## Введение

В настоящее время известно несколько десятков способов разрушения твердых тел (в том числе горных пород). Основными из них и самыми распространенными являются взрывной (разрушение протекает под действием энергии взрывчатых веществ) и механический (путем воздействия на твердые тела породоразрушающего инструмента) методы. Однако, несмотря на различные достоинства этих методов, они имеют и ряд недостатков, которые не удовлетворяют всем требованиям и потребностям эксплуатации. Поэтому чрезвычайно актуальной проблемой является разработка новых эффективных, экологически безопасных методов и технологий для разрушения твердых тел.

Большую популярность приобретает способ электроразрядного разрушения, который обладает некоторыми преимуществами по сравнению с традиционными (взрывным и механическим) методами, такими как:

- избирательность разрушения;
- минимальное загрязнение получаемых продуктов “аппаратурным” металлом;
- отсутствие износа породоразрушающего инструмента;
- возможность регулирования в процессе проведения разрушений величины и скорости выделяемой энергии, а соответственно и характеристик разрушения;
- отсутствие бризантности;
- отсутствие выделения вредных веществ;
- обеспечение заданного, направленного откола.

Универсальность и эффективность применения электроразрядного способа для разрушения особо крепких горных пород отображает тот факт, что при многократном отличии прочности материалов на сжатие их электрическая прочность практически не отличается, например, в случае кварцита и песчаника.

В данной работе рассмотрен способ электроразрядного откола, при котором разрядный канал формируется при микровзрыве проводника в шпуре. Электровзрыв проводника является наилучшей заменой взрыва взрывчатых веществ.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования, последовательной теории, описывающей все аспекты электровзрывного откола и разрушения, до сих пор не создано. Препятствием служат, как сложность экспериментальных методик изучения развития электровзрывных явлений в твердом теле и его последующего разрушения, так и теоретические трудности, связанные с нелинейностью и многомасштабностью протекающих процессов. Существующие модели описывают отдельные стадии электровзрывного разрушения. В экспериментальных работах также рассматриваются только отдельные аспекты явления. Таким образом, отсутствует не только физико-математическая модель этих процессов в их взаимосвязи, но и их единое феноменологическое описание.

Поскольку экспериментальные исследования электроразрядного разрушения дорогостоящи, актуальным является компьютерное моделирование электровзрыва, позволяющее теоретически исследовать все стадии электровзрыва и разработать рекомендации для выбора параметров высоковольтного оборудования. Моделирование позволяет сократить количество и время проведения физических экспериментов, исследования носят более гибкий характер, существует возможность выдержать идентичность условий и вести наблюдение за изменением одних параметров при сохранении постоянными других.

Для исследования и моделирования электроразрядного откола в работе были поставлены следующие задачи:

1) разработка феноменологии электроразрядного откола в конденсированных средах;

2) анализ механизмов зарождения и роста трещин в твердом теле;

3) литературный обзор существующих математических моделей электроразрядного откола;

4) исследование энергетических характеристик и ударно-волновой динамики при электроразрядном отколе, влияние отраженной волны, режима энерговвода, размеров и физико-механических свойств бетонного блока на эффективность электровзрывного откола;

5) сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных;

6) разработатка рекомендаций к выбору режимных и энергетических характеристик высоковольтного оборудования.

# 1 Феноменологическое описание электровзрывного откола и разрушения твердых тел

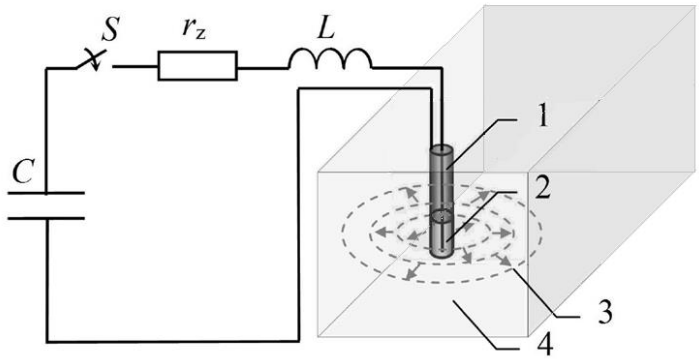
## 1.1 Физические и термодинамические процессы в канале разряда

Электроразрядный способ разрушения твердых диэлектрических и полупроводящих материалов основан на использовании энергии импульсного электрического разряда при их непосредственном электрическом пробое.

