

*Сарсикеев Е.Ж., PhD,
заведующий кафедрой эксплуатации электрооборудования
Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина
Казахстан, г. Нур-Султан*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА В СИСТЕМЕ НАКЛАДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ С ФОРМИРОВАНИЕМ ОТКОЛЬНОЙ ВОРОНКИ

***Аннотация:** В работе приведены результаты моделирования электровзрыва в конденсированных средах, описывающие расширение плазмы канала в твердых материалах в межэлектродных промежутках разной геометрии, генерацию и динамику ударно-волновых возмущений при импульсном выделении энергии в канале, формирование изменяющихся полей механических напряжений и упругопластических деформаций, инициирование трещин, разрушающих материал.*

***Ключевые слова:** электровзрыв, горная порода, бетон, откол, разрушение, моделирование.*

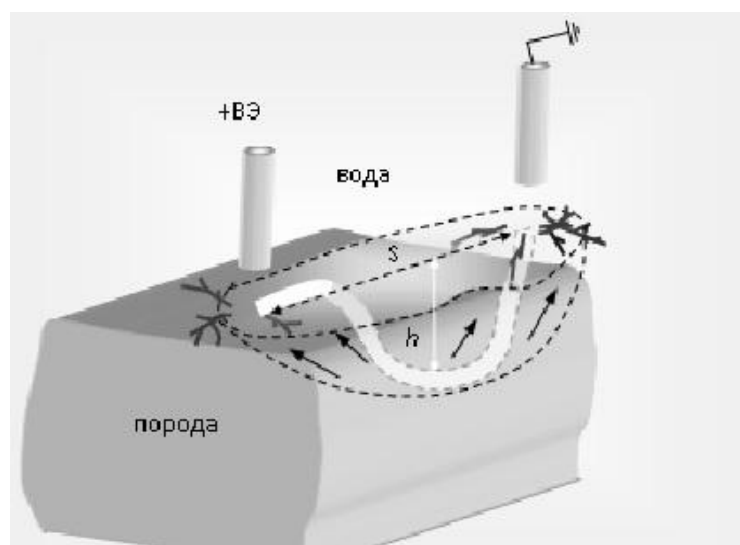
***Annotation:** The paper presents the results of modeling electroexplosion in condensed matter, describing the expansion of the channel plasma in solid materials in interelectrode intervals of different geometry, generation and dynamics of shock-wave disturbances in the pulse energy release in the channel, the formation of changing fields of mechanical stresses and elastic-plastic deformations, initiation of cracks that destroy the material.*

***Key words:** electrical explosion, rock, concrete, spalling, destruction, modeling.*

Задача описания динамики расширения плазменного разрядного канала в гетерогенных средах при электровзрыве, согласованного с импульсным генератором и состоянием плазмы, выделения энергии в разрядной плазме, приводящего к формированию упругопластических деформаций,

трещинообразованию и разрушению материала, актуальна для понимания явления электровзрыва. Моделирование динамики электровзрыва в системе конденсированных сред полиэтилен (вода) – горная порода (бетон) позволит создать последовательное описание физических процессов, которые лежат в основе электроразрядных технологий разрушения и откола твердых непроводящих материалов. Необходимость анализа рассмотренных процессов в контексте совершенствования электроразрядных технологий диктуется требованиями оптимизации параметров импульсного генератора и режимов разряда, согласованных с волновой динамикой в диэлектриках и условиями разрушения твердого тела [1–6].

При расположении электродов на одной поверхности канал пробоя проходит вблизи этой поверхности и ее влияние на волновую динамику и механизм разрушения материала оказывается существенным. Эта ситуация типична для электроразрядных технологий бурения, резания щелей, снятия поверхностного слоя материала с массива. Соответствующая схема расположения электродов и траектория канала в момент замыкания межэлектродного промежутка приведены на рисунке 1.



