0$  ( $V_s, V_l$  — скорости развития разрядных каналов в твердом теле и жидкости соответственно) [5–7] переключает промежуток. Считается, что в оптимальных условиях глубина внедрения канала составляет  $h \approx (1/4 \div 1/3)S$  [2].

Разрушающее действие импульсного разряда в твердых телах (явление электровзрыва), к поверхностям которых подведены электроды, применяется в технологиях бурения скважин [2, 8], удаления поверхностного слоя и резания [9]. Количественные характеристики разрушения, за исключением характеристик предпробивных явлений при внедрении канала в твердое тело, определяются процессом передачи энергии в плазму канала, генерацией расширяющимся каналом ударных волн, волновой динамикой, учитывающей наличие границы твердое тело — жидкость, а также формированием напряженно-деформированного состояния среды, приводящим к трещинообразованию. В отличие от разрушения сквозным каналом пробоя в случае цилиндрической симметрии [10–12] наличие близкорасположенной границы раздела двух сред должно приводить к изменению волновой динамики и соответственно характеристик разрушения приповерхностного слоя материала, а возможно, и механизма откола. Целью настоящей работы является создание количественной двумерной модели формирования откольной каверны внедренным в твердое тело разрядным каналом, а также анализ механизмов разрушения при различных условиях ввода энергии. Создание такой модели актуально при выборе и оптимизации параметров технологических импульсных генераторов.

#### **Физико-математическая модель волновых и деформационных процессов.**

Сформировавшийся на предпробивной стадии разрядный канал диаметром порядка  $5 \div 10$  мкм [13], нагреваемый разрядным током накопителя энергии, расширяется за время  $10^{-6} \div 10^{-4}$  с и генерирует в окружающий материал волну механических напряжений. Вблизи канала волна вырождается в область пластического деформирования и упругую волну, распространяющуюся на периферию. Характер формирования волны при электровзрыве в твердых телах подробно исследован в [11, 12].

При достижении излучаемой каналом волной границы с жидкостью волна частично отражается в твердое тело и преломляется в жидкость. Преломленная в жидкость волна существенно слабее волны, отраженной в твердое тело. Она переносит в жидкость энергию, составляющую менее 1 % энергии, запасенной в накопителе, поэтому при анализе ее можно не учитывать [11]. Это допущение справедливо для системы твердое тело — жидкость, в которой твердое тело характеризуется существенно большими значениями скорости распространения волны по сравнению с жидкостью. При глубине внедрения канала, приближенно равной  $5 \div 10$  мм, отраженная волна, распространяющаяся в твердом теле со скоростью порядка  $4 \div 6$  км/с, преодолевает это расстояние за время  $t < 2,5$  мкс. Волна, преломленная в жидкость (например, в воду), за то же время успевает пройти расстояние менее 4 мм. Учитывая сказанное выше, а также существенное различие акустических импедансов граничащих сред, энергией, переносимой в жидкость в рассматриваемом временном интервале, можно пренебречь в силу ее малости по сравнению с энергией, аккумулированной в твердом теле [14].

Решением поставленной задачи (моделирование откольной каверны при электровзрыве) является двумерная модель, позволяющая проводить компьютерные эксперименты электровзрыва в твердом теле. При электровзрыве отраженная и прямая волны интер-

