

*На правах рукописи*



Кузнецова Наталья Сергеевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО  
РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск–2011

Работа выполнена в Институте физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национального исследовательского Томского политехнического университета".

**Научные руководители:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Лопатин Владимир Васильевич**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
**Орешкин Владимир Иванович**

доктор физико-математических наук, гл. н. с.  
**Князева Анна Георгиевна**

**Ведущая организация:** Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск

Защита состоится "9" ноября 2011 г. в 14.00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан "6" октября 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук, профессор



М.В. Коровкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Электровзрывом в твердых телах называют комплекс взаимосвязанных явлений, включающих инициирование и развитие разрядного канала, перемыкание им разрядного промежутка, расширение плазменного канала при быстром вводе в него энергии, генерацию и динамику ударных волн, их трансформацию в упругую и пластическую волны, формирование динамично изменяющегося поля механических напряжений и деформаций, трещинообразование и разрушение твердого тела.

Взрывное воздействие расширяющегося плазменного канала, сформированного в толще слабопроводящих материалов, применяется в технологиях бурения скважин в горных породах, дробления и разрушения материалов и изделий, резания щелей, очистки поверхностей от отложений и др. Современное состояние исследований в области фундаментальных основ электроразрядных технологий, несмотря на обширные и глубокие исследования электрического разряда в конденсированных диэлектриках характеризуется рядом проблем. Остается дискуссионной не только роль параметров энерговвода в разрядный канал, но и влияние волновых процессов на формирование поля механических напряжений и деформаций в обрабатываемом твердом теле. Уровень теоретических и экспериментальных исследований стадии расширения канала в воде достаточно высокий, благодаря работам Окуня И.З., Наугольных К.А., Роя Н.А., Кривицкого Е.В. и др. В твердых телах эта стадия экспериментально исследована только в работах Воробьева А.А., Семкина Б.В., Шубина Б.Г., Кожушко А.А. хотя разница не только в балансе энергии, но и в феноменологии процессов из-за существования пластического течения и хрупкого разрушения, должна быть значительной.

Электровзрыв в твердом теле позволяет регулировать энерговыделение в разрядном канале и, тем самым, влиять на поле напряжений вокруг канала, определяя картину разрушения материала. В связи с этим основной задачей повышения эффективности применения электроразрядных технологий является согласование режимов энерговыделения в канале с характеристиками генерируемой волны, создающей деформации материала. До настоящего времени выбор режимных параметров осуществляется эмпирически и не позволяет, не только оптимизировать их, но даже ответить на коренные вопросы технико-экономической эффективности разрушения. Поскольку экспериментальные исследования электроразрядного разрушения дорогостоящи, актуально создание количественной физико-математической модели электровзрыва, позволяющей теоретически исследовать все стадии электровзрыва и разработать рекомендации для выбора параметров высоковольтного оборудования.

**Цель работы:** создание комплексной физико-математической модели электровзрыва в твердых телах и исследование закономерностей энергетических и волновых процессов при электровзрывном воздействии на твердый материал для выбора эффективных режимов энерговыделения.

**Указанная цель достигается решением следующих задач:**

1. Выделение основных процессов, определяющих разрушение твердых тел и установление взаимосвязей между ними.
2. Разработка 1-D и 2-D моделей электровзрыва, включающих генерацию ударных волн расширяющимся плазменным каналом при импульсном выделении энергии в нем, формирование изменяющихся полей механических напряжений и деформаций в твердом теле, разрушающих материал.
3. Исследование энергетических характеристик электровзрыва, анализ возможностей и путей повышения эффективности преобразования энергии емкостного накопителя в энергию волны.
4. Анализ процессов волновой динамики, напряженно-деформированного состояния твердого тела и прогноз возможной картины разрушения в зависимости от параметров разрядного контура, режимов энерговвода в канал, его длины и глубины внедрения, физико-механических свойств материала.

5. Исследование и анализ механизмов разрушения твердых тел при электровзрыве в зависимости от режимов энергоснабжения в разрядный канал. Определение объема откольной каверны и затрат энергии на разрушение.
6. Разработка рекомендаций к оценке и выбору эффективных режимных и энергетических характеристик оборудования.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач применялись следующие методы исследований:

- анализ и обобщение данных отечественных и зарубежных работ в области электрического разряда в конденсированных материалах;
- метод самосогласованного решения уравнений переходного процесса в разрядном контуре импульсного генератора, состояния плазмы, работы ее расширения и волновой динамики в конденсированной среде;
- сравнительный анализ результатов исследований с данными физических экспериментов.

### **Научная новизна работы**

1. Разработана количественная физико-математическая модель электровзрыва в твердом теле, позволяющая самосогласованно моделировать разряд конденсатора на плазменный канал, его расширение с учетом состояния плазмы, генерацию и распространение ударно-волновых возмущений, формирование поля механических напряжений и упруго-пластических деформаций в разрушаемом материале.
2. Установлена связь параметров разрядного контура и длины разрядного канала с параметрами волны и характеристиками напряженно-деформированного состояния твердого тела.
3. Исследованы закономерности формирования, эволюции и диссипации ударно-волновых возмущений в твердых телах при электровзрыве.
4. Обнаружены разные механизмы формирования откольной каверны на поверхности твердого тела в зависимости от скорости ввода энергии в канал: быстрый ввод энергии в канал малоиндуктивным генератором ( $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} \leq 1 \text{ мкс}$ ) формирует каверну суммарными растягивающими тангенциальными напряжениями при минимальных энергозатратах на разрушение материала; при медленном вводе энергии в канал каверна образуется за счет деформаций сжатия и сдвига в прямой волне.

### **Научная и практическая значимость работы**

1. Созданная количественная 2-D модель электровзрыва позволяет рассчитать временные зависимости выделения энергии в канале, давление ударных волн от расширяющегося разрядного канала, тензоры деформаций в твердом материале, размеры откольной каверны, образующейся при разрушении вблизи открытой поверхности.
2. Установлены и обоснованы оптимальные режимы энергоснабжения в разрядный канал, обеспечивающие максимальный объем разрушения суммарным действием растягивающих тангенциальных напряжений в прямой волне и растягивающих радиальных напряжений в отраженной от свободной поверхности волне с минимальными энергозатратами на разрушение.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Физико-математическая модель электровзрыва в твердых телах, взаимосогласованно описывающая работу высоковольтного импульсного генератора, расширение плазменного канала, генерацию и распространение ударно-волновых возмущений, формирование поля механических напряжений и упруго-пластических деформаций в разрушаемом твердом теле.
2. Эффективность энергоснабжения в разрядный канал и профили волн механических напряжений при электровзрыве определяются параметрами разрядного контура, длиной разрядного канала и величиной его заглубления.

3. Механизмы разрушения материалов при электровзрыве и границы их реализации: при быстром вводе энергии с полупериодом тока не более  $10^{-6}$  с откол осуществляется преимущественно растягивающими тангенциальными напряжениями за счет интерференции падающей и отраженной от поверхности твердого тела волн, а при медленном энерговоде – за счет деформаций сжатия и сдвига, вызванных наибольшими касательными напряжениями в прямой волне.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и реализации задач диссертационного исследования, анализе процессов при электровзрывном разрушении твердых тел, создании физико-математической модели электровзрыва, проведении численных исследований электровзрывного воздействия на твердый материал, анализе полученных результатов и формулировке выводов. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемого метода расчета, использованием фундаментальных принципов механики деформируемого твердого тела, общепризнанных теоретических законов и достаточной обоснованности сделанных допущений; согласием результатов компьютерных исследований электровзрыва с физическими экспериментами и результатами других авторов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы были представлены на следующих конференциях и симпозиумах: отраслевой научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики» (Северск, 2004–2006); XI, XII, XIII Международных конференциях студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2005–2007); II, III, IV, V Международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2005–2008); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2005); III Всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные проблемы новых технологий в третьем тысячелетии» (Томск, 2006); IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 2006); V, VI, VII Всероссийских конференциях «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2006, 2008, 2011); Научной конференции «Электрофизика материалов и установок» (Новосибирск, 2006); XIV и XVI Международном симпозиуме по сильноточной электронике (Томск 2006, 2010), XIII Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (Томск, 2006); Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск, 2007); X Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение в технологиях» (Томск, 2007); 14<sup>th</sup> International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials (Астана, Казахстан, 2009), XI Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 2011), 18th IEEE International Pulsed Power Conference (США, Чикаго, 2011).

**Реализация результатов.** Результаты диссертационной работы реализованы при выполнении хозяйственных и госбюджетных исследований, проводившихся по плану научно-исследовательских работ ИФВТ ГОУ ВПО НИ ТПУ, при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-50203 (2005–2008 г.г.); № 08-08-01016-а (2008–2010 г.г.)), программы Минобрнауки РФ "Развитие научного потенциала высшей школы" (проект № 2.1.1.53.43 (2006–2008 г.г.); № 2.1.2/4495 (2009–2010 г.г.)), гранта CRDF № RUE 11360(2)-TO-04, Р "Высоковольтное глубинное бурение" 2005–2008 г.г., ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 г.г." (гос. контракт № 02.740.11.0547).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 45 печатных работ, в том числе 10 в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ: Журнал технической физики (1), Прикладная

механика и техническая физика (1), Journal of Physics D: Applied Physics (2), Известия Томского политехнического университета (1), Известия вузов. Физика (5).

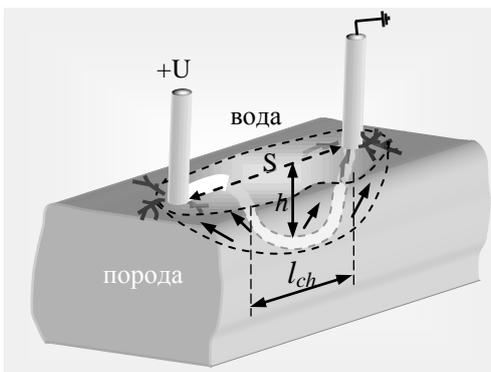
**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал работы изложен на 170 страницах, включает 6 таблиц, содержит 68 рисунков, приложение и библиографический список из 204 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна результатов, перечислены защищаемые положения, отражены практическая ценность и достоверность полученных результатов, представлены структура и объем, а также краткое содержание глав диссертационной работы.

**В первой главе** приведено феноменологическое описание электровзрыва в конденсированных средах: инициирования и развития разрядных каналов, динамики расширения канала, генерации и распространения волн напряжений, формирования откольной каверны в твердом теле. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие при электровзрывном воздействии на твердый материал и особенности его разрушения. Проведен анализ существующих подходов к математическому описанию импульсного нагружения твердых тел.