Использование явления электровзрыва проводника в шпуре является перспективным способом для инициирования разрядного канала при электроразрядном откола и разрушении твердых сред. Электровзрыв представляет собой комплекс взаимозависимых процессов: инициирование и развитие разряда, расширение разрядного канала, которое сопровождается эффективным преобразованием энергии мощного импульса тока в энергию ударных волн, создающих поле механических напряжений, приводящих к образованию и росту трещин и, в результате, разрушающим деформациям в материале.

В экспериментальных и технологических электроразрядных установках чаще всего используются емкостные импульсные генераторы высокого напряжения [1], работу которых можно описать с помощью эквивалентной схемы, показанной на рисунке 1.

Сопротивление $r_z$ и индуктивность $L$ складываются из сопротивления и индуктивности конденсаторной батареи $C$, искрового промежутка в газоразрядном коммутаторе $S$, ошиновки и подводящего кабеля – 1. Картридж – 2 представляет собой сплошной цилиндр из пластичного материала (полиэтилена) с высокой акустической жёсткостью, в центральной оси которого помещен взрываемый медный проводник [2].




1 – коаксиальный подводящий кабель; 2 – картридж (медный проводник в полиэтилене); 3 – ударно-волновые возмущения в материале, генерируемые расширением канала; 4 – разрушаемый материал

Рисунок 1 – Схема электроразрядного разрушения твердых материалов [2]

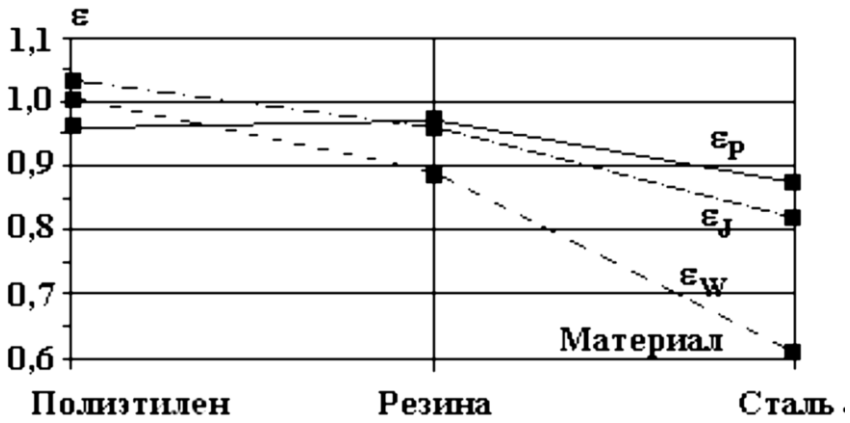
Выбор проводника для инициирования канала разряда в твердом теле (явление электровзрыва проводника) обусловлен, в основном, возможностью снизить уровень рабочего напряжения технологических установок, а также обеспечить развитие плазменного канала по месту расположения проводника.

Полиэтилен является средой для передачи ударной волны в разрушаемый материал, амплитуда и энергия которой зависит от физико-механических свойств этой среды. Применение полиэтилена позволяет увеличить энергию (порядка 20–25 %) и амплитуду давления (порядка 25–30 %) генерируемой волны. По данным таблицы 1 [3] видно, что полиэтилен наиболее эффективно передает энергию волны. Исследование энерговыделения в канале разряда проводилось при следующих параметрах разрядной цепи генератора: зарядное напряжение 10 кВ, емкость 12 мкФ, индуктивность 1,067 мкГн, активное сопротивление $r_z$=0,0197 Ом. Для исследования использовался картридж, выполненный из полиэтилена в виде цилиндра, диаметром 24 мм и взрываемый медный проводник диаметром 0,15 мм и длиной 50 мм [3].

Таблица 1 – Эффективность передачи энергии ударной волны от канала разряда в твердый материал

| Передающая среда | Энергия ударной волны, переданная в твердое вещество, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | бетон | гранит | мрамор | песчаник |
| Вода | 69,7 | 32,9 | 29,1 | 73,5 |
| Парафин | 64,7 | 30 | 26,3 | 68,9 |
| Полиэтилен | 90,5 | 46,8 | 42 | 89,1 |
| Пластилин | 89 | 46 | 41,3 | 87,6 |

В работе С.Г. Поклонова, В.Г. Жекула, А.П. Смирнова [4], в ходе экспериментальных исследований, также было показано положительное влияние упругой преграды из полиэтилена на параметры передачи волны давления при электрическом разряде (рисунок 2).