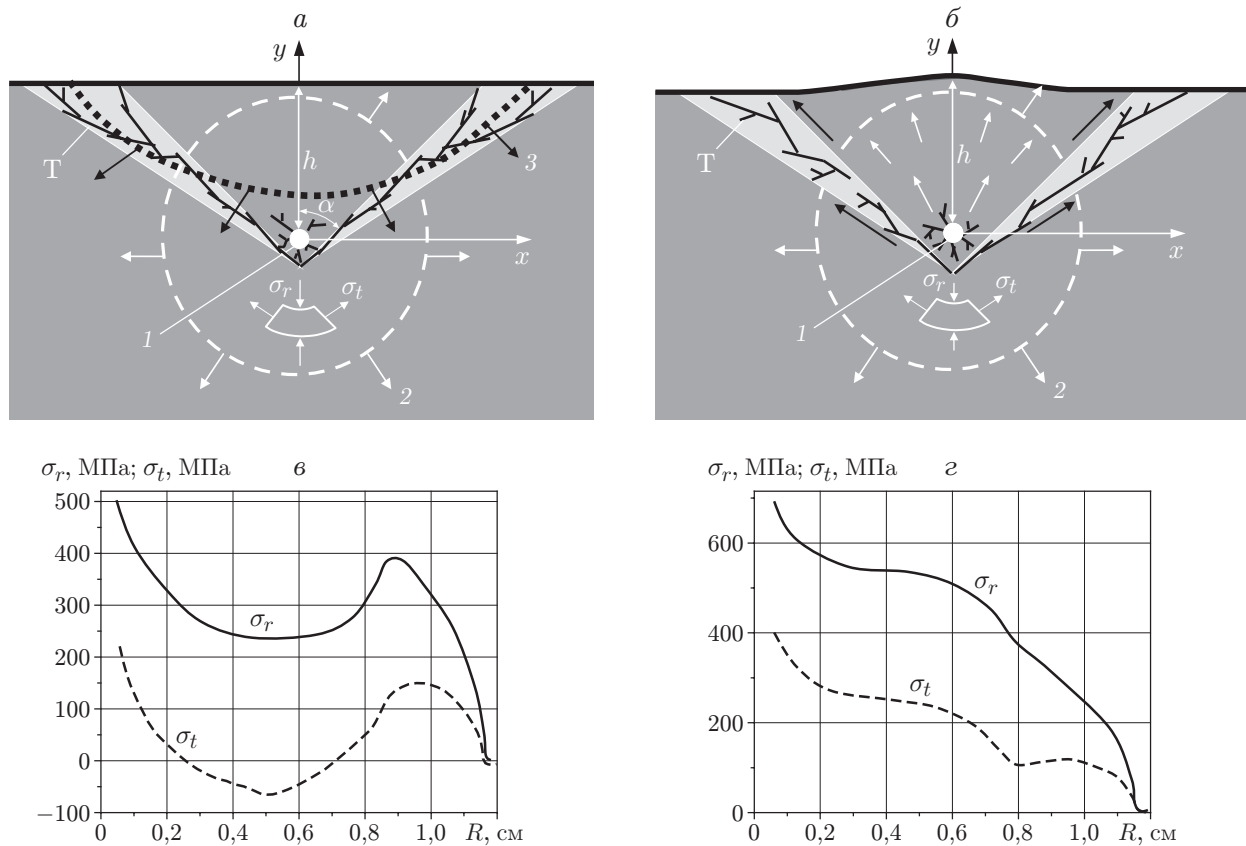


Рис. 2. Поперечные сечения разрядного канала ( $a$ ,  $b$ ) и профили напряжений в волне в сечениях  $\Gamma$  ( $v$ ,  $z$ ) в момент времени  $t = 1,7$  мкс при  $h = 6$  мм:

$a$ ,  $v$  — “быстрый” режим ввода энергии ( $W_g = 118$  Дж,  $T = 0,46$  мкс),  $b$ ,  $z$  — “медленный” режим ввода энергии ( $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс); 1 — канал пробоя, 2 — прямая волна, 3 — волна, отраженная от поверхности,  $\Gamma$  — области наиболее вероятного образования трещин

ферируют. Компьютерные эксперименты показали, что при значениях  $h \approx 5 \div 10$  мм, полученных в физических экспериментах [2], интерференция проявляется в виде анизотропии напряженно-деформированного состояния материала в радиальных сечениях, расположенных вдоль лучей, отклоняющихся от нормали к поверхности на угол, приблизительно равный  $60^\circ$  (сечения  $\Gamma$  на рис. 2,  $a$ ). В этих сечениях растягивающие радиальные напряжения  $\sigma_r$  в отраженной волне суммируются с растягивающими тангенциальными напряжениями  $\sigma_t$  в прямой волне. В результате в окрестности указанных сечений создаются наиболее благоприятные условия для образования радиальных трещин, формирующих откольную каверну в материале (см. рис. 2).

Уравнения модели электровзрыва включают соотношения для расчета электротехнических параметров, энерговыделения в плазменном канале и волновой динамики в твердом диэлектрике.

Уравнения Кирхгофа

$$L \frac{di}{dt} + (r_z + R_{ch})i = U, \quad \frac{dU}{dt} = -\frac{i}{C} \quad (1)$$

с начальными условиями  $i(0) = 0$ ,  $U(0) = U_0$ , где  $U_0$  — зарядное напряжение, позволяют

рассчитать силу тока в цепи  $i(t)$ , сопротивление канала  $R_{ch}(t)$  и динамику энерговыделения в канале  $W_{ch}(t)$ :

$$W_{ch}(t) = \int_0^t i^2(t) R_{ch}(t) dt. \quad (2)$$

Сопротивление канала пробоя определялось через интеграл действия тока по соотношению [15]

$$R_{ch}(t) = Kl_{ch} / \left( \int_0^t i^2(t) dt \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент, характеризующий диэлектрик [16].