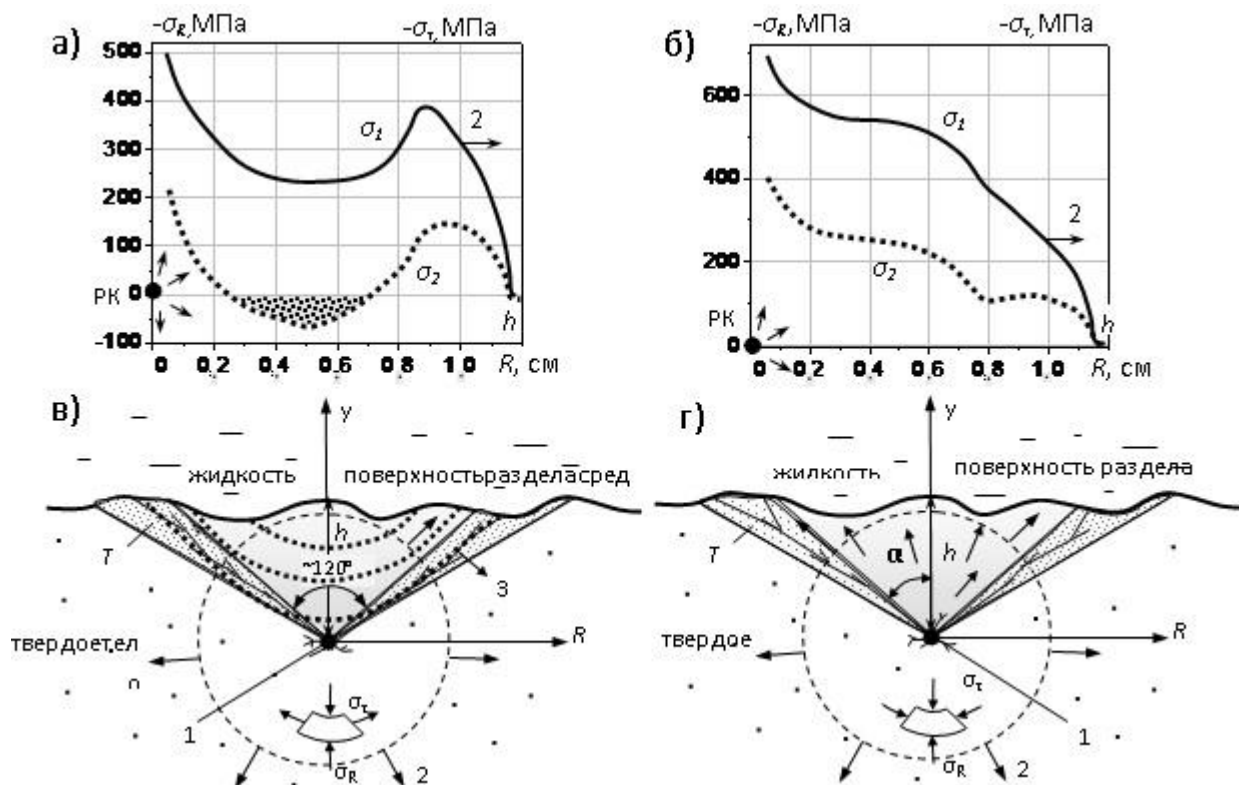
h – глубина разрядного канала, S – межэлектродное расстояние

Рисунок 1. Схема расположения высоковольтного (ВЭ) и заземленного электродов на поверхности твердого тела

Основные отличия приповерхностного электровзрыва от сквозного пробоя связаны с нарушением одномерности деформирования слоя материала, прилегающего к поверхности, при отражении волны. В рассматриваемом случае возможна суперпозиция радиальных напряжений прямой волны с тангенциальными напряжениями отраженной волны.

Характер формирования волновой картины в области материала, прилегающей к поверхности отражения, определяется параметрами волны (ее профилем) к моменту ее выхода на поверхность и "неровностями" поверхности. Поскольку форма волны изменяется по мере ее приближения к поверхности, то результирующая картина напряженно-деформированного состояния также будет зависеть от глубины внедрения канала в диэлектрик.

Анализ результатов моделирования для плоской поверхности отражения показал, что в зависимости от энергетических параметров разряда можно выделить два характерных варианта развития волнового процесса (рисунок 2) и, соответственно, два возможных механизма разрушения материала. Быстрый ввод энергии малоиндуктивным генератором (когда полупериод разрядного тока $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} < 1$ мкс) даже при запасаемой накопителем энергии $W_g < 100$ Дж позволяет сформировать в прямой волне наряду с областью пластического деформирования материала область растягивающих тангенциальных напряжений (рисунок 2, а). Радиус области растягивающих напряжений по мере распространения волны увеличивается. При отражении такой волны в радиальных сечениях T , угол раствора которых составляет $100^\circ - 120^\circ$, растягивающие напряжения, действующие на площадках, параллельных этим сечениям, становятся наибольшими. Этот эффект обусловлен суперпозицией прямой и отраженной волн, при которой растягивающие напряжения σ_t в прямой волне и растягивающие напряжения σ_R в отраженной волне суммируются, а область растягивающих напряжений, превышающих предел прочности материала на разрыв, охватывает все большую часть материала. В результате в этих областях реализуются наиболее благоприятные условия для образования трещин.