$\varepsilon_P$ – амплитуды импульсного давления; $\varepsilon_J$ – удельного импульса;

$\varepsilon_W$ – акустической энергии

Рисунок 2 – Коэффициенты преобразования параметров волны давления ограничивающими оболочками из различных материалов [4]

Выбор полиэтилена в качестве среды, окружающей проводник, обусловлен еще и тем, что в окрестности канала отсутствует область

раздавливания и измельчения материала, а это позволяет избежать значительных затрат энергии на границе канала.

При замыкании ключа *S*, через проводник начинает протекать импульсный ток (порядка 10 кА) [5], и в течение короткого времени ($10^{-6}$ с) [6] выделяется основная энергия накопителя *C*, что приводит к нагреву проводника и его дальнейшему взрыву. По парам металла в канале разряда образуется низкотемпературная плазма с температурой Т порядка $(10–12)\cdot10^3$ К и давлением на стенки шпура порядка ($10^8$ – $10^9$) Па [5, 6]. Происходит резкое нарастание внутренней энергии плазмы в канале, а мощность энерговыделения достигает порядка 200-300 МВт (рисунок 3). Взрывное выделение энергии в канале приводит к резкому росту в нем давления до нескольких ГПа (рисунок 4) и, в результате, к расширению канала, что приводит к генерации волн механических напряжений, распространяющихся от стенок канала в сторону свободных поверхностей материала. Распространение этих волн формирует напряженно-деформированное состояние твердого тела в диапазоне от десятков до сотен МПа [2], стимулирующее образование упруго-пластических деформаций в твердой среде, инициирование и рост трещин.

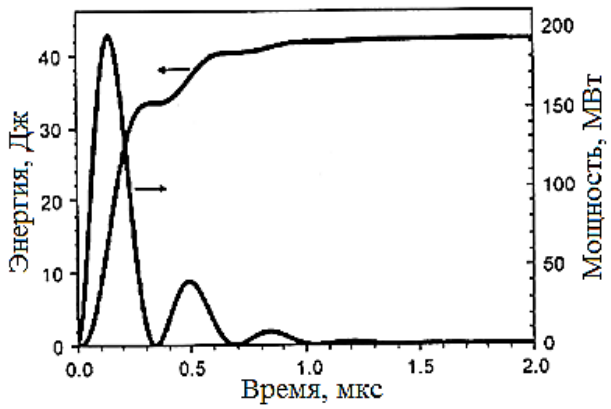



Рисунок 3 – Временные зависимости мощности энерговыделения и энергии, выделившейся в канале [1]

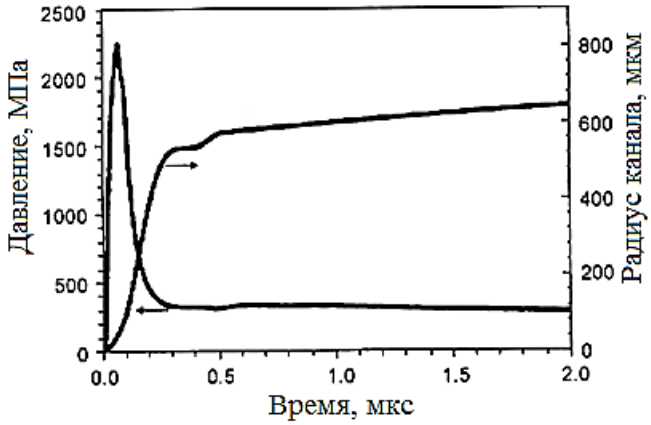



Рисунок 4 – Временные зависимости давления в канале и радиуса канала [1]

Дальнейшее увеличение объема разрядного канала приводит к снижению в нем давления и к замедлению его расширения (рисунок 4), так как последующие колебания энерговыделения оказывают незначительное влияние на давление и радиус канала. Это означает, что основное ударное воздействие на разрушаемый материал создается в первом полупериоде колебаний волнами, генерируемыми при радиальном расширении канала после взрыва проводника.

Скорость расширения канала на стадии энерговыделения можно рассчитать, обозначив радиус канала через $r_{ch}$ в момент времени $t$, по формуле:

$$V = \frac{r_{ch}}{t}. \quad (1)$$

Эксперименты показывают, что скорость расширения разрядного канала, составляющая примерно 0,38-0,4 от скорости звука [30], на стадии энерговыделения для различных возможных условий меняется незначительно. Это позволяет при грубом приближении полагать ее постоянной. Размеры и форма канала после завершения энерговыделения в основном определяются величиной выделенной энергии и свойствами окружающей среды.