Согласно [17] в декартовой системе координат с осью ординат, перпендикулярной поверхности отражения, и осью абсцисс, параллельной приповерхностному слою и перпендикулярной оси канала, задача плоской деформации упругопластического материала включает:

— уравнения движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} &= \rho \ddot{x}, & \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} &= \rho \ddot{y}, \\ \sigma_{xx} &= S_{xx} - P, & \sigma_{yy} &= S_{yy} - P, & \sigma_{zz} &= S_{zz} - P; \end{aligned} \quad (4)$$

— уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \quad V = \frac{\rho_0}{\rho}; \quad (5)$$

— уравнение внутренней энергии среды

$$\dot{e} = -P\dot{V} + V(S_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + T_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}); \quad (6)$$

— соотношения для компонент девиатора напряжений  $S_{ij}$  и скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{xx} &= 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right), & \dot{S}_{yy} &= 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right), & \dot{S}_{zz} &= -\frac{2}{3} \mu \frac{\dot{V}}{V}, & \dot{T}_{xy} &= \mu \dot{\epsilon}_{xy}, \\ \dot{\epsilon}_{xx} &= \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}, & \dot{\epsilon}_{yy} &= \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, & \dot{\epsilon}_{xy} &= \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial y}; \end{aligned} \quad (7)$$

— условие текучести Мизеса

$$S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2T_{xy}^2 \leq 2Y^2/3. \quad (8)$$

В (4)–(8)  $x, y$  — декартовы координаты;  $\dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$  — скорости и ускорения в направлении соответствующих осей;  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$  — полные напряжения, действующие на площадках, перпендикулярных осям  $OX$  и  $OY$  соответственно;  $\sigma_{zz}$  — полное напряжение, действующее на площадках, перпендикулярных оси канала;  $T_{xy}$  — касательное напряжение;  $P$  — давление;  $e$  — внутренняя энергия единицы массы;  $V$  — относительный объем;  $\rho_0, \rho$  — начальная и текущая плотности;  $\mu, Y$  — модуль сдвига и предел текучести материала; точка означает дифференцирование по времени.

Начальными условиями для материала служило состояние невозмущенной среды:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0, & \sigma_{xx}(x, y) &= 0, & \sigma_{yy}(x, y) &= 0, & \sigma_{zz}(x, y) &= 0, \\ T_{xy}(x, y) &= 0, & \rho &= \rho_0, & e(x, y) &= 0. \end{aligned}$$

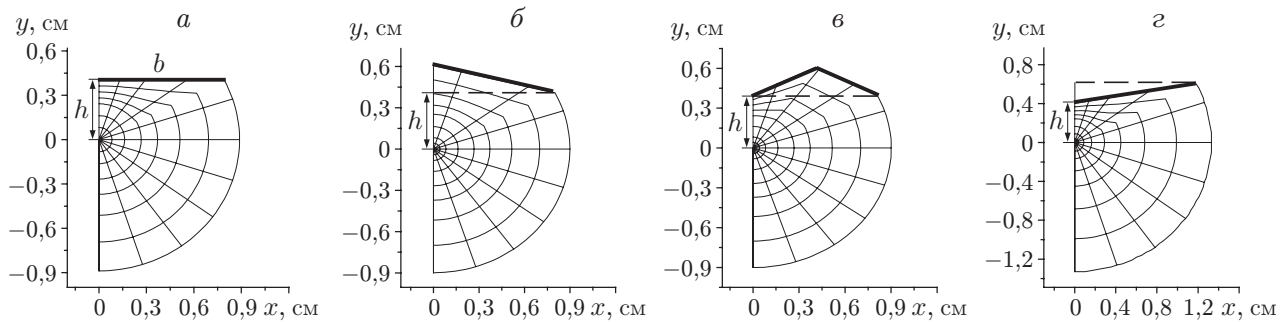


Рис. 3. Формы расчетных областей

Граничным условием на стенке канала являлась зависимость  $P_{ch}(t)$ , которая так же, как и в [11], определялась из уравнения энергоданса разрядного канала

$$\frac{dW_{ch}}{dt} = \frac{dA_{ch}}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(P_{ch}V_{ch})}{dt}, \quad (9)$$

где  $dA_{ch} = P_{ch} dV_{ch}$  — приращение работы, совершаемой расширяющимся каналом при изменении его объема  $V_{ch} = \pi r_{ch}(t)^2 l_{ch}$  под действием давления внутри канала  $P_{ch}$ ;  $r_{ch}(t)$  — радиус канала;  $W_{pl} = P_{ch}V_{ch}/(\gamma - 1)$  — энергия плазмы, расширяющейся в адиабатическом приближении (значение показателя  $\gamma$  выбиралось равным 1,1). Поверхность  $y = h$  считалась свободной:  $\sigma_{yy} = 0$ .