Согласно сложившимся представлениям электровзрыв в твердом теле следует рассматривать как последовательность взаимосвязанных процессов, в развитии которых условно можно выделить две основные стадии. Первая стадия – это электрический пробой диэлектрического или полупроводящего материала, т.е. инициирование и развитие разрядных каналов до перекрытия одним из них или несколькими межэлектродного промежутка. Вторая стадия – расширение сформированного в промежутке плазменного канала при введении в него энергии, распространение ударно-волновых возмущений, формирование механических напряжений, упругопластических деформаций и разрушение твердого тела. Диссертационная работа посвящена, главным образом, исследованию стадии расширения плазменного канала с учетом динамики ударно-волновых возмущений в материале. Инициирование и формирование стохастично развивающихся каналов в твердом теле не рассматривается.

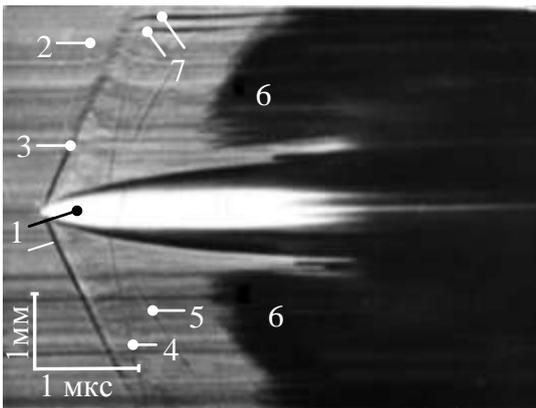


**Рис. 1** – Схема расположения высоковольтного и заземленного электродов на поверхности твердого тела,  $l_{ch}$  – длина,  $h$  – глубина разрядного канала,  $S$  – межэлектродное расстояние

напряжения к электродам инициирует рост разрядных каналов с анода, которые преимущественно развиваются вдоль поверхности жидкость – твердое тело. На расстоянии около  $(0 - \frac{1}{4} S)$ , где  $S$  – межэлектродное расстояние, один из каналов внедряется в твердый диэлектрик и, благодаря большей скорости развития ( $V_s/V_l \approx 1,5-10$ ,  $V_s, V_l$  – скорости развития разрядных каналов в твердом теле и в жидкости соответственно) перемыкает промежуток.

Считается, что глубина внедрения канала в оптимальных условиях составляет  $h \approx (\frac{1}{4} - \frac{1}{3})S$ , рис. 1.

Сформированный в течение предпробивной стадии разрядный канал представляет собой полость диаметром порядка  $d_0 \approx (1-10) \cdot 10^{-6}$  м, заполненную расплавом, парами и плазмой твердого материала. За время  $t \approx (10^{-6} - 10^{-4})$  с в канале выделяется электрическая энергия, запасенная накопителем. Быстрое выделение энергии приводит к сильному разогреву вещества, его испарению, концентрация электронов и ионов по мере расширения канала возрастает. Образуется плотная низкотемпературная плазма, выступающая как рабочее тело (радиальный поршень), совершающее при расширении работу над окружающей средой. Согласно результатам экспериментальных исследований диаметр канала за несколько микросекунд достигает  $d \approx (0,3 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м, а температура плазмы  $(10-20) \cdot 10^3$  К.



**Рис. 2** – Фоторазвертка расширения канала и сопутствующих явлений в *KCl*.

Камуфлетный разряд,  $U=330$  кВ,  $C=0,03$  мкФ,  $L=8,9$  мкГн: 1 – канал; 2 – упругая волна; 3 – ударная пластическая волна; 4, 5 – упругие возмущения; 6 – область разрушения; 7 – трещины на фронте ударной волны<sup>1</sup>

материала (радиусом (2–3) мм). Упругая волна, распространяясь в твердом теле в радиальном направлении, создает область растягивающих напряжений за своим фронтом. Ее параметры существенно зависят от условий энерговода в канал и свойств нагружаемого материала. Такое воздействие на твердый материал приводит к формированию переменного во времени и пространстве поля растягивающих напряжений и деформаций в материале, которые стимулируют зарождение радиальных трещин.

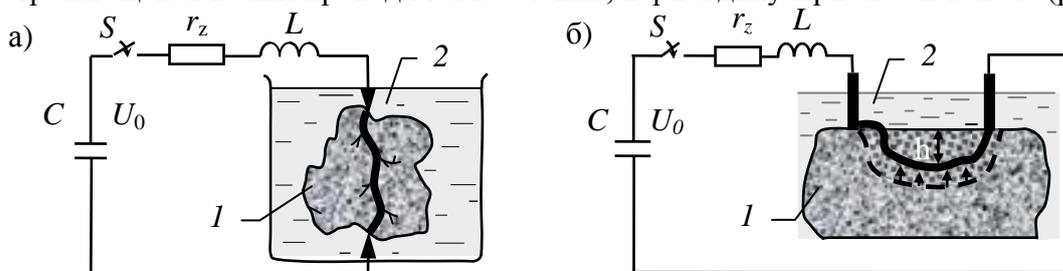
Следуя традиционным представлениям о взрыве взрывчатых веществ в твердом теле, можно выделить (и эксперименты подтверждают это) зону дробления (измельчения) и зону растрескивания. При этом характерные радиальные размеры этих зон для ряда кристаллических тел (ПММА, стекло, керамика, ряд горных пород) составляют  $(1-4) \cdot 10^{-3}$  м и  $(3-6) \cdot 10^{-2}$  м соответственно.

В случае системы наложенных на поверхность твердого тела электродов (рис.1) эффективность электровзрывного разрушения оценивается объемом откольной каверны  $V_0$ , который зависит от глубины внедрения разряда ( $h$ ), выделенной в канале энергии ( $W_{ch}$ ), скорости ввода энергии ( $N$ ), межэлектродного расстояния ( $S$ ), прочности твердого материала на растяжение ( $\sigma$ ). К сожалению, имеющиеся экспериментальные результаты по

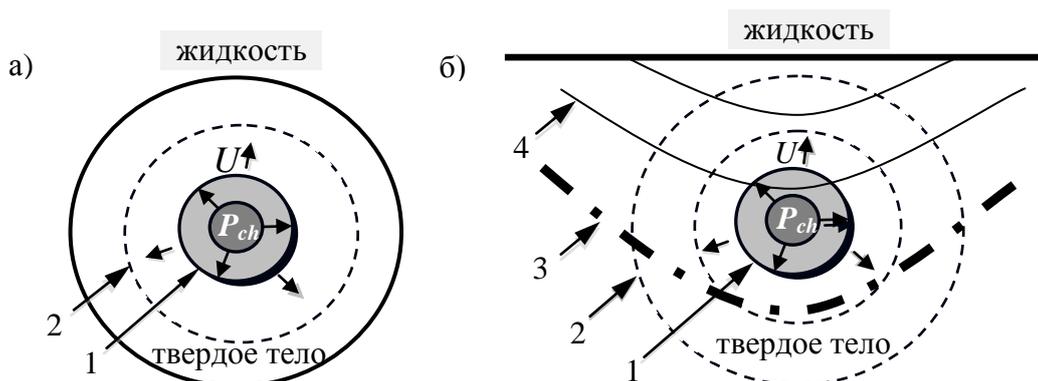
<sup>1</sup> Шубин Б.Г. Исследование термодинамических и гидродинамических характеристик канальной стадии импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск. 1977. – 188 с.

электроразрядному разрушению твердых материалов трудно сравнивать между собой, поскольку исследования выполнялись на генераторах с разными импедансами и, как правило, без измерений тока. Соответственно, скорость энерговыделения в экспериментах была разной. Ограниченный диапазон экспериментальных условий не позволяет сравнивать результаты из-за различия условий экспериментов и даже качественно оценить закономерности влияния параметров энерговода на эффективность электровзрывного разрушения твердых пород. Практически единственными параметрами, представляющими важное для анализа и расчета значение, являются скорость распространения трещин, которая составляет порядка  $(0,38 - 0,4)c_0$ , где  $c_0$  – скорость звуковой волны в материале и связь глубины внедрения канала  $h$  с межэлектродным расстоянием  $S$ .

Во второй главе представлена физико-математическая модель, согласованно описывающая разряд конденсатора и динамику электровзрыва, связь электротехнических параметров с напряженно-деформированным состоянием материала, вызывающим его разрушение. Анализ волновой динамики проводился для двух схем электроразрядного разрушения: системы соосных электродов (сквозной пробой, рис. 3, а) и наложенных на поверхность твердого тела электродов (внедрение разрядного канала с формированием откольной каверны, рис. 3, б) в жидкости. Рассматриваемые схемы моделировались цилиндрическим образцом с разрядным каналом, совпадающим с осью материала (рис. 4, а), и образцом с наложенными на поверхность электродами (рис. 4, б). Расчет параметров распространяющейся волны проводился в сечении, перпендикулярном оси канала (рис. 4).



**Рис. 3** – Схемы электроразрядного разрушения твердого диэлектрика: а) – система электродов острие–острие, б) – система наложенных на поверхность тела электродов, 1 – твердое тело, 2 – жидкость,  $h$  – глубина внедрения разрядного канала,  $C$  – емкость накопителя,  $r_z$  и  $L$  – сопротивление и индуктивность разрядной цепи,  $S$  – коммутатор



**Рис. 4** – Распространение волн в сечениях, перпендикулярных оси разрядного канала: а) – отражение волны от цилиндрической поверхности (одномерная задача), б) – отражение волны от плоской поверхности (двумерная задача), 1 – разрядный канал, 2 – волна механического напряжения, 3 – откольная каверна, 4 – отраженные волны

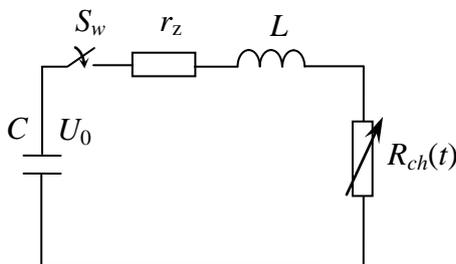
В схеме на рис. 4, а волновой процесс допускает анализ в одномерном приближении. В схеме 4, б необходимо использовать двумерное приближение, описывающее волновую динамику с учетом отражения волны от поверхности. Рассмотрение обоих вариантов развития

и протекания ударно-волновых возмущений позволяет оценить эффект отражения волны в усилении роли растягивающих тангенциальных напряжений. Основные различия в формировании полей напряжений и деформаций в рассматриваемых случаях обусловлены следующим: во-первых, при отражении от цилиндрической поверхности волна – сходящаяся, а от плоской – расходящаяся и, во-вторых, при отражении от цилиндрической поверхности радиальные и тангенциальные напряжения не взаимодействуют между собой, а при отражении от плоской поверхности радиальные напряжения в отраженной волне могут взаимодействовать с тангенциальными напряжениями в прямой волне.