К настоящему времени для твердых тел характеристики и оценки канальной стадии представлены для весьма ограниченного числа материалов и режимов энерговклада, в отличие от жидких сред. Это связано с тем, что

изучение динамики канала разряда в твердых телах затруднительно в связи с их непрозрачностью, оптической неактивностью, высокой сложностью описания с учетом структуры, локальными изменениями свойств и т.д.

## 1.2 Динамика ударно-волновых процессов и напряженно-деформированного состояния твердых тел при электроразрядном отколе

Одним из основных воздействующих факторов электроразрядных технологий является ударная волна. Энергосодержание ударной волны и амплитуда давления на ее фронте определяются параметрами разрядной цепи, в частности скоростью нарастания мощности в канале разряда.

Роль ударных волн заключается в создании динамического поля механических сдвиговых и растягивающих напряжений в материале, что обеспечивает его более эффективное разрушение.

Напряжение является векторной величиной, которая зависит от внутренних свойств и формы образца исследуемого материала, от действия внешних сил. Силы, действующие в одном направлении, вызывают в образце одноосное напряженное состояние, в двух направлениях, но в одной плоскости – плоское напряженное состояние, а действие по трем осям – объемное напряженное состояние породы.

В абсолютно плотной породе напряжения рассчитываются по формуле [7]:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \tag{2}$$

где S – площадь, на которую воздействует сила F.

В пористых породах

$$S = S_0 + S_п , \tag{3}$$

где S0 – площадь контакта минеральных зерен;

Sп – площадь, занятая порами.

Напряжения концентрируются в области контакта минеральных зерен

$$\sigma` = \frac{F}{S_0} \quad (4)$$

поэтому с увеличением пористости, трещиноватости и выветриваемости напряжения в породе возрастают.

В элементарном кубике породы, находящемся в напряженном состоянии, можно выделить девять компонентов напряжений – два касательных и одно нормальное на каждой грани кубика (рисунок 5).

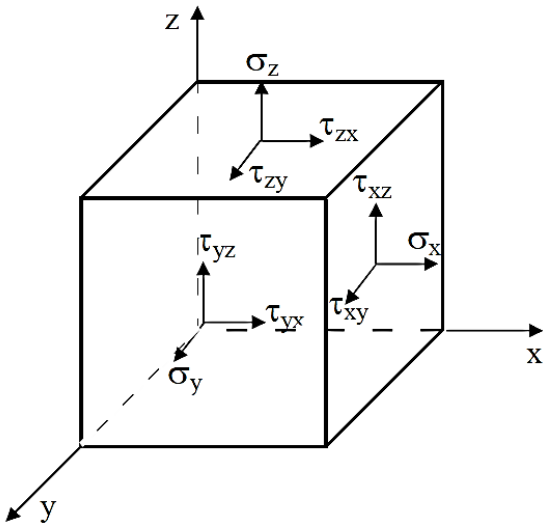



Рисунок 5 – Компоненты напряжений на элементарном кубике породы, находящемся в сложнонапряженном состоянии [7]

Все компоненты представляют одну физическую величину, именуемую тензором напряжений:

$$\mathrm{T} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В приведенном выше симметричном тензоре любые два касательных напряжения $\tau$, лежащие в одной плоскости и направленные в противоположные стороны, должны быть равны, так как тело находится в равновесии:

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}, \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad (7)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (8)$$

Напряженное состояние твердого тела в любой плоскости можно охарактеризовать действующими в нем взаимосвязанными нормальными и касательными напряжениями, которые могут быть рассчитаны методом сложения векторов и представлены графически с помощью кругов напряжений Мора.

Изменения линейных размеров, объема или формы, которые испытывает материал под воздействием внешних сил, называются деформациями.

Деформации, соответствующие нормальным напряжениям, выражаются через относительное изменение линейных размеров образца

$$\varepsilon = \frac{l` - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} \qquad (9)$$

где $l`$ и $l$ - длина образца соответственно в деформированном инедеформированном состоянии.

Деформации, соответствующие касательным напряжениям, выражаются через угол сдвига α граней образца. Величина деформации сдвига определяется как $\varepsilon` = tg\alpha$ .