Давление в волне рассчитывалось с использованием баротропной зависимости [18]

$$P = \rho_0 c_l^2 (\rho/\rho_0 - 1) (\rho/\rho_0)^n. \quad (10)$$

При  $\rho_0 = 2,67 \text{ г/см}^3$ ,  $c_l = 5850 \text{ м/с}$ ,  $n = 2$ ,  $\mu = 31,6 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ,  $Y = 0,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$  соотношения (1)–(7) описывают сжимаемость, упругий и пластический режимы деформирования материала, близкого по свойствам к граниту.

Решение задачи проводилось численно. Электротехнические уравнения интегрировались неявным методом Эйлера. Система динамических уравнений (1)–(10) решалась с использованием разностной схемы [17] на двумерной расчетной сетке, различные формы которой приведены на рис. 3 ( $b$  — полуширина поверхности отражения). Ось ординат являлась осью симметрии канала. Отклонения канала в приэлектродных областях от положения, параллельного поверхности отражения, не учитывались. В окрестности канала с координатами его оси  $x = 0$ ,  $y = 0$  форма расчетных ячеек максимально соответствовала цилиндрической форме канала. Вблизи поверхности  $y \approx h$  форма ячеек адаптирована для описания отражения волны от поверхности соответствующей формы. Выбранные параметры расчетной сетки удовлетворяли следующим условиям:  $b \geq 2h$ , количество лучей в угле раствора  $J = 80 \div 100$ , количество расчетных узлов в радиальном направлении  $M = h/r_{ch0} = 800 \div 100$ , начальный радиус канала  $r_{ch0} = 5 \text{ мкм}$ . Выполнение этих условий позволяло при расчете сохранять дисбаланс между работой, совершаемой каналом, и энергией волны порядка 3 %. Тестирование численного решения проводилось на одномерном варианте расчетной сетки ( $b = 0$ ) путем сравнения с аналитическим решением задачи о расширении цилиндрического поршня в воде с постоянной скоростью [19] в предположении автомодельности течения [20]. Для анализа напряженно-деформированного состояния в сечениях Т использовались значения главных радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_t$  напряжений, определяемых в соответствии с [17].

Разработанная модель применялась для анализа механизма образования откольной каверны при заглубленном электровзрыве в граните со следующими механическими харак-

теристиками:  $\sigma_p = 7,85$  МПа,  $\sigma_c = 9,81$  МПа (предельные напряжения на разрыв и сдвиг соответственно [21]), среднее значение искровой постоянной  $K_{mid} = 611 \text{ В} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-1}$  [16]. Длина канала составляла  $l_{ch} = 2$  см,  $h = 4 \div 8$  мм. Параметры разрядной цепи варьировались в следующих пределах:  $U_0 = 250 \div 350$  кВ,  $C = 3 \div 20$  нФ,  $L = 5 \div 25$  мкГн,  $r_z = 1$  Ом, что соответствует режимам электроразрядных технологий [2] с генератором импульсов, собранным по схеме Маркса. Использование в дальнейшем анализе значений критериев прочности, полученных в статических условиях, позволяет качественно оценить условия возникновения трещин. Для более детального исследования механизмов разрушения материала при формировании откольной каверны необходимо использовать динамические закономерности изменения этих величин [22].

**Формирование откольной каверны.** Результаты моделирования показали, что в зависимости от количества энергии, скорости ее ввода в канал и глубины внедрения канала  $h$  могут реализовываться различные сценарии волновой динамики и соответственно различные механизмы разрушения материала. Возможные варианты взаимодействия волны с поверхностью отражения приведены на рис. 2. Профиль волны, представленный на рис. 2, в, формируется в режиме быстрого ввода энергии в канал низкоиндуктивным генератором, когда полупериод колебаний разрядного тока  $T \approx \pi\sqrt{LC} < 1$  мкс. При этом вблизи канала разряда (на расстоянии  $R = \sqrt{x^2 + y^2} \approx 1 \div 2$  мм) возникают большие сжимающие напряжения, образующие область раздавливания материала. В этой области происходит измельчение твердого диэлектрика под действием сжимающих напряжений. В области  $R \geq 2$  мм тангенциальные  $\sigma_t$  напряжения становятся растягивающими. По мере распространения волны радиус области растягивающих напряжений увеличивается, а напряжения  $\sigma_t$  в волне усиливаются при ее отражении. Отраженная волна интерферирует с прямой волной, в результате суперпозиции напряжения в ней суммируются, а область растягивающих напряжений, превышающих предел прочности материала на разрыв, занимает все большую часть материала. Наиболее интенсивно это взаимодействие проявляется в радиальных сечениях Т (см. рис. 2, а) с углом раствора  $\alpha \approx 100 \div 140^\circ$ , где реализуются наиболее благоприятные условия для формирования трещин за счет результирующих растягивающих напряжений. Для анализа этого варианта развития процесса применялся критерий разрушения  $\sigma = \sigma_p$ .