Для расчета упругопластического деформирования прочных сред используется метод Уилкинса<sup>2</sup>. Основные соотношения этого метода дополняются электротехническими уравнениями цепи, уравнением энергобаланса разрядного канала, уравнениями состояния среды и плазмы с соответствующими начальными и граничными условиями.

Задержка разрушения в течение (1,5–4) мкс позволяет использовать уравнения сплошной среды в форме законов сохранения импульса, массы и энергии.

### Работа разрядного контура емкостного импульсного генератора



**Рис. 5** – Схема замещения генератора импульсных напряжений и нагрузки:

$C$  – емкость генератора,

$U_0$  – зарядное напряжение,

$S_w$  – ключ,  $L$  – индуктивность,

$r_z$  – омическое сопротивление цепи

Работа генератора импульсных напряжений моделируется на основе эквивалентной схемы, содержащей генерирующий конденсатор емкостью  $C$ , сопротивление  $r_z$ , индуктивность  $L$  и нагрузку с сопротивлением  $R_{ch}(t)$  (рис. 5). В электроразрядных технологиях чаще всего используются емкостные импульсные генераторы. Другие виды источников энергии могут быть приведены к аналогичной схеме замещения. При замыкании ключа  $S_w$  в диэлектрике формируется разрядный канал радиусом  $r_{ch0}$ , в плазме которого и в активном сопротивлении  $r_z$  (сопротивление коммутатора  $S_w$  и проводов разрядного контура) из конденсатора  $C$  выделяется запасенная в нем энергия  $W_g = CU_0^2/2$ . Индуктивность  $L$  состоит из индуктивности конденсатора  $C$ , соединительных проводов и разрядного канала длиной  $l_{ch}$ . Канал разряда с сопротивлением  $R_{ch}(t)$  моделируется расширяющимся цилиндром радиусом  $r_{ch}(t)$  и длиной  $l_{ch}$ .

Уравнения Кирхгофа для разрядной цепи:

$$L \frac{di(t)}{dt} + (r_z + R_{ch}) \cdot i(t) = U_c(t), \quad \frac{dU_c(t)}{dt} = -\frac{i(t)}{C} \quad (1)$$

с начальными условиями для силы тока  $i(0)=0$  и напряжения  $U(0)=U_0$ , где  $U_0$  – начальное напряжение.

Изменение сопротивления разрядного канала определяется через интеграл действия тока по соотношению Ромпе-Вайцеля:

$$R_{ch}(t) = \frac{Al_{ch}}{\sqrt{\int_0^t i^2(t) dt}}, \quad (2)$$

где  $A$  – искровая постоянная, значение которой зависит от свойств материала.

### Баланс энергии в плазменном канале пробоя

Законы Кирхгофа позволяют рассчитать ток в цепи  $i(t)$ , сопротивление разрядного канала  $R_{ch}(t)$  и выделенную в канале энергию

<sup>2</sup> Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Ф. Олдер. – М.: Мир, 1967. – 563 с.

$$W_{ch}(t) = \int_0^t i^2(t) \cdot R_{ch}(t) dt. \quad (3)$$

Плазменный канал описывается давлением, радиусом и внутренней энергией. Выделенная в канале энергия преобразуется во внутреннюю энергию плазмы и механическую энергию ударной волны, которая также расходуется на расширение канала:

$$\frac{dW_{ch}}{dt} = \frac{dA_{ch}}{dt} + \frac{dW_{pl}}{dt}, \quad (4)$$

где  $dA_{ch} = P_{ch} \cdot dV_{ch}$  – приращение работы, совершаемой расширяющимся каналом, при изменении его объема  $V_{ch} = \pi r_{ch}(t)^2 l_{ch}$  под действием давления внутри канала  $P_{ch}$ ,  $W_{pl}$  – внутренняя энергия плазмы канала, расширяющегося в адиабатическом приближении:

$$W_{pl} = \frac{P_{ch} \cdot V_{ch}}{\gamma - 1}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – эффективный показатель адиабаты. Показатель адиабаты  $\gamma$  влияет на распределение вводимой в канал энергии между плазмой и ударной волной. Для конденсированных сред его величина, согласно литературным данным, изменяется в диапазоне 1,25–1,05. При моделировании величина  $\gamma$  полагалась равной значению 1,1, которое, по нашему мнению, близко к реализуемым в электроразрядных технологиях.

С учетом (5) уравнение энергобаланса можно записать в виде:

$$\frac{dW_{ch}}{dt} = P_{ch} \frac{d(\pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch})}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(P_{ch} \pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch})}{dt}. \quad (6)$$

Потерями энергии на формирование канала пробоя, составляющими в сантиметровых промежутках около 10 Дж пренебрегаем. Потери энергии на излучение и истечение плазмы из канала в моделировании не учитывались. В соответствии с оценками в литературе при временах формирования волн не превышающих  $\sim 10^{-6}$  с, излучение не превышает (2–5) % от выделенной в канале энергии  $W_{ch}$ . Потери энергии на истечение плазмы из устьев канала в типичных условиях составляют  $\sim (2-3)$  % от  $W_{ch}$ .

Энергия волны  $W_{ws}$ , распространяющейся в материале, равна сумме потенциальной энергии поля давлений (механических напряжений)  $W_{de}$  и кинетической энергии движущегося материала, охваченного волной,  $W_{ke}$  и рассчитывается по соотношениям:

$$W_{ws} = 2\pi l_{ch} \int_{r_{ch0}}^{r_{ch}} P_{ch} r_{ch} dr_{ch} = W_{de} + W_{ke}, \quad (7)$$

$$W_{de} = 2\pi l_{ch} \cdot \int_{r_{ch}}^{R_w} e \rho R dR, \quad W_{ke} = \pi l_{ch} \int_{r_{ch}}^{R_w} u^2 \rho R dR, \quad (8)$$

где  $r_{ch0}$  и  $r_{ch}$  – начальный и текущий радиус канала,  $R_w$  – радиус области материала, охваченного волной.

Для анализа эффективности преобразования энергии значения составляющих энергии  $W_{r_z}$ ,  $W_{ch}$ ,  $W_{pl}$ ,  $W_{ws}$ ,  $W_{wj}$ ,  $W_{de}$ ,  $W_{ke}$  нормировались делением на  $W_g = CU_0^2/2$ :  $\eta_{r_z} = W_{r_z}/W_g$ ,  $\eta_{ch} = W_{ch}/W_g$ ,  $\eta_{pl} = W_{pl}/W_g$ ,  $\eta_{ws} = W_{ws}/W_g$ ,  $\eta_{wj} = W_{wj}/W_g$ ,  $\eta_{de} = W_{de}/W_g$ ,  $\eta_{ke} = W_{ke}/W_g$ .

Динамика изменения объемной плотности энергии в разрядном канале описывается выражением:

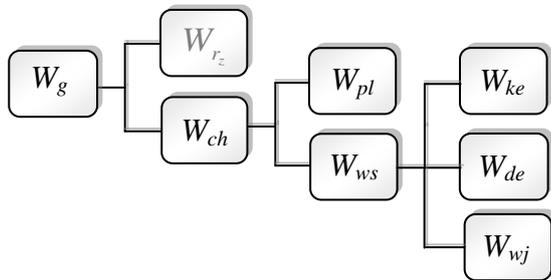
$$w(t) = \frac{W_{ch}(t)}{V_{ch}(t)}. \quad (9)$$

Радиальное распределение концентрации внутренней энергии в волне  $w_{de}(R)$  определяется соотношением:

$$w_{de}(R) = \frac{W_{de}(R)}{V_l(R)} = e(R) \cdot \rho(R). \quad (10)$$

Под концентрацией энергии понимается количество энергии  $W_{de}$ , сосредоточенное в слое материала объемом  $V_l(R)$ , ограниченном концентрическими поверхностями, длиной  $l_{ch}$ .

Таким образом, в основе модели электровзрыва лежит схема, отражающая основные этапы преобразования электрической энергии накопителя в энергию волновых возмущений, рис. 6.



**Рис. 6** – Схема преобразования энергии накопителя

Энергия накопителя  $W_g$  при разряде конденсатора частично расходуется в активном сопротивлении контура  $W_{rz}$  и, в основном, выделяется в разрядном канале  $W_{ch}$ . Энергия  $W_{ch}$  расходуется на нагрев плазмы  $W_{pl}$  и совершение работы по ее расширению  $W_{ws}$ , то есть в энергию ударной волны в твердом теле. Энергия волны трансформируется во внутреннюю энергию твердого тела (энергию всестороннего сжатия и энергию изменения формы тела)  $W_{de}$  и кинетическую энергию его движения

$W_{ke}$ . Часть энергии  $W_{wj}$  преломляется в жидкость при отражении волны от границы твердое тело – жидкость. Анализ схемы позволяет оценить затраты энергии на каждом этапе ее преобразования, выяснить основные ограничивающие закономерности и выявить пути рационального использования энергии волны.