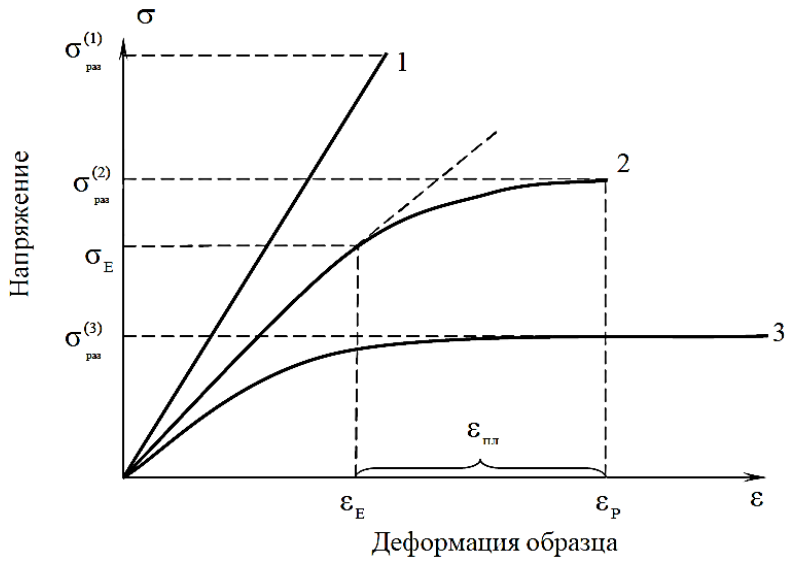
Деформации, которые приводят к разделению породы на отдельные части, являются разрушающими, неразрушающие деформации только изменяют размеры, форму и объем породы без нарушения ее сплошности. Неразрушающие деформации делятся на упругие и пластические.

При упругих связях между напряжениями и соответствующими деформациями наблюдается прямая пропорциональность, т.е. с ростом величины упругой деформации в образце накапливается потенциальная энергия, которая после снятия нагрузки возвращает образец в исходное состояние.

Пластические деформации характеризуются необратимостью форм и размеров образца после снятия нагрузки и длительностью процесса.

При увеличении напряжений или времени их воздействия на материал можно наблюдать три области деформаций (упругая, пластическая), которые

могут переходить одна в другую. В зависимости от вида деформации породы делятся на упругие или хрупкие, упруго-пластичные или пластичные. На рисунке 6 приведены типичные графики деформации для различных групп материалов.




1 - упругохрупких; 2 - упругопластичных; 3 - пластичных

$\sigma_{\text{раз}}^{(1)}, \sigma_{\text{раз}}^{(2)}, \sigma_{\text{раз}}^{(3)}$ – пределы прочности пород соответственно 1, 2 и 3-го типа; $\sigma_E$ – редельное значение упругих напряжений, предел упругости; $\varepsilon_E$, $\varepsilon_P$ – граничные деформации, соответствующие предельному значению упругой зоны и разрушению образца; $\varepsilon_{пл}$ – пластические деформации.

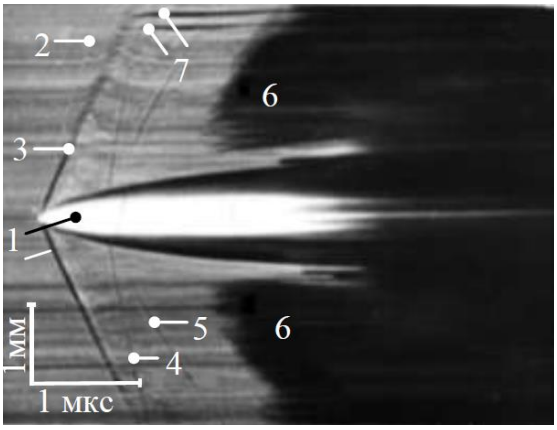
Рисунок 6 – Типичные графики деформации пород [7]

К откольному динамическому разрушению твердого тела [8, 9] приводит импульсная нагрузка, являющаяся причиной возникновения критических состояний в теле при прохождении и сложении в нем волн напряжений и деформаций. В качестве импульсной нагрузки в данной работе рассматривается электровзрыв проводника, результатом которого является генерация ударной волны в твердом теле, создающей динамические поля напряжений в материале, о чем упоминалось ранее.

Ударная волна представляет собой распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды. Распространяясь в материале, на расстоянии порядка (1–3) мм от канала

вырождается в акустическую, расщепляясь на пластическую и упругую волны.

На рисунке 7 приведена фоторазвертка, полученная при скоростном фотографировании, отражающая информацию о пространственных и временных характеристиках разрядного канала и о распространении ударной волны в материале. Метод скоростного фотографирования является одним из основных методов получения информации о процессах, протекающих при электровзрыве внутри твердого тела.