При относительно медленном вводе энергии в канал ( $T > 1$  мкс) к моменту выхода волны на свободную поверхность область растягивающих тангенциальных напряжений не успевает сформироваться. В рассматриваемом временном интервале напряжения в волне остаются сжимающими. Реакция материала, находящегося над каналом, на воздействия такого типа проявляется в перемещении части материала в направлении поверхности. В сечениях Т, разграничивающих перемещаемую часть и неподвижный массив материала и расположенных под углом  $\alpha$  к оси ординат (см. рис. 2, б), возникают деформации сдвига. При достижении деформациями критических значений в этих сечениях возникают трещины и происходит вынос участка материала, находящегося над каналом, в направлении свободной поверхности. В результате образуется откольная каверна. При этом материал разрушается за счет деформаций сдвига, вызванных наибольшими касательными напряжениями в прямой волне. Роль отраженных волн в данном случае второстепенна. На рис. 4 приведены расчетные значения деформаций сдвига  $\varepsilon_{xy}$  в элементах среды, расположенных в различных сечениях. Сравнение полученных распределений  $\varepsilon_{xy}$  показывает, что наибольшие значения  $\varepsilon_{xy}$  достигаются в сечениях, расположенных вдоль радиуса под углами к оси  $OY$   $\alpha \approx 40 \div 50^\circ$ . Следовательно, при медленном вводе энергии именно в этих сечениях происходит образование трещин, соединяющих область раздавливания материала вблизи канала с поверхностью.

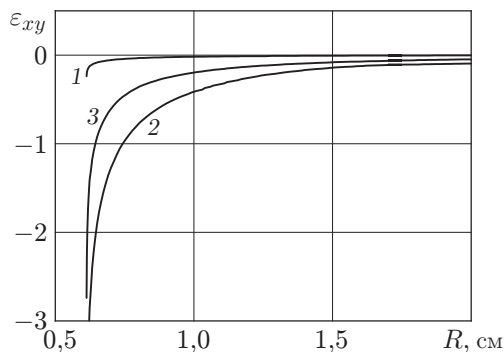


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость деформаций сдвига от расстояния  $R$  ( $t = 1,7$  мкс,  $h = 6$  мм,  $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс) в сечениях, соответствующих различным значениям угла  $\alpha$ :

1 —  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 40^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 70^\circ$

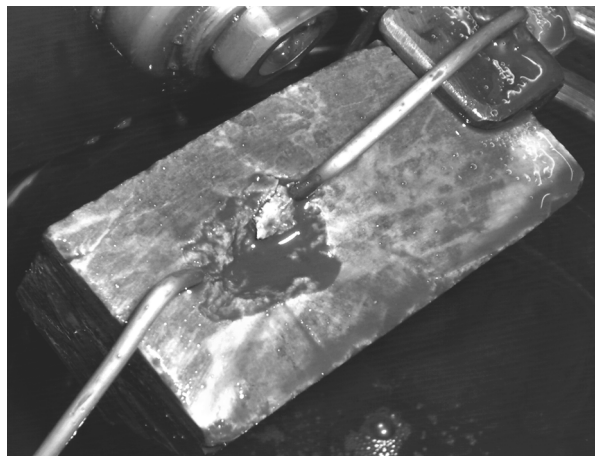


Рис. 5

Рис. 5. Откольная каверна, полученная при электровзрыве в песчанике

В обоих рассмотренных случаях, несмотря на различия механизмов разрушения, прогнозируемые поперечные размеры каверн различаются незначительно. Отметим, что и в физических экспериментах при  $T \geq 1$  мкс разрушение чаще происходит в виде отколов одного или нескольких фрагментов, форма которых аналогична форме откола, представленного на рис. 5.