### ***Импульсное деформирование упругопластической среды***

Для описания поведения твердого материала при распространении в нем волны напряжений используются уравнения для плоской деформации. Это оправдано благодаря тому, что длина канала всегда больше глубины его внедрения  $l_{ch} \gg h$ , тогда деформацией материала в направлении оси канала можно пренебречь. Соответствующие уравнения деформирования упругопластической среды в декартовой системе координат с осью ординат, перпендикулярной поверхности, и осью абсцисс, направленной параллельно поверхности и перпендикулярно оси канала (рис. 7), включают:

уравнение движения

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} = \rho \ddot{x}, \quad \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \ddot{y}, \quad (11)$$

$$\sigma_{xx} = S_{xx} - (P + q), \quad \sigma_{yy} = S_{yy} - (P + q), \quad \sigma_{zz} = S_{zz} - (P + q);$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \quad V = \frac{\rho_0}{\rho}; \quad (12)$$

уравнение внутренней энергии среды

$$\dot{e} = -(P + q) \dot{V} + V \cdot (S_{xx} \cdot \dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy} \cdot \dot{\epsilon}_{yy} + T_{xy} \cdot \dot{\epsilon}_{xy}); \quad (13)$$

искусственную квадратичную вязкость

$$q = C_0^2 \rho_0 \left( \dot{V} / V \right)^2 A_s / V; \quad (14)$$

соотношения для компонент девиатора напряжений  $S_{ij}$

$$\dot{S}_{xx} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{xx}, \quad \dot{S}_{yy} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{yy}, \quad (15)$$

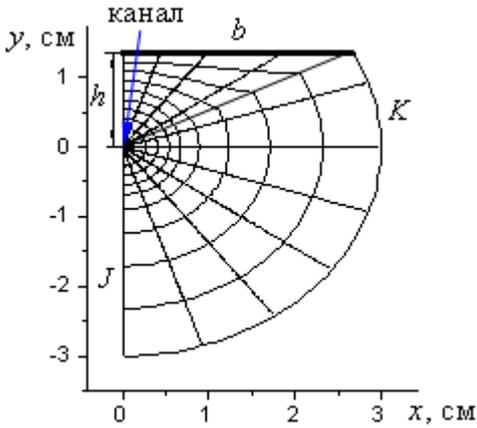
$$\dot{S}_{zz} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\dot{V}}{V}, \quad \dot{T}_{xy} = \mu \cdot \dot{\epsilon}_{xy} + \delta_{xy}$$

и скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}$

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}, \quad \dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \quad \dot{\varepsilon}_{xy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial y}; \quad (16)$$

условие текучести Мизеса

$$S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2T_{xy}^2 \leq \frac{2}{3}Y^2, \quad (17)$$



**Рис. 7** – Расчетная область:  $h$  – глубина внедрения канала,  $b$  – полуширина поверхности отражения,  $K$  – количество расчетных узлов в радиальном направлении,  $J$  – количество радиальных лучей

где  $x, y$  – 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  $OY$ ,  $\sigma_{zz}$  – 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,  $A_s$  – площадь ячейки;  $C_0$  – постоянная;  $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}$  – компоненты дивергента напряжений,  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$  – деформации,  $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{xy}$  – поправки на поворот элемента среды; точка означает дифференцирование по времени.

Начальными условиями уравнений (11)–(17) служат условия невозмущенной среды  $t=0$ :  $R \geq r_{ch0}$ ,  $\dot{x}(R) = \dot{y}(R) = 0$ ,  $P(R) = 0$ ,  $\rho(R) = \rho_0(R)$ ,  $\sigma_{xx}(R) = \sigma_{yy}(R) = \sigma_{zz}(R) = 0$ ,  $T_{xy}(R) = 0$ ,  $e(R) = 0$ , где  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Граничным условием – временная зависимость давления на стенке канала  $P_{ch}(t)$ , которая рассчитывалась итерациями из уравнения энергобаланса (6) и уравнений (11)–(17) для первой расчетной ячейки, примыкающей к каналу.

В качестве уравнений состояния твердого тела и воды, использовались баротропные зависимости:

$$P = \rho_0 c_0^2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \left/ \left[1 - s \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)\right]^2 \right., \quad (18)$$

$$P = A_l \left( \left(\frac{\rho_l}{\rho_{0l}}\right)^{n_l} - 1 \right), \quad (19)$$

где  $c_0$  – скорость распространения упругой волны,  $s, A_l, n_l$  – константы,  $\rho_{0l}, \rho_l$  – начальная и текущая плотности жидкости.

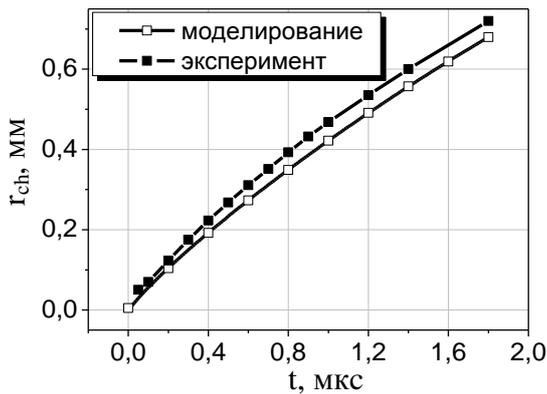
Для анализа напряженно-деформированного состояния в разных радиальных сечениях привлекались значения главных радиальных  $\sigma_R$  и тангенциальных  $\sigma_\tau$  напряжений, определяемых по соотношениям:

$$\sigma_R = \left( \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} + \frac{1}{2} \left[ (S_{xx} - S_{yy})^2 + (2T_{xy})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) - (P + q),$$

$$\sigma_\tau = \left( \frac{S_{xx} + S_{yy}}{2} - \frac{1}{2} \left[ (S_{xx} - S_{yy})^2 + (2T_{xy})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right) - (P + q). \quad (20)$$

На основе описанной модели был создан численный алгоритм, позволяющий проводить компьютерное моделирование взрыва. Электротехнические уравнения интегрировались неявным методом Эйлера с временным шагом  $\Delta t$ . Шаг по времени определялся из устойчивости схемы – по условию Куранта. Система уравнений модели (11)–(17) с начальными и граничными условиями решалась численно на основе конечно-разностной аппроксимации по

явной разностной схеме второго порядка точности с использованием искусственной вязкости Неймана–Рихтмайера для расчета фронта волны на 2-D расчетной сетке, рис. 7. Ось ординат является осью симметрии относительно канала. Отклонения канала в приэлектродных областях от положения, параллельного поверхности отражения, не учитывались. В окрестности канала с координатами его оси  $x=0$ ,  $y=0$  расчетные ячейки максимально соответствуют цилиндрической форме канала. Вблизи поверхности  $y \approx h$  форма ячеек адаптирована к описанию отражения волны от поверхности соответствующей формы. Выбор параметров расчетной сетки подчиняется следующим требованиям:  $b \geq 2h$ ,  $J=80-100$  (количество лучей по углу раствора),  $K = h/r_{ch0} = 800-1600$  (количество расчетных узлов в радиальном направлении), где  $b$  – полуширина поверхности отражения,  $h$  – глубина внедрения канала,  $r_{ch0}$  – начальный радиус канала, равный в расчетах 5 мкм. Эти требования позволяли при счете удерживать дисбаланс между работой, совершаемой каналом, и энергией волны в пределах менее 2%. Параметры



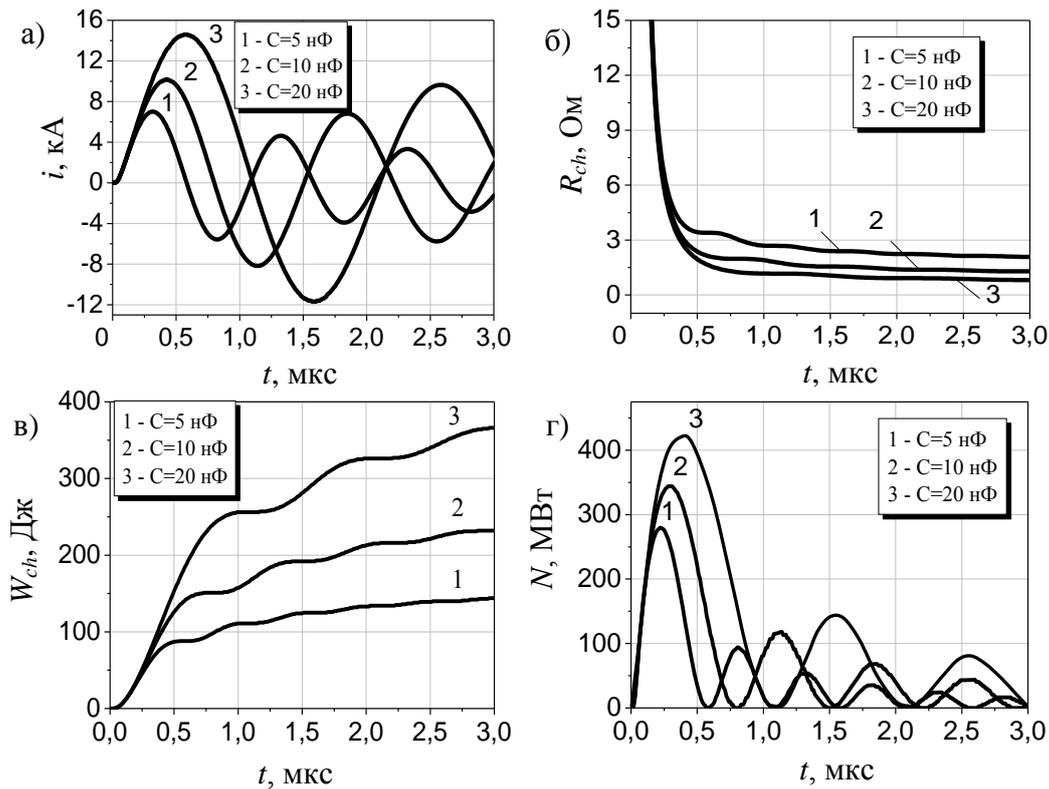
**Рис. 8** – Временные зависимости экспериментального и расчетного радиусов канала в KCl при камуфлетном режиме энерговода при  $U_0=70$  кВ,  $C=0,35$  мкФ,  $L=3,2$  мкГн

механических напряжений и деформаций, оценить объем откольной каверны, сформированной внедренным каналом и энергоемкость разрушения.

**В третьей главе** приводится анализ результатов численных исследований динамики преобразования энергии накопителя в волну, процессов волновой динамики и формирования поля механических напряжений при электровзрыве в твердом теле, погруженном в жидкость.

**Исследования энергетических характеристик электровзрыва при пробое твердого тела, помещенного в жидкость.** Разрушающий эффект определяется максимальным давлением, развиваемым в плазменном канале, энергией волны и полем растягивающих механических напряжений. Оценка энергобаланса по схеме на рис. 6 позволяет оценить пути повышения эффективности всех стадий преобразования энергии, факторы, влияющие на перераспределение энергии между разрядным контуром, плазменным каналом и волной, возможные пути рационального использования энергии волны в широком спектре энергетических режимов.

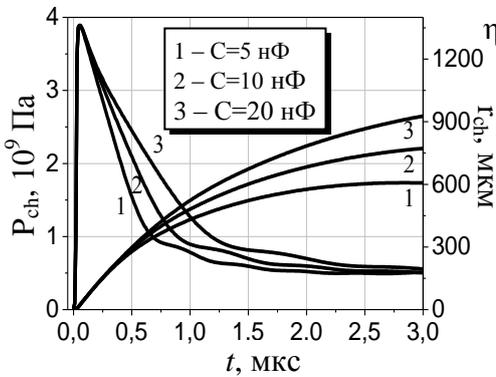
В момент замыкания межэлектродного промежутка разрядным каналом (рис. 5) в среде существует канал, радиусом  $r_{ch0}$ , в плазму которого вводится энергия из конденсатора  $C$ . В результате джоулева тепловыделения внутренняя энергия и проводимость канала возрастают, что приводит к росту тока (рис. 9, а, б). Положительная обратная связь между тепловыделением и проводимостью вызывает нарастание внутренней энергии плазмы в канале (рис. 9, в, г). Мощность энерговыделения достигает  $4 \cdot 10^8$  Вт. Взрывное выделение энергии в канале приводит к резкому росту давления в канале до  $\sim (3-4)$  ГПа, вызывающему его расширение (рис. 10). Давление в канале существенно нестационарно, увеличение объема канала приводит к снижению давления, и, как следствие, к замедлению его расширения (рис. 10). Скорость снижения давления зависит от динамики выделения энергии в канале.