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

Рисунок 7 – Фоторазвертка расширения канала и сопутствующих явлений в *KCl* [21]

Пластическая волна подвергается сильной дивергенции и приводит к формированию динамично изменяющегося поля сжимающих и сдвиговых механических напряжений и деформаций в твердом теле в окрестности канала, результатом которого является образование области раздавливания материала (радиусом от 2 до 3 мм). Упругая волна, распространяясь в твердом теле в радиальном направлении, имеет область растягивающих напряжений за своим фронтом, характеризующуюся тем, что амплитуда растягивающих напряжений больше половины максимального напряжения сжатия. Ее параметры существенно зависят от условий нагружения 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. Кроме того, при движении волны к периферии образца она взаимодействует с акустическими неоднородностями в материале, разупрочняя границы срастания матрицы и неоднородности, затем при отражении ударных волн от свободной поверхности образца они создают в этой зоне дополнительные растягивающие усилия, обеспечивающие откольные явления.

В настоящее время в распоряжении исследователей имеется хорошо разработанный набор методов генерации, диагностики и интерпретации ударно-волновых явлений в конденсированных средах [10].

### 1.3 Механизмы зарождения и роста трещин в твердом теле

Задача о критическом состоянии тела с трещиной впервые была решена Гриффитсом с позиций общего энергетического баланса исследуемого объекта. Впервые сформулированная Ирвином и Орованом концепция квазихрупкого разрушения, существенно расширившая класс материалов, к которым можно было применять теорию трещин, также стала крупным достижением механики разрушения. Таким образом, начиная с работ Гриффитса, Орована, Ирвина развитие теории прочности твердых тел пошло по пути изучения распространения трещин в твердых телах. Эта теория получила название линейной механики разрушения.

Процесс разрушения (откола) складывается из двух стадий — начинается с зарождения микротрещин и заканчивается появлением магистральной трещины – полным отделением отколовшегося слоя твердого тела, причём каждая из этих стадий подчиняется своим законам. Во второй, завершающей стадии разрушения, происходит истечение плазмы и газа из устьев канала разряда в радиальные трещины, образующиеся в материале, создавая эффект «клина», что приводит к увеличению длины магистральных трещин. Магистральные трещины разрушения развиваются с некоторой

задержкой во времени и ориентируются на области расположения неоднородностей, так как зоны вблизи включений ослаблены, а отраженные от них волны создают растягивающие усилия на пути от неоднородности до вершины трещины [11].

Зарождение и рост трещин в твердых телах происходит в сложном неоднородном поле напряжений, поэтому основной задачей при исследовании механизма разрушения является изучение поля напряжений в окрестности вершины трещины [12].

Развитие трещин может происходить по-разному: быстро расти при неизменной, но достигшей критической величины нагрузке до полного разрыва тела (неустойчивое состояние) в одних случаях и медленно расширяться при нарастании нагрузок, останавливаясь, при уменьшении роста нагрузки (устойчивое состояние) в других. Размеры устойчивых равновесных трещин связаны с приложенными к телу нагрузками.

Накопленный опыт эксплуатации лабораторных установок позволил установить, что для создания оптимальных условий зарождения радиальных трещин, необходимо обеспечить «быстрый» режим ввода энергии в канал разряда т.е. требуется крутой фронт импульса (0,1–10 мкс), при этом уровень механических напряжений, необходимый для роста трещин гораздо ниже, чем для их инициирования, поэтому для формирования магистральных трещин, необходимо обеспечить длительное выделение энергии (более 200–300 мкс) [13].

## 1.4 Обзор концепций математических моделей разрушения твердых тел

С точки зрения математического моделирования, проблема разрушения имеет два аспекта: первый – разработка модели и критерия разрушения, второй – описание механического поведения полностью или частично разрушенной среды. Исходя из различных подходов к решению этой проблемы можно выделить несколько относительно независимых

направлений: статический, динамический, термофлуктуационный (кинетический). Обзор по моделям разрушения, развиваемых в рамках указанных направлений, приведен в [14].

При разработке моделей разрушения возникают трудности, связанные со сложностью прогнозирования и математического описания переходов от одного структурного уровня к другому в развитии процесса разрушения. Поэтому в существующих моделях, использующих механизмы образования внутренних дефектов, ограничиваются рассмотрением одного структурного уровня – накопления повреждений на микроуровне. Критерием разрушения является условие достижения предельной концентрации микродефектов, при которой материал утрачивает несущую способность.

Создание математических моделей разрушения твердых тел, позволяющих рассчитывать поведение сред сложной структуры при воздействии интенсивных динамических нагрузок, является важной научно-технической проблемой, которую невозможно решить без проведения экспериментальных исследований. Совместное рассмотрение экспериментов по разрушению материалов и их математического моделирования позволяет более детально исследовать специфику процессов и верно интерпретировать полученные в экспериментах данные.