Оптимизация режима ввода энергии в канал позволяет улучшить энергетические показатели разрушения материала при электровзрыве в нем. Для сравнения энергоемкостей разрушения при двух режимах энерговода в канал (см. рис. 2, а, б) рассчитаны объем каверны  $V_c$ , формирующейся при электровзрыве, и удельная энергия разрушения  $W_{sc} = W_g/V_c$  ( $W_g$  — энергия, запасаемая в генераторе). Откольная каверна аппроксимировалась треугольной призмой длиной  $l_{ch}$ , в основаниях которой лежат сечения  $T$ , образованные плоскостями наиболее вероятного образования трещин (см. рис. 2). Результаты расчетов для двух режимов ввода энергии: “быстрого” ( $W_g = 118$  Дж,  $T = 0,46$  мкс) и “медленного” ( $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс) позволили оценить объем образовавшейся каверны:  $V_c \approx 0,94$  см<sup>3</sup>. В обоих случаях глубина внедрения канала  $h = 6$  мм, а глубина каверны полагалась равной 8 мм, так как в объем разрушения вовлекается зона раздавливания материала вблизи канала разряда. При “быстром” режиме разряда удельная энергия разрушения составила  $W_s \approx 125$  Дж/см<sup>3</sup>, при “медленном”  $W_{sc} \approx 625$  Дж/см<sup>3</sup>. Выполненные оценки показывают, что “быстрые” режимы энерговода в канал позволяют минимизировать затраты энергии на разрушение. Меньшая энергоемкость “быстрых” режимов разряда, обеспечивающих большую мощность введенной энергии, обусловлена разрушением материала за счет растягивающих напряжений, предельные значения которых меньше, чем при сдвиге ( $\sigma_p < \sigma_c$ ).

Другим важным эффектом быстрого ввода энергии в канал является бóльший коэффициент преобразования энергии генератора в энергию волны [11]. Анализ энергетических параметров показывает, что в рассматриваемом диапазоне значений  $C$  и  $L$  к моменту начала отражения волны расходуется лишь часть энергии накопителя. На рис. 6, 7 пока-

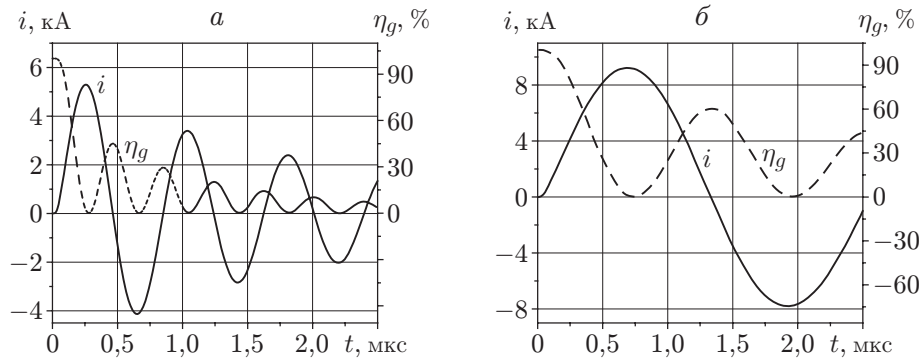


Рис. 6. Зависимости силы тока  $i$  и относительного расхода энергии генерирующей емкости  $\eta_g$  от времени:

$a$  — “быстрый” режим ввода энергии ( $W_g = 118$  Дж,  $T = 0,46$  мкс);  $b$  — “медленный” режим ввода энергии ( $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс)

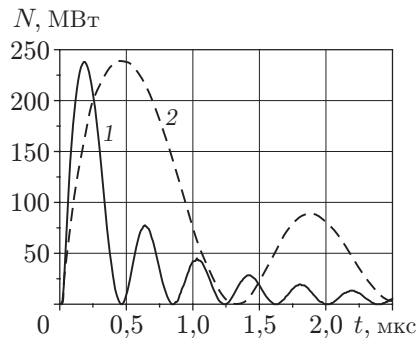


Рис. 7. Зависимость мощности энерговода в канал  $N$  от времени:

1 — “быстрый” режим ввода энергии ( $W_g = 118$  Дж,  $T = 0,46$  мкс); 2 — “медленный” режим ввода энергии ( $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс)

заны изменение силы тока в цепи, относительный расход энергии генерирующей емкости  $\eta_g = CU^2(t)/(CU_0^2)$  и мощность энерговыделения в канале для рассматриваемых режимов разряда. Результаты сравнения временных диаграмм тока и энергетических характеристик процесса показывают, что к моменту выхода волны на поверхность в зависимости от параметров цепи и величины заглубления канала расходуется энергия, составляющая от 30 до 90 % энергии накопителя. При “быстром” режиме разряда расход энергии генератора интенсивнее, и, следовательно, большая часть его энергии преобразуется в механическую энергию волны за меньшее время. При медленном вводе энергии в канал большая часть энергии генератора расходуется уже после достижения условий разрушения материала, т. е. неэффективно.