а), в) – "быстрый" режим ввода энергии ($W_g=118$ Дж, $T=0,46$ мкс), б), г) – "медленный" режим ввода энергии ($W_g=588$ Дж, $T=1,33$ мкс); 1 – разрядный канал (РК), 2 – прямая волна, 3 – волна, отраженная от границы диэлектрика, σ_r , σ_t – радиальное и тангенциальное напряжения, Т – области наиболее вероятного формирования трещин

Рисунок 2. Поперечные сечения разрядного канала (в, г) и профили волн механических напряжений в сечениях Т (а, б) в момент времени $t=1,7$ мкс при глубине внедрения канала $h=6$ мм

При медленном вводе энергии в разрядный канал (полупериод разрядного тока $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} > (2-10)$ мкс), характерном для более энергетичных разрядов, или при небольшом заглублении канала ($h \leq 4$ мм) область растягивающих напряжений в волне к моменту ее выхода на свободную поверхность сформироваться не успевает. Напряжения в волне в рассматриваемом временном интервале остаются сжимающими (рисунок 2, б). Реакция материала, находящегося над каналом, на такой тип воздействия выражается в перемещении части материала в направлении поверхности, рисунок 2, б). В сечениях Т, разграничивающих перемещаемую часть и неподвижный массив материала, расположенных под углом α к оси ординат, возникают деформации сдвига. При достижении ими критических значений в этих сечениях возникнут трещины, и

произойдет вынос части материала, находящегося над каналом, в направлении свободной поверхности.

В результате образуется откольная каверна лещадной формы. Разрушение в этих случаях реализуется за счет деформаций сжатия и сдвига ε_{xy} , вызванных наибольшими касательными напряжениями в прямой волне. Роль отраженных волн в данном случае второстепенна.

Анализ динамики изменения механических напряжений и деформаций для системы наложенных на поверхность твердого тела электродов проводился в разных сечениях материала: OA, OB, OC, OD, OF, OG, OH, расположенных под углом к нормали $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ$, соответственно, рисунок 3.

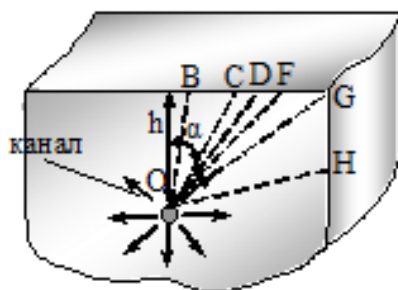
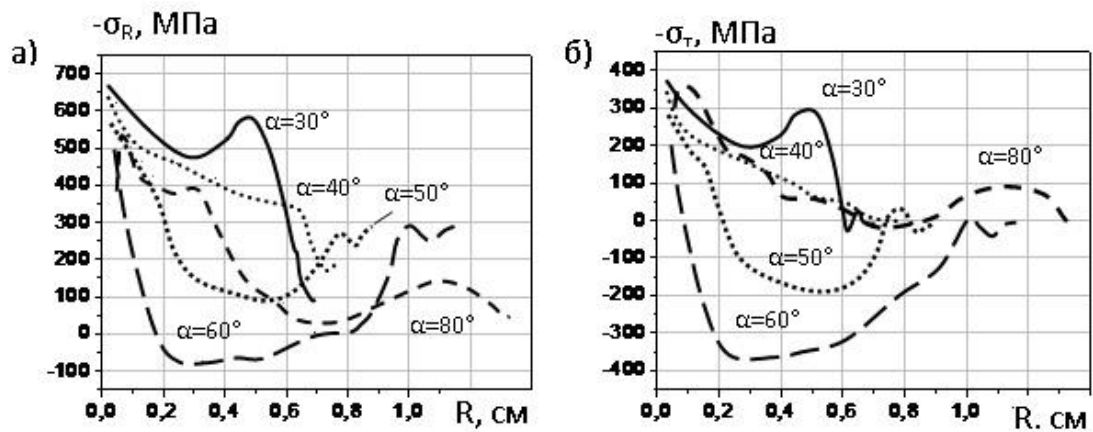


Рисунок 3. Схема расположения сечений, вдоль которых проводится анализ динамики напряжений и деформаций в твердом теле

Эволюция волновой картины в разных сечениях гранита приведена на рисунке 4. Уровень растягивающих радиальных напряжений σ_R значительно ниже растягивающих тангенциальных напряжений σ_T . Максимальные растягивающие напряжения развиваются вдоль луча OG под углом $\alpha=60^\circ$.