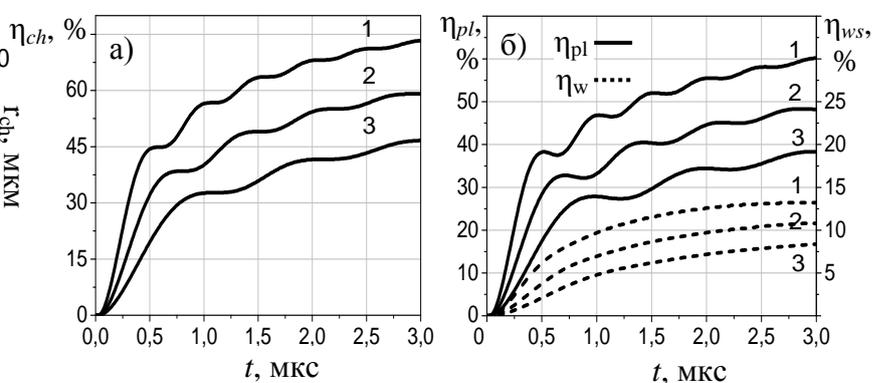
**Рис. 9** – Временные зависимости тока  $i$  (а), сопротивления канала  $R_{ch}$  (б), выделенной в канале энергии  $W_{ch}$  (в) и мощности энерговыделения в канале  $N$  (г) при  $U_0=280$  кВ,  $L=5$  мкГн

Изменения тока и напряжения приводят к колебаниям мощности энерговода в нелинейном сопротивлении канала. Порядка (30–50) % энергии емкостного накопителя выделяется в канале в течение первого полупериода колебаний тока. Омические потери к этому времени в рассматриваемом контуре ( $r_z=1$  Ом) не превышают  $\sim$  (7–15) % от запасенной энергии. Дальнейшие колебания энерговыделения оказывают меньшее влияние на давление и радиус канала.

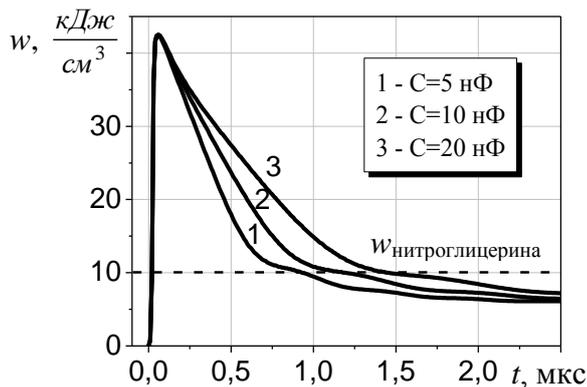
Величины энергии волны  $W_{ws}$  и коэффициента преобразования энергии накопителя в энергию ударно-волнового возмущения  $\eta_{ws}$  зависят от скорости ввода энергии в плазменный канал, длины канала, физико-механических и электрофизических свойств разрушаемого материала. Временные зависимости энерговыделения в канале  $\eta_{ch}(t)$  и распределение этой энергии между плазмой  $\eta_{pl}(t)$  и ударной волной  $\eta_{ws}(t)$  для трех характерных режимов разряда при постоянном активном сопротивлении разрядной цепи приведены на рис. 11.



**Рис. 10** – Временные зависимости давления в канале  $P_{ch}$  и радиуса канала  $r_{ch}$  при  $U_0=280$  кВ,  $L=5$  мкГн



**Рис. 11** – Временные зависимости коэффициентов преобразования запасенной накопителем энергии  $W_g$  в энергию канала  $\eta_{ch}$  (а), разрядной плазмы  $\eta_{pl}$  и ударной волны  $\eta_{ws}$  (б) при  $U_0=280$  кВ,  $L=5$  мкГн,  $C$ , нФ: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 20

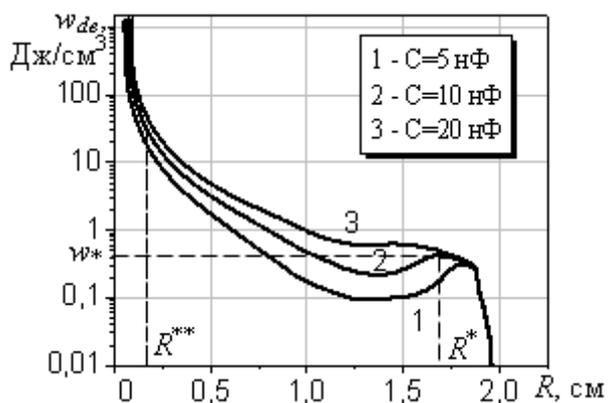


**Рис. 12** – Временные зависимости плотности энергии в канале  $w$  при  $U_0=280$  кВ,  $L=5$  мкГн

Анализ распределения энергии, выделенной в канале, между плазмой и ударной волной (рис. 11, б) показывает, что разрядный канал излучает интенсивные волновые возмущения лишь на начальном этапе его расширения. Последующие токовые пульсации слабо влияют на энергию волны. Это следует из рис. 9, г и рис. 12, где приведены динамика изменения мощности  $N$  и объемной плотности энергии  $w(t)$  в канале. Для сравнения приведена объемная плотность энергии нитроглицерина  $w_n \approx 10$  Дж/см<sup>3</sup> (штриховая линия).

Приведенные зависимости показывают, что электровзрыв за счет малых размеров канала позволяет развить высокую мощность и плотность энергии в канале в начальной стадии энерговыделения. В это время канал интенсивно расширяется и генерирует в окружающую среду волну механических напряжений. С увеличением радиальных размеров канала его сопротивление  $R_{ch}$  уменьшается, снижается ток в цепи. В результате падает мощность энерговода в канал, уменьшается объемная плотность энергии в нем, и канал теряет свойства источника взрывной нагрузки, т.е. для увеличения  $\eta_{ws}$  необходимо добиваться высокой плотности энергии в разрядном канале. Последнее требует использования низкоиндуктивных генераторов с малым периодом колебаний разрядного тока.

В рассмотренных режимах коэффициент преобразования энергии генератора в энергию волны не превышал 15 % (рис. 11, б). Определяющим фактором этого показателя является низкая величина  $\gamma$ . В начальной стадии разряда величина  $\gamma$  может достигать значений  $\sim 1,25$ – $1,2$ , но по мере нагрева плазмы  $\gamma$  существенно снижается. Относительно низкий уровень величины  $\gamma$  обусловлен высокой температурой плазмы канала до  $3 \cdot 10^4$  К, которая стимулирует энергоемкие процессы диссоциации и ионизации молекул вещества. В результате большая часть энергии, вводимой в канал, расходуется на формирование и поддержание плазменного канала, а меньшая реализуется в энергию ударной волны.



**Рис. 13** – Радиальное распределение концентрации энергии в волне в момент времени  $t=3$  мкс при  $U_0=280$  кВ,  $L=5$  мкГн

Количество и протяженность радиальных трещин в основном будут определяться характером распределения энергии в волне. Для роста трещины необходим приток энергии в ее устье из окружающего материала. На рис. 13 приведены типичные радиальные распределения концентрации энергии  $w_{de}(R)$  в волне для трех режимов разряда. Наибольшая концентрация энергии деформирования (до 80 %) сосредоточена в области  $r_{ch} < R < R^{**} = 2$  мм. Превышение в этой области сжимающими напряжениями, вызванными распространением волны, предела прочности материала на сжатие и высокая концентрация энергии приводят к раздавливанию материала. Образование области

раздавливания, особенно на ранних стадиях разряда ( $t < T_{05}$ ), существенно осложняет преобразование энергии канала в энергию волны. По мере удаления от канала концентрация энергии в волне снижается. Этой энергии становится уже недостаточно для реализации механизма раздавливания, и картина разрушения меняется: формируется сетка радиальных трещин. Если уровень энергии – ниже величины эффективной энергии  $w^*$ , необходимой для

образования новых поверхностей, приток энергии в устье трещины будет недостаточен, и ее рост, вызванный прохождением прямой волны на расстоянии  $R^*$  от канала (рис. 13), прекратится. В области деформирования материала  $R^{**} = 2 \text{ мм} \leq R \leq R^*$ , где  $w \approx n \cdot w_*$ , возможно прораствание  $n$  трещин.

К сожалению, в литературе отсутствуют опытные данные по поверхностной энергии, величину  $w_*$  можно определить лишь экспериментальным путем, что для горных пород является весьма трудоемкой задачей и сдерживает численный анализ процесса трещинообразования при электровзрыве в твердых материалах.

Дополнительная подпитка устьев прорастающих трещин может осуществляться энергией волны, отраженной от границы твердого тела с жидкостью. При достижении распространяющейся в твердом теле волной границы с жидкостью, волна частично отражается в твердое тело и преломляется в воду. Основная доля энергии падающей волны преобразуется в энергию отраженной волны и остается в твердом теле. Меньшая часть трансформируется в волну, распространяющуюся в жидкости (около 2 % от  $W_g$ ), благодаря меньшей акустической жесткости воды.

Известно, что чем ближе режим энерговвода в разрядный канал к критическому, когда  $R \approx 2\sqrt{L/C}$  ( $R$  – суммарное сопротивление нагрузки и искры коммутатора), тем эффективнее происходит энерговыделение в сопротивлении плазменного канала. Изменение величины  $R$  возможно благодаря увеличению в определенном диапазоне длины разрядного промежутка. Этот путь позволяет не только снизить потери энергии на истечение продуктов канала из приэлектродных областей, но и увеличить долю энергии, вводимой в канал, и, соответственно, энергию волны, разрушающей материал. В выполненных расчетах при увеличении  $l_{ch}$  от 1 до 3 см к окончанию первой осцилляции тока  $T_{05}$  значение  $\eta_{ws}$  возрастало в среднем на 8 % или в 2,5 раза.