Характер волновой картины в приповерхностной области диэлектрика зависит не только от параметров распространяющейся волны в момент ее выхода на поверхность, но и от формы поверхности отражения, которая в реальных условиях имеет шероховатости и неровности. В проведенных расчетах рассматривались четыре варианта форм поверхности (см. рис. 3). В силу симметрии на рис. 3 приведены только правые сегменты расчетных областей. Характерные размеры “неровностей” поверхности не превышали  $h/2$ . Соответствующие эпюры напряжений в сечениях, расположенных вдоль радиуса под углами  $\alpha = 40 \div 50^\circ$  (области Т на рис. 2), приведены на рис. 8. В результате расчетов, проведенных с использованием схем, представленных на рис. 3, б–г, установлено, что



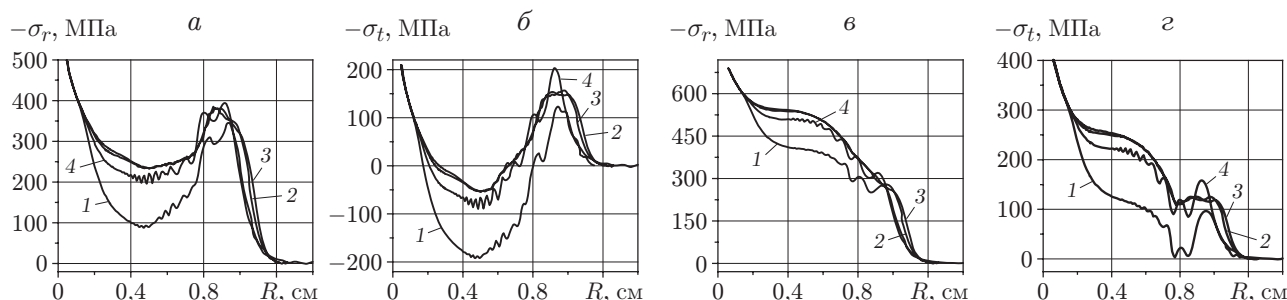


Рис. 8. Эпюры главных радиальных  $\sigma_r$  (а, в) и тангенциальных  $\sigma_t$  (б, г) напряжений при  $t = 1,7$  мкс:

а, б —  $W_g = 118$  Дж,  $T = 0,46$  мкс; в, г —  $W_g = 588$  Дж,  $T = 1,33$  мкс; 1–4 — кривые, соответствующие формам поверхностей отражения на рис. 3, а–г

волновая динамика имеет один и тот же характер, который существенно отличается от характера волновой динамики, полученной в расчетах по схеме, приведенной на рис. 3, а. Отметим, что при малой скорости ввода энергии в канал (см. рис. 8, в, г) механизм образования каверны реализуется при значительном избытке энергии в волне и практически не зависит от формы поверхности отражения. При “быстрых” режимах энергосвода в канал значения растягивающих тангенциальных напряжений и размеры соответствующих областей зависят от формы поверхности отражения. Это означает, что объем образующейся каверны зависит также от условий отражения волны от поверхности.

В заключение отметим, что оба рассмотренных механизма приводят к образованию откольной каверны, форма которой близка к форме каверны, показанной на рис. 5. При этом выявленные механизмы образования откольной каверны подобны механизмам процессов, протекающих при высокоскоростном ударе о преграду [23]. В случае если толщина преграды достаточно велика, в ней происходит волновой процесс, результатом которого является классический вариант откола, вызванного растягивающими напряжениями. При взаимодействии ударника с тонкой преградой образование отверстия в ней обусловлено сдвиговыми деформациями.

**Выводы.** Установлено, что механизмы формирования откольной каверны на поверхности твердого тела при электровзрыве могут различаться в зависимости от энергии разряда и скорости ее ввода в канал. Быстрый ввод энергии в канал малоиндуктивным генератором ( $T \approx \pi\sqrt{LC} < 1$  мкс) обеспечивает формирование каверны за счет результирующих растягивающих тангенциальных напряжений, возникающих вследствие интерференции волны, падающей на свободную поверхность, и волны, отражающейся от нее в виде волны растяжения. В этом случае на объем образующейся откольной каверны и ее форму оказывают влияние условия отражения волны от поверхности. Такой режим ввода энергии обеспечивает меньшие затраты энергии на разрушение материала по сравнению с “медленным” режимом энергосвода.