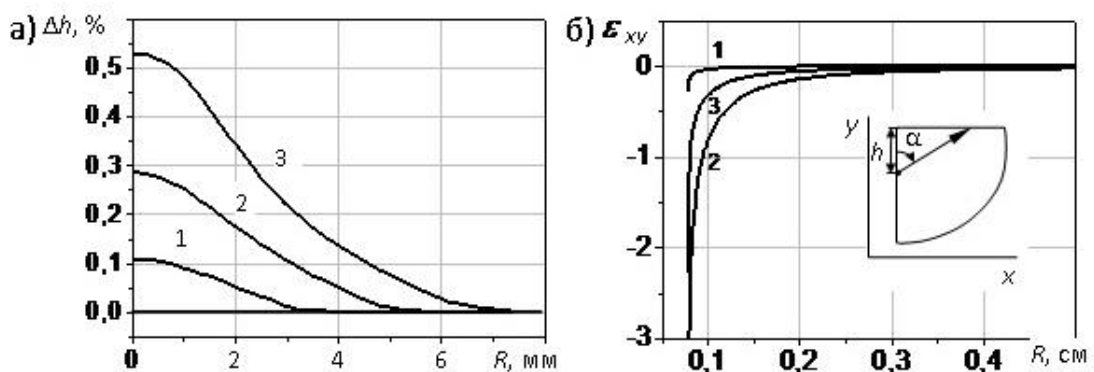
На рисунке 5 показана динамика относительного изменения положения поверхности $\Delta h = \left(\frac{h(x,t)}{h} - 1 \right) \cdot 100\%$ (а) и расчетные значения деформаций сдвига ε_{xy} (б) в элементах среды, расположенных в трех разных сечениях.



$$C=5 \text{ нФ}, L=5 \text{ мкГн}, U_0=280 \text{ кВ}, l_{ch}=2 \text{ см}, h=0,6 \text{ см}$$

Рисунок 4. Распределение радиальных σ_R и тангенциальных σ_T напряжений волне в разных сечениях под углом α в момент выхода волны на поверхность твердого тела

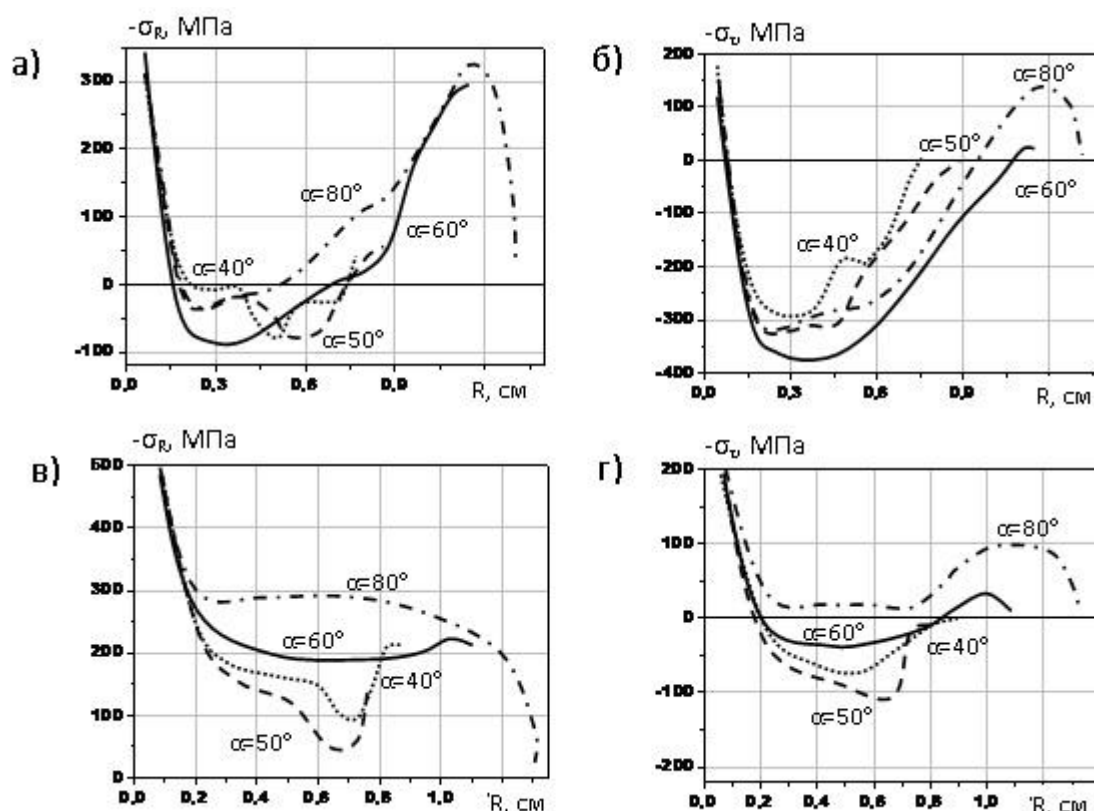
Видно, что над каналом подъем поверхности более интенсивный и уменьшается к периферии. Сравнение полученных распределений ε_{xy} показывает, что наибольшие значения ε_{xy} достигают в сечениях, расположенных вдоль $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ под углами около 50° – 60° относительно оси OY . Следовательно, при медленном вводе энергии именно в этих сечениях произойдет образование трещин, соединяющих область раздавливания материала вблизи канала с поверхностью.