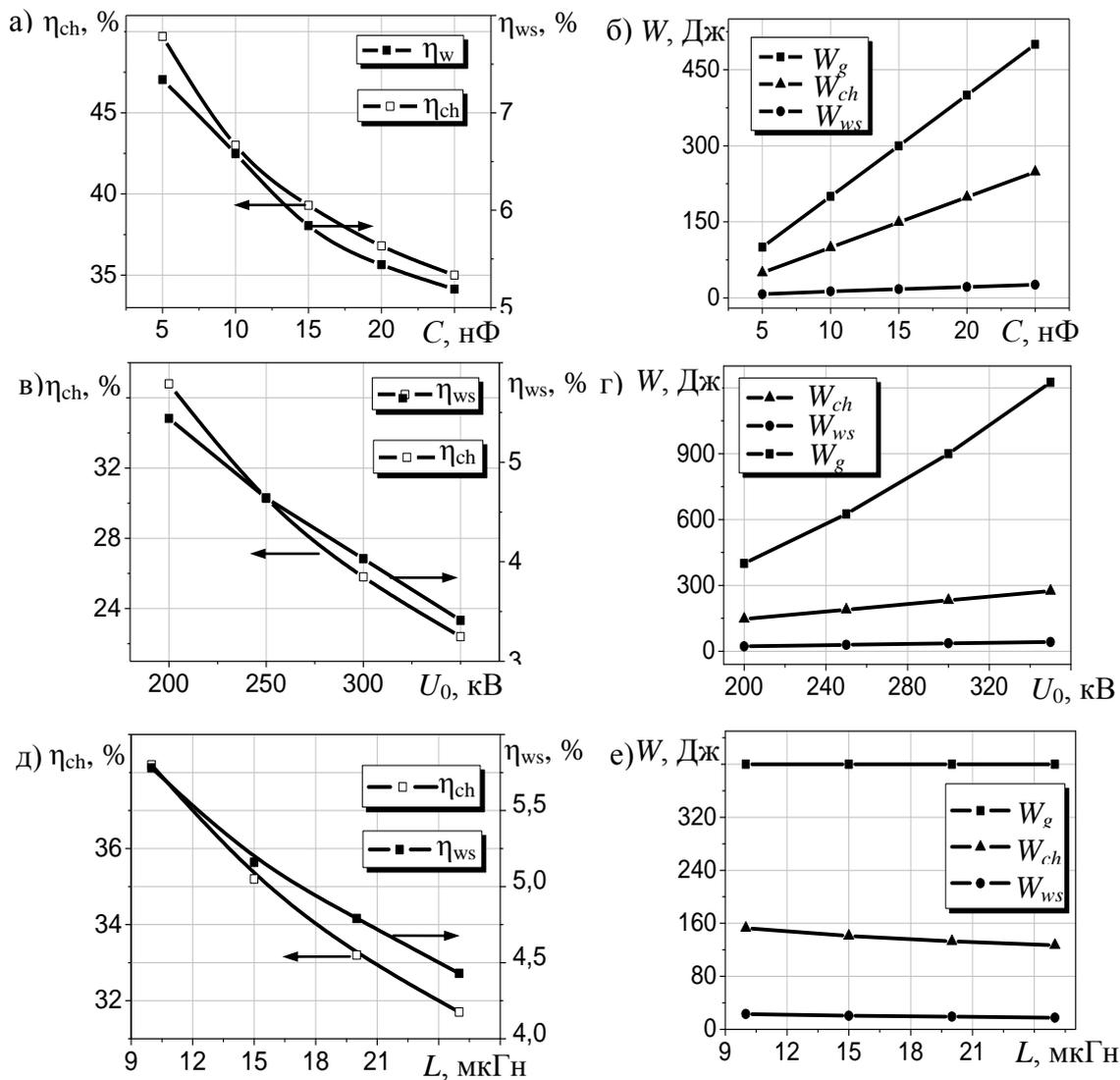
Для определения влияния параметров разрядного контура импульсного генератора на эффективность преобразования электрической энергии в энергию канала и ударной волны были проведены серии компьютерных экспериментов, результаты которых представлены на рис. 14. Увеличение энергозапаса накопителя за счет его емкости или зарядного напряжения в интервале времени  $t \leq T_{05}$  приводит к снижению эффективности преобразования энергии в энергию канала и волны, рис. 14, а, в. Увеличение индуктивности приводит к аналогичным результатам. При повышении  $U_0$  в 1,75 раза  $\eta_{ch}$  снижается в 1,7, а  $\eta_{ws}$  – в 1,6 раза; увеличение  $C$  в 5 раз приводит к снижению  $\eta_{ch}$  и  $\eta_{ws}$  в 1,4 раза; при изменении индуктивности в 2,5 раза  $\eta_{ch}$  уменьшается в 1,2, а  $\eta_{ws}$  – в 1,3 раза. Полученные закономерности обусловлены тем, что задаваемый за счет увеличения  $C$  и  $U_0$  рост энергии накопителя  $W_g$  существенно опережает соответствующее увеличение энергии, вводимой в канал  $W_{ch}$ , а также прирост энергии волны  $W_{ws}$  в течение  $t \leq T_{0,5}$ , рис. 14 б, г, е.

Выполненный анализ энергетических характеристик электровзрыва в твердых диэлектриках показал:

- плазменный канал эффективно преобразует энергию генератора в энергию волны в твердом теле в течение первой осцилляции разрядного тока. На этом этапе развивается максимальная мощность энерговыделения в канале, достигается высокая объемная плотность энергии, вводимой в него и, канал, интенсивно расширяясь, эффективно совершает работу над окружающей средой;

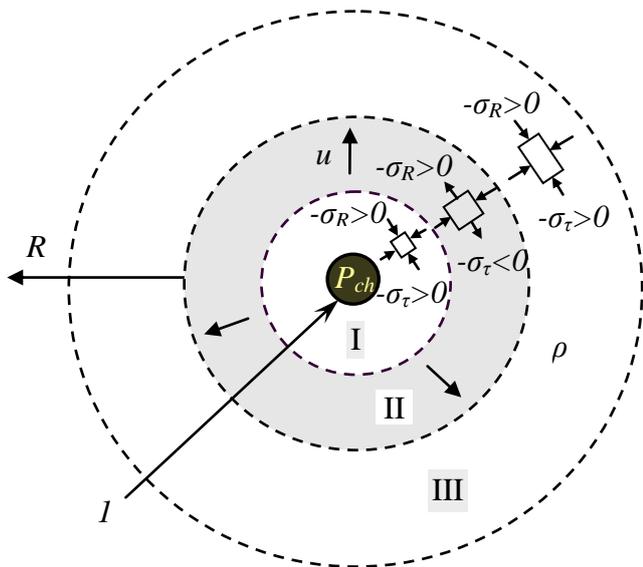
- величина коэффициента преобразования энергии контура в энергию волны не превышает ~(10–20) % и лимитируется высокой температурой плазмы;

- генеральная картина разрушения определяется радиальным распределением энергии в волне: высокая концентрация энергии в окрестности канала способствует раздавливанию материала, а снижение концентрации энергии в волне на периферии образует лишь одну или несколько радиально ориентированных трещин.



**Рис. 14** – Влияние параметров разрядного контура генератора: емкости (а, б), зарядного напряжения (в, г), индуктивности (д, е) на эффективность преобразования накопленной электрической энергии в энергию канала  $\eta_{ch}$  и волны  $\eta_{ws}$  (а, в, д) и энергетические характеристики (б, г, е)

**Исследование волновой динамики при электровзрыве.** В зависимости от режима энерговода (количества энергии и мощности ее ввода в канал) формируемое волной поле механических напряжений вокруг канала различается не только интенсивностью, но и характером распределения напряжений в волне. Например, при запасаемой в генерирующей емкости энергии  $\sim(100-200)$  Дж и мощности ее ввода в канал  $\sim(200-300)$  МВт в прочных материалах распределение напряжений в волне схематично отражает рис. 15. Вблизи канала (область I, радиальный размер которой не превышает  $\sim(2-3)$  мм) радиальные  $\sigma_R$  и тангенциальные  $\sigma_\tau$  напряжения сжимающие, здесь происходит раздавливание материала за счет его сжатия. Чем интенсивнее режим энерговыделения в канале, тем больше размеры этой области. По мере распространения волны тангенциальные напряжения  $\sigma_\tau$  в области II становятся растягивающими. Эта область, возникая около канала, по мере распространения фронта волны перемещается на периферию и создает условия для зарождения трещин. При интенсивном энерговыделении растягивающими становятся и радиальные напряжения. В головной части волны (область III)  $\sigma_R$  и  $\sigma_\tau$  сжимающие. С увеличением энергии, вводимой в канал, и времени ее ввода размеры области I растут, а область II либо проявляется значительно позднее, либо может проявиться только в результате отражения волны от границ твердого тела.



**Рис. 15** – Распределение радиальных  $\sigma_R$  и тангенциальных  $\sigma_\tau$  напряжений в поперечном сечении в окрестности канала,  $\rho$  – плотность материала,  $u$  – массовая скорость,  $I$  – плазменный канал, I – область пластического деформирования, II – область растягивающих тангенциальных напряжений, III – область распространения упругой волны

пластической и упругой волны за счет дивергенции заметно снижаются.

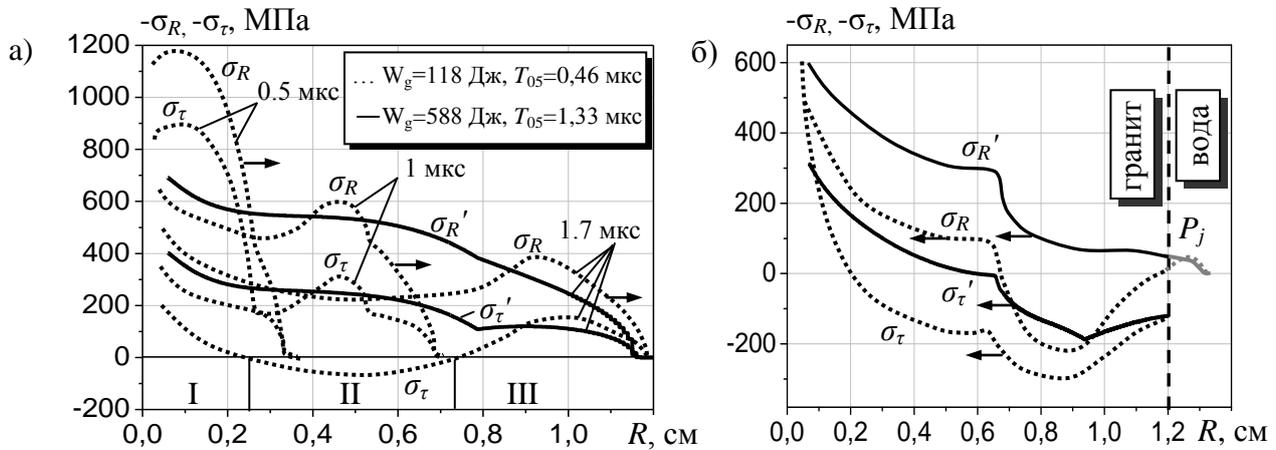
Относительно низкоэнергетичные и "быстрые" ( $T_{05} \sim \pi\sqrt{LC} \sim (0,5-1)$  мкс) режимы ввода энергии в канал генерируют волны, которые, распространяясь, обычно образуют три характерные области на эпюре напряжений, согласно рис. 15. В окрестности канала радиальные  $\sigma_R$  и тангенциальные  $\sigma_\tau$  напряжения сжимающие (рис. 16, а, область I), их уровень превышает предел статической и даже динамической прочности твердого тела и вызывает раздавливание материала. В области II тангенциальные напряжения в волне (рис. 16, а, кривая  $\sigma_\tau$ ) становятся растягивающими. Их наибольшие значения достигаются в окрестности внешнего радиуса области возможного раздавливания материала. Превышение растягивающими тангенциальными напряжениями предельных напряжений материала на разрыв приводит к образованию радиальных трещин уже в прямой волне, которые будут прорасти в направлении распространения волны. В головной части волны (область III на рис. 16, а) напряжения  $\sigma_R$  и  $\sigma_\tau$  – сжимающие, но их амплитуда значительно ниже, чем в окрестности канала.