При медленном вводе энергии в канал и его небольшом заглублении откольная каверна образуется за счет деформаций сдвига в прямой волне. В этом случае отраженная волна оказывает менее значительное влияние. Соответственно влияние формы поверхности на напряженно-деформированное состояние приповерхностного слоя и, следовательно, на размеры каверны несущественно. При “медленном” режиме энергосвода энергосбережения на разрушение в несколько раз выше, чем при “быстром” режиме ввода энергии. Следовательно, с точки зрения энергетической эффективности режим быстрого ввода энергии в канал разряда при наличии близкорасположенной поверхности более предпочтителен.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Воробьев А. А.** Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1961.
2. **Семкин Б. В.** Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, В. И. Курец. СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 1995.
3. **Казуб В. Т., Коршунов Г. С., Чепиков А. Т.** О процессе формирования разряда в системе электродов, расположенных на границе раздела жидкого и твердого диэлектриков // Изв. вузов. Физика. 1978. № 9. С. 61–66.
4. **Месяц Г. А.** О природе “эффекта Воробьевых” в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 24. С. 51–59.
5. **Usmanov G. Z., Lopatin V. V., Noskov M. D., Cheglov A. A.** Simulation of electrical discharge development at interface of solid and liquid dielectric // Изв. вузов. Физика. 2006. № 10. С. 231–234.
6. **Ушаков В. Я.** Пробой жидкостей при импульсном напряжении / В. Я. Ушаков, В. Ф. Климин, С. М. Коробейников, В. В. Лопатин; Под ред. В. Я. Ушакова. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2005.
7. **Воробьев А. А.** Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков / А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев. М.: Высш. шк., 1966.
8. **Timoshkin I. V., Mackersie J. W., MacGregor S. J.** Plasma channel miniature hole drilling technology // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, N 5. P. 2055–2061.
9. **Jgun D., Jurkov M., Lopatin V., et al.** Application of pulsed discharges for materials cutting // Digest of paper of Europ. pulsed power symp., Saint Louis, France, 22–24 Oct. 2002. P. 22/1–22/4.
10. **Burkin V. V., Kuznetsova N. S., Lopatin V. V.** Analysis of mechanisms of rock destruction in electro discharge drilling // Изв. вузов. Физика. 2006. № 11. Прил. С. 507–510.
11. **Буркин В. В., Кузнецова Н. С., Лопатин В. В.** Моделирование электровзрыва в твердых диэлектриках в электроразрядных технологиях // Изв. Том. политехн. ун-та. 2006. Т. 309, № 2. С. 70–75.
12. **Буркин В. В.** Особенности взрывного воздействия при импульсном электрическом пробое прочных сред // Физика горения и взрыва. 1985. № 4. С. 113–118.
13. **Вершинин Ю. Н.** Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000.
14. **Буркин В. В., Кузнецова Н. С., Лопатин В. В.** Динамика электровзрыва в твердом диэлектрике, погруженном в жидкость // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы 5-й Всерос. науч. конф., Томск, 3–5 окт. 2006 г. Томск: Том. политехн. ун-т, 2004. С. 104–106.
15. **Rompe R., Weizel W.** Über das Toeplersche Funkengesetz // Z. Phys. B. 1944. Bd 122. S. 9–12.
16. **Семкин Б. В.** Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, Н. Т. Зиновьев. СПб.: Наука. С.-Петербург. отд-ние, 2000.
17. **Уилкинс М. Л.** Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Ф. Олдер. М.: Мир, 1967.
18. **Борн М.** Теория твердого тела / М. Борн, М. Гепперт-Мейер. Л.; М.: ОНТИ, 1938.
19. **Наугольных К. А.** Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. М.: Наука, 1971.

20. **Окунь И. З.** Расчет давления в жидкости на поршень при постоянной скорости его расширения // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1968. № 1, вып. 1. С. 126–130.
21. **Физика** взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
22. **Беллендир Э. Н., Беляев В. В., Наймарк О. Б.** Кинетика многоочагового разрушения в условиях откола // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15, № 13. С. 90–93.
23. **Зукас Дж. А.** Динамика удара / Дж. А. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт, А. Б. Грещук, Д. Р. Курран. М.: Мир, 1985.

*Поступила в редакцию 25/VII 2008 г.,  
в окончательном варианте — 26/I 2009 г.*

---