На основе данных, полученных опытным путем отечественными и зарубежными исследователями для случаев высокоскоростной одноосной деформации, построен ряд моделей откольного разрушения [15, 16, 17-19], отражающих основные закономерности процесса разрушения. В основу этих моделей заложены энергетическая и кинетическая концепции откола.

Энергетический критерий [19] заключается в предположении о том, что работа по отрыву материала совершается за счет упругой энергии, запасенной в импульсе растяжения.

При кинетическом подходе рассматривают процессы образования, роста и слияния микродефектов под действием растягивающих усилий, образующихся в процессе нагружения [17, 18]. Разрушение протекает в

каждой точке тела, сложным образом взаимодействуя с волной напряжения, поэтому для его завершения требуется конечный интервал времени. Результаты многочисленных экспериментальных исследований доказывают, что откол представляет собой переходный процесс от сплошности материала до его полного или частичного разрушения, и соответственно, время, также как напряжение и деформации, является важной характеристикой откольного разрушения. Влияние времени проявляется в случаях прикладываемого напряжения и развития повреждений твердого тела.

В разработанных версиях кинетической теории прочности твердых тел используются различные физические представления о процессе разрушения, способах его описания и включения в него времени [10]. Обзор моделей разрушения на основе кинетической теории можно найти в работах [15,16,18].

В работе [20] представлены волновые профили для широкого круга материалов, полученные при различных давлениях ударного сжатия, длительностях импульсов нагрузки и температурах испытаний. Представленные волновые профили могут использоваться при тестировании различных моделей поведения материалов, а так же в качестве исходных экспериментальных данных для разработки новых и развития существующих физических моделей высоко-скоростного деформирования, разрушения и других процессов при ударно-волновом нагружении [10].

# 2 Комплексная физико-математическая модель электроразрядного откола горных пород и искусственных материалов

## 2.1 Основные положения модели

В основе явления электроразрядного откола горных пород и искусственных материалов лежит последовательность взаимосвязанных процессов: инициирование канала сквозной проводимости в передаточной среде, импульсный ввод энергии внешнего источника в разрядный канал, расширение плазмы канала, генерация и распространение ударных волн, формирование в среде поля давлений и массовых скоростей, формирование в твердым материале напряженно-деформированного состояния, которое, в итоге, приводит к направленному, преимущественно к свободным поверхностям твердого тела, трещинообразованию и последующему отколу от массива горной породы и бетона. По мере распространения в передаточной среде волна достигает границы передаточная среда – твердое тело, при этом она, частично отражаясь в передающую среду и преломляясь в твердое тело, создает в нем поле механических напряжений, что приводит к необратимым процессам в обрабатываемом материале.

Предлагаемый метод разрушения находит применение в электроразрядной технологии откола от монолита бетона и массивов горных пород (рисунок 8) при добыче полезных ископаемых, в тоннелестроении (рисунок 9), ремонтно-восстановительных работах и строительстве. Этот метод является актуальным, учитывая, что в Западной Европе использование взрывчатых веществ для этих целей запрещено.

а) б)

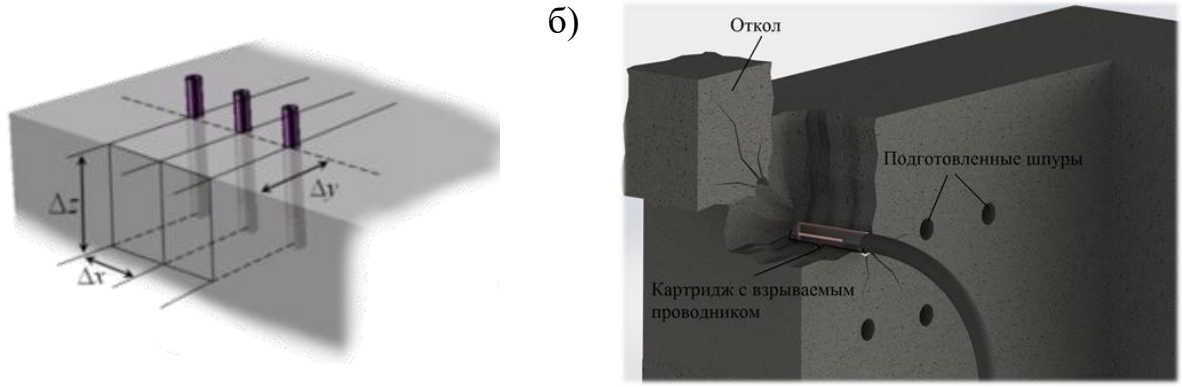
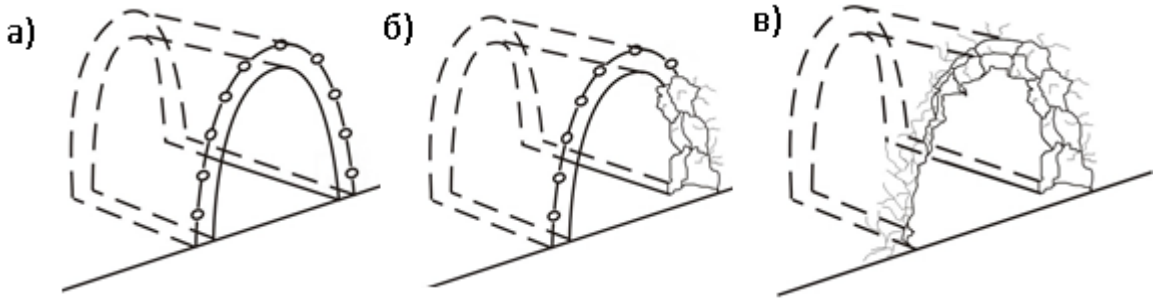