Увеличение энергозапаса накопителя за счет изменения его емкости приводит к более длительным разрядам ( $T_{05} \sim \pi\sqrt{LC} \sim (2-10)$  мкс). При таких режимах область растягивающих тангенциальных напряжений до выхода волны на границу твердого тела развиваться не успевает (рис. 16, а, кривая  $\sigma_\tau$ ). В этих случаях картина разрушения будет определяться результирующим напряженно-деформированным состоянием материала, сформированным при взаимодействии прямой и отраженной от границы твердое тело–жидкость волн.

Эволюцию волновой картины при отражении от поверхности тела показывают эпюры напряжений и формирующаяся волна давления в жидкости  $P_j$  на рис. 16, б. При отражении волны от границы раздела сред эпюра растягивающих тангенциальных напряжений закрывает практически всю рассматриваемую область твердого диэлектрика. Тем самым при меньшем энергокладе в канал реализуются благоприятные условия для формирования сетки радиальных трещин практически во всей рассматриваемой области твердого тела. В случае рис. 16, б (кривая  $\sigma_R$ ), область возможного раздавливания материала в окрестности канала

Анализ результатов моделирования показал, что в зависимости от количества энергии, мощности ее ввода в канал и характеристик генерируемой волны возможны различные варианты формирования поля напряжений и деформаций в материале. Рис. 16 иллюстрирует эволюцию быстро изменяющегося во времени поля механических напряжений вокруг канала перед выходом волны на границу гранит–вода (рис. 16, а) и при отражении от нее (рис. 16, б). Здесь и ниже прогноз картины разрушения осуществлялся на основе анализа главных напряжений, действующих на площадках, перпендикулярных направлению распространения волны ( $\sigma_R$ ) и параллельных ему ( $\sigma_\tau$ ). Видно, что в окрестности канала величина напряжений во фронте волны достигает (900–1200) МПа. По мере распространения волны ее фронт трансформируется в двухволновую (упругопластическую) структуру. При этом амплитуды

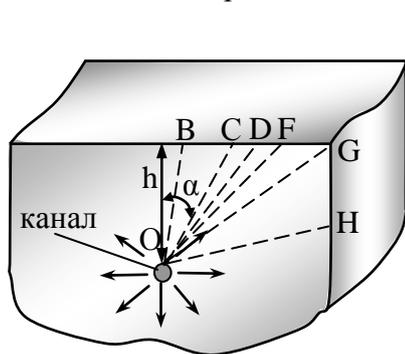
увеличивается, но условия, стимулирующие развитие радиальных трещин, менее выражены: область растягивающих напряжений возникает позднее, у внешней границы твердого тела и расширяется в направлении канала. Эта ситуация вызвана избытком энергии в разряде. Отметим, что, несмотря на малые размеры, область возможного раздавливания материала вблизи канала аккумулирует значительную долю энергии волны – до 80 %.



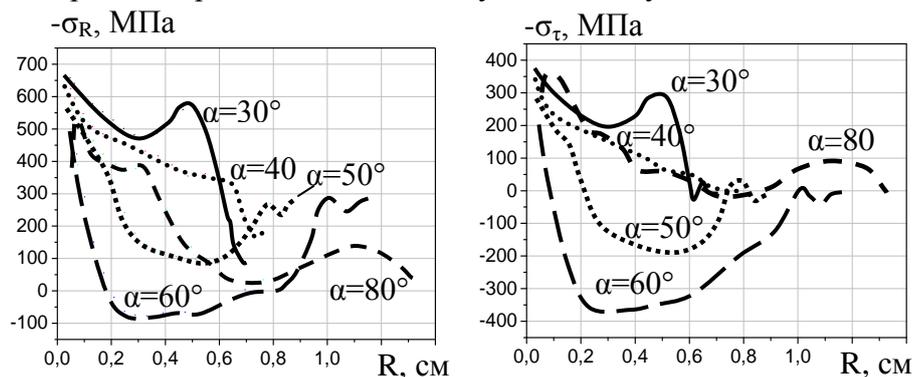
**Рис. 16** – Эпюры радиальных  $\sigma_R$ ,  $\sigma_R'$  и тангенциальных  $\sigma_\tau$ ,  $\sigma_\tau'$  напряжений в волне;  $U_0=280$  кВ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_\tau - W_g=118$  Дж,  $T_{05}=0,46$  мкс,  $\sigma_R'$ ,  $\sigma_\tau' - W_g=588$  Дж,  $T_{05}=1,33$  мкс; а) –  $t$ , мкс: 1 – 0,5 мкс, 2 – 1 мкс, 3 – 1,7 мкс, б) –  $t=2,5$  мкс (после отражения)

Волну, преломленную в жидкость (рис. 16, б, кривая  $P_j$ ), в дальнейшем анализе можно не учитывать, так как ее амплитуда гораздо ниже по сравнению с волной в твердом теле. Аналогичный вывод был сделан на основании энергетических параметров волны в жидкости.

Анализ динамики изменения механических напряжений и деформаций для системы наложенных на поверхность твердого тела электродов (рис. 3, б) проводился в разных сечениях материала, расположенных под углом к нормали  $\alpha$ , рис. 17. Эволюция волновой картины в разных сечениях гранита приведена на рис. 18. Уровень растягивающих радиальных напряжений  $\sigma_R$  значительно ниже растягивающих тангенциальных напряжений  $\sigma_\tau$ . Максимальные растягивающие напряжения развиваются вдоль луча OG под углом  $\alpha=60^\circ$ .



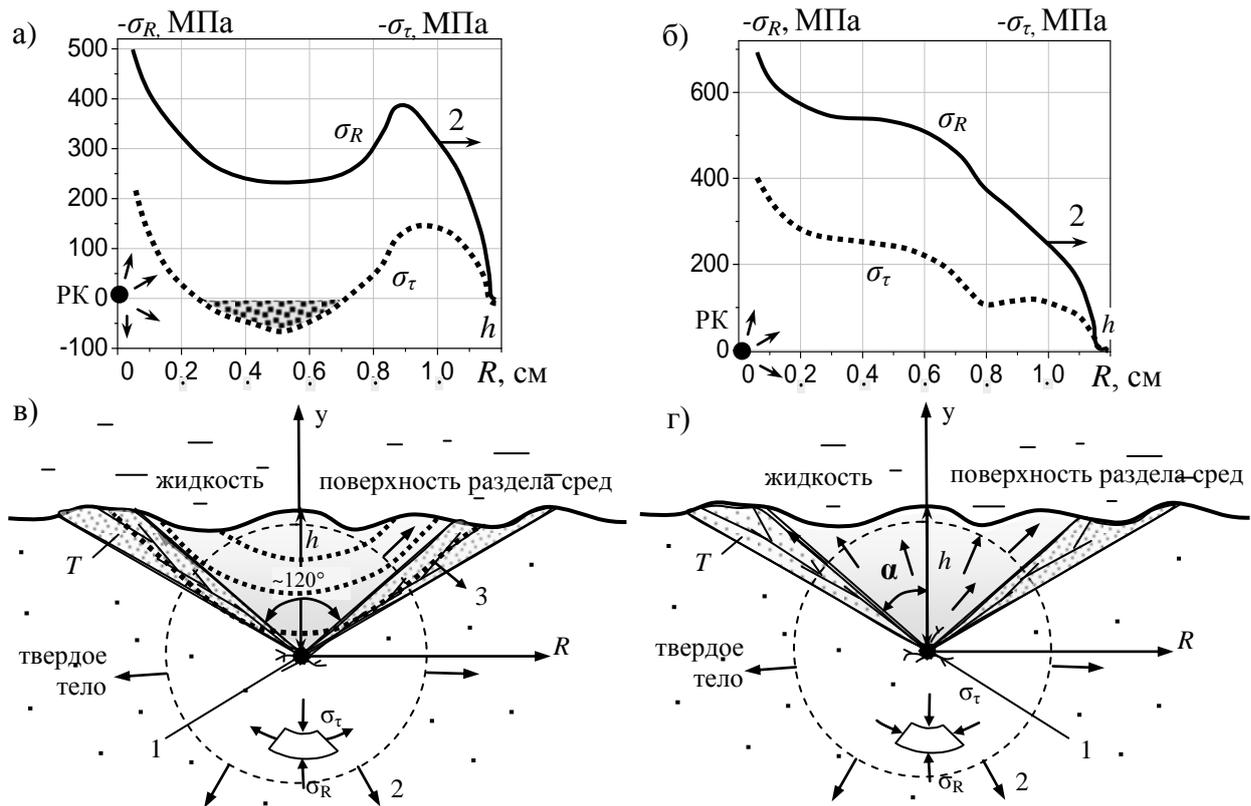
**Рис. 17** – Схема расположения сечений, вдоль которых проводится анализ динамики напряжений и деформаций в твердом теле



**Рис. 18** – Распределение радиальных  $\sigma_R$  и тангенциальных  $\sigma_\tau$  напряжений волне в разных сечениях под углом  $\alpha$  в момент выхода волны на поверхность твердого тела,  $C=5$  нФ,  $L=5$  мкГн,  $U_0=280$  кВ,  $l_{ch}=2$  см,  $h=0,6$  см

Анализ результатов моделирования для плоской поверхности отражения показал, что в зависимости от условий энерговода в канал можно выделить два характерных варианта развития волнового процесса (рис. 19) и, соответственно, два возможных механизма разрушения материала. Быстрый ввод энергии малоиндуктивным генератором (когда

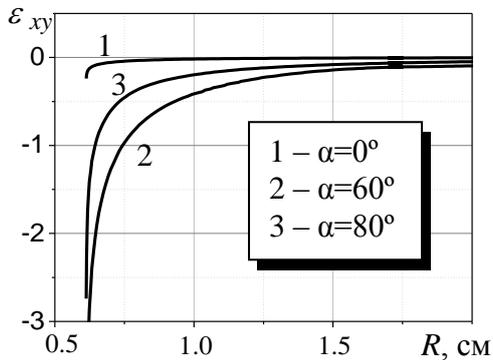
полупериод разрядного тока  $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} < 1$  мкс) даже при  $W_g \sim 20$  Дж позволяет сформировать в прямой волне наряду с областью пластического деформирования материала область растягивающих тангенциальных напряжений (рис. 19, а). Радиус области растягивающих напряжений по мере распространения волны увеличивается. При отражении такой волны от поверхности в радиальных сечениях  $T$ , угол раствора которых  $2\alpha \approx 100^\circ - 120^\circ$ , растягивающие напряжения, действующие на площадках, параллельных этим сечениям, становятся наибольшими. Этот эффект обусловлен суперпозицией прямой и отраженной волн, при которой растягивающие напряжения  $\sigma_\tau$  в прямой волне и растягивающие напряжения  $\sigma_R$  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.