а) 1 – $t=1 \text{ мкс}$, 2 – $t=1,2 \text{ мкс}$, 3 – $t=1,4 \text{ мкс}$; б) при $t=2 \text{ мкс}$, $h=6 \text{ мм}$; $C=20 \text{ нФ}$, $L=5 \text{ мкГн}$, $U_0=280 \text{ кВ}$, при трех значениях угла α : 1 – 30° , 2 – 60° , 3 – 80°

Рисунок 5. Зависимости (а) величины подъема поверхности твердого тела над каналом ($h=6 \text{ мм}$) от расширяющегося плазменного канала и (б) величины деформации сдвига от расстояния R

Профили волн напряжений в различных сечениях материала для двух режимов энерговода в канал приведены на рисунке 6.



а), б) – "быстрый" режим ввода энергии при $W_g=110$ Дж, $T_{05}=0,38$ мкс;

в), г) – "медленный" режим ввода энергии при $W_g=547$ Дж, $T_{05}=1,5$ мкс

Рисунок 6. Эюры радиальных σ_R и тангенциальных σ_τ напряжений в волне при расширении канала в граните в разных сечениях

Сравнение рассмотренных вариантов процесса показывает, что, несмотря на различие режимов разряда, волновых картин в материале, механизмов разрушения (разрыв, сдвиг), прогнозируемые поперечные размеры откольных каверн отличаются слабо, так как значения углов максимальных напряжений разнятся примерно на 20° . Отметим, что и в физических экспериментах при $T_{05} \geq 1$ мкс откол чаще происходит в виде одного или нескольких кусков лещадной формы, рисунок 7 [7].



Рисунок 7. Экспериментально полученная откольная каверна при электровзрыве в известняке

Проведенное моделирование показало, что поле динамических напряжений при электровзрыве в прочных средах характеризуется рядом особенностей. Специфика поля напряжений обусловлена сильной дивергенцией волны, вызванной малыми радиальными размерами канала (<10 мкм). Полученное распределение напряжений в волне согласуется с картиной разрушений в эксперименте. На основании эюр тангенциального напряжения и распределения концентрации энергии в волне проанализированы условия зарождения и развития радиальных трещин, что позволяет в рассмотренном диапазоне изменения свойств среды и условий энерговыделения прогнозировать масштабы и характер разрушения.

Разработка программ ЭВМ для моделирования электроразрядного откола и разрушения горных пород и искусственных материалов дает возможность проводить анализ напряженно-деформированного состояния упругопластической среды, прогнозировать масштабы и характер разрушения, что позволяет дать рекомендации к оптимальному выбору параметров импульсных генераторов для электроразрядных технологий разрушения и откола разработчикам электрофизической техники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Халилов Д.Д. Исследование электрофизических характеристик искрового канала в горных породах и анализ путей оптимизации устройств электроимпульсной технологии: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск, 1973. – 140 с.
2. Воробьев А.А. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Издательство ТГУ, 1971. – 223 с.
3. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 488 с.
4. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.
5. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
6. Стефанов К.С. Техника высоких напряжений. – Ленинград: Энергия, 1967. – 496 с.
7. В.Ф. Важов, Р.Р. Гафаров, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков, В.В. Лопатин, В.М. Муратов, В. Jeffreyes Разрушение горных пород разрядами при повышенных давлениях и температурах // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 8. – С. 79–85.