Рисунок 8 – Схемы расположения электровзрывных картриджей (а) и электроразрядного откола (б) горной породы и искусственного материала

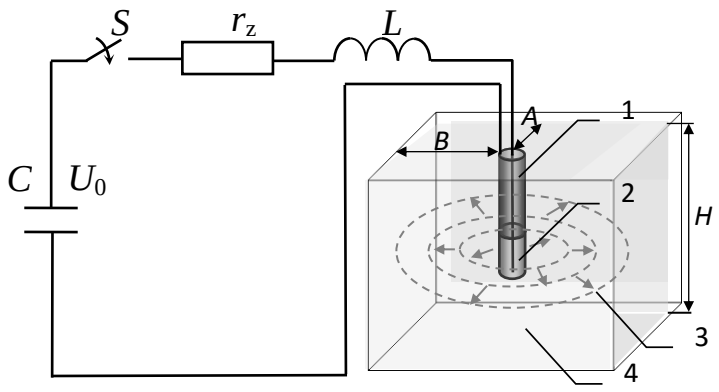



а) – забуривание шпуров по периметру туннеля; б) – последовательные электровзрывы в шпурах; в) – результат разрушения

Рисунок 9 – Схема расширения туннелей

В основу модели электровзрывного откола (заглубленного электровзрыва) положены законы сохранения импульса, массы, энергии, описывающие волновой характер импульсного воздействия.

Модель представляет собой согласованное решение уравнений переходного процесса для разрядного контура (рисунок 10), уравнения энергобаланса канала, уравнений гидродинамики для описания волновых возмущений и уравнений состояния проводника, плазменного канала и окружающей среды.

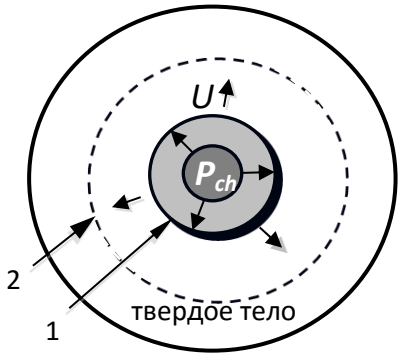



1 – коаксиальный кабель, 2 – электровзрывной патрон (медный проводник, окруженный полиэтиленом), 3 – ударно-волновые возмущения, генерируемые расширяющимся каналом, 4 – разрушаемое твердое тело (горная порода, бетон)

Рисунок 10 – Схема электроразрядного откола твердого тела

Физико-математическая модель электроразрядного откола горных пород и искусственных материалов согласованно описывает разряд конденсатора и динамику электровзрыва, связь электротехнических характеристик с напряженно-деформированным состоянием материала, вызывающим его разрушение. Комплексный анализ волновой динамики проводится для схемы электроразроядного откола твердых тел, представленной на рисунке 10.

Анализ экспериментальных данных по пробою прозрачных диэлектриков (щелочно-галоидных кристаллов, ПММА) [21, 22] дает основание моделировать рассматриваемую схему цилиндрическим образцом с расширяющимся разрядным каналом, совпадающим с осью материала и генерирующим в окружающую среду волну напряжений с выраженной упругопластической структурой фронта (рисунок 11).




1 – разрядный канал, 2 – волна механического напряжения