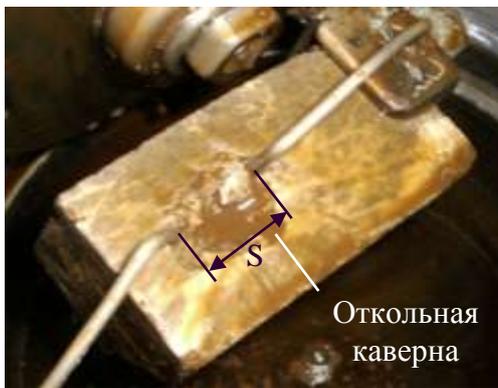
**Рис. 19** – Поперечные сечения разрядного канала (в, г) и профили волн механических напряжений в сечениях  $T$  (а, б) в момент времени  $t=1,7$  мкс при глубине внедрения канала  $h=6$  мм: а), в) – "быстрый" режим ввода энергии ( $W_g=118$  Дж,  $T=0,46$  мкс), б), г) – "медленный" режим ввода энергии ( $W_g=588$  Дж,  $T=1,33$  мкс); 1 – разрядный канал (РК); 2 – прямая волна; 3 – волна, отраженная от границы диэлектрика;  $\sigma_R$ ,  $\sigma_\tau$  – радиальное и тангенциальное напряжения;  $T$  – области наиболее вероятного формирования трещин

При медленном вводе энергии в разрядный канал (полупериод разрядного тока  $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} > (2-10)$  мкс), характерном для более энергетичных режимов энерговывода, или при небольшом заглублении канала ( $h \leq 5$  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 (рис. 19, б). Реакция материала, находящегося над каналом, на такой тип воздействия выражается в перемещении части материала в направлении поверхности. В сечениях  $T$ , разграничивающих перемещаемую часть и неподвижный массив материала, расположенных под углом  $\alpha$  к оси ординат (рис. 19, б), 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  $\varepsilon_{xy}$ , вызванных наибольшими касательными напряжениями в прямой волне. Роль отраженных волн в данном случае второстепенна.



**Рис. 20** – Зависимость деформаций сдвига от расстояния  $R$  ( $t=1,7$  мкс,  $h=6$  мм,  $W_g=588$  Дж,  $T=1,33$  мкс) в разных сечениях



**Рис. 21** – Откольная каверна в результате электровзрыва в песчанике<sup>3</sup>

Откольная каверна аппроксимировалась полуэллипсоидом длиной  $l_{ch}$ , полуоси которого соответствуют сечениям, образованным плоскостями наиболее вероятного образования трещин  $T$  (рис. 19). Результаты расчетов для двух режимов ввода энергии: "быстрый" при  $W_g=118$  Дж,  $T_{05}=0,46$  мкс и "медленный" при  $W_g=588$  Дж,  $T_{05}=1,33$  мкс позволили оценить объем образованной каверны величиной  $V_c \approx 0,94$  см<sup>3</sup>. Глубина внедрения канала  $h$  в обоих случаях составляла 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>. Меньшая энергоемкость "быстрых" режимов разряда, обеспечивающих большую мощность введенной энергии, обусловлена разрушением за счет растягивающих напряжений, предельные значения которых меньше, чем при сдвиге.

При варьировании параметров цепи и величины  $h$  было показано, что механизм сдвигового разрушения становится основным с увеличением энергии емкостного накопителя, ростом длительности энергопровода и при заглублениях канала  $h \leq 6$  мм.

На рис. 20 приведены расчетные значения деформаций сдвига  $\varepsilon_{xy}$  в элементах среды, расположенных в различных сечениях. Сравнение полученных распределений показывает, что наибольшие значения  $\varepsilon_{xy}$  достигаются в сечениях, расположенных вдоль  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$  под углами  $\sim 50^\circ - 60^\circ$  относительно оси  $OY$ . Следовательно, при медленном вводе энергии именно в этих сечениях произойдет образование трещин, соединяющих область раздавливания материала вблизи канала с поверхностью.

В обоих рассмотренных случаях, несмотря на различия механизмов разрушения, прогнозируемые поперечные размеры откольных каверн отличаются слабо, так как значения углов максимальных напряжений разнятся примерно на  $20^\circ$ . Отметим, что и в физических экспериментах при  $T_{05} \geq 1$  мкс откол чаще происходит в виде одного или нескольких кусков лещадной формы, рис. 21.

Оптимизация режима ввода энергии в канал дает значительные перспективы для улучшения энергетических показателей разрушения материала при электровзрыве в нем. Для сравнения энергоемкостей разрушения при двух режимах энергопровода в канал (рис. 19) рассчитаны объем сформированной каверны  $V_c$  при электровзрыве и удельная энергия разрушения  $W_{sc} = W_g / V_c$ , где  $W_g$  – энергия, запасаемая емкостным накопителем.

<sup>3</sup> В.Ф. Важов, Р.Р. Гафаров, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков, В.В. Лопатин, В.М. Муратов, В. Jeffryes Разрушение горных пород разрядами при повышенных давлениях и температурах // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 8. – С. 79–85.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана количественная физико-математическая модель электровзрыва в твердых телах, взаимосогласованно описывающая работу высоковольтного импульсного генератора, расширение плазменного канала, генерацию и распространение ударно-волновых возмущений, формирование поля механических напряжений и упругопластических деформаций в разрушаемом твердом теле. На основе конечно-разностной дискретизации уравнений модели создан численный алгоритм и программное обеспечение, позволяющее исследовать весь комплекс явлений при электровзрыве.
2. На первых осцилляциях разрядного тока развивается максимальная мощность энерговыделения в канале (300–400 МВт), достигается высокая объемная плотность введенной энергии (до 30–35 кДж/см<sup>3</sup>) и канал, интенсивно расширяясь, генерирует ударную волну. В дальнейшем эффективность его работы как источника ударно-волновых возмущений значительно снижается из-за снижения плотности энергии.
3. Характерная величина коэффициента преобразования энергии контура в энергию волны составляет ~ (5–20) %. Повышение коэффициента преобразования энергии лимитирует высокая температура продуктов канала, стимулирующая протекание энергоемких процессов диссоциации и ионизации, на которые расходуется большая часть вводимой в канал энергии.
4. Генеральная картина разрушения определяется радиальным распределением энергии в волне. Высокая концентрация энергии в окрестности канала (свыше 100 Дж/см<sup>3</sup>) способствует раздавливанию материала, а снижение на периферии обеспечивает образование радиально ориентированных трещин.
5. Установлена связь между параметрами генератора, давлением плазменного канала и профилем волн упругопластических напряжений и деформаций в разрушаемом материале. Уменьшение времени энерговода в разрядный канал приводит к увеличению коэффициента преобразования энергии генератора в энергию волны и развитию области растягивающих напряжений. При этом уровень сжимающих напряжений вблизи канала достигает ~1200 МПа, снижаясь на периферии до ~100 МПа. При отражении от поверхности уровень растягивающих напряжений может достигать (300–400) МПа.
6. Формирование откольной каверны на поверхности твердого тела при электровзрыве осуществляется по разным механизмам в зависимости от скорости ввода энергии в канал. Быстрый ввод энергии в канал ( $T_{05} \approx \pi\sqrt{LC} < 1 \text{ мкс}$ ) обеспечивает формирование каверны результирующими растягивающими тангенциальными напряжениями при интерференции прямой и отраженной от поверхности волн с минимальными затратами энергии на разрушение материала (~125 Дж/см<sup>3</sup>). При медленном вводе энергии в канал откольная каверна образуется за счет деформаций сдвига в прямой волне. Влияние отраженной волны в механизме формирования каверны в этом случае менее значимо. Энергозатраты на разрушение при медленном режиме энерговода выше (~ 625 Дж/см<sup>3</sup>), чем при быстром вводе энергии.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Моделирование электровзрыва в твердых диэлектриках в электроразрядных технологиях // Известия Томского Политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 70–75.
2. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Энергетические характеристики электровзрыва в твердых телах // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 10. – С. 192–195.
3. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Анализ механизмов разрушения горных пород в электроразрядном бурении // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 11. – С. 507–510.
4. Кузнецова Н.С., Буркин В.В., Лопатин В.В., Панов В.А. Анализ энергетических параметров расширения плазменных каналов в конденсированных твердых материалах // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 9. – С. 376–379.

5. Кузнецова Н.С., Буркин В.В., Голодников В.В., Перков В.В. Акустические возмущения в конденсированных средах при инициировании разряда электровзрывом проводника // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 9. – С. 372–375.
6. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 5. – С. 42–48.
7. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Влияние режима энерговода в разрядный канал на эффективность электровзрывного разрушения твердых тел // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 8/2. – С. 268–271.
8. Burkin V.V., Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids: I. Power characteristics of electro burst // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – № 18. – pp. 185204.
9. Burkin V.V., Kuznetsova N.S., Lopatin V.V. Dynamics of electro burst in solids. II. Characteristics of wave process // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2009. – Vol. 42. – № 23. – pp. 235209.
10. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Образование откольной каверны при электровзрыве в диэлектрике // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т. 51. – № 1. – С. 162–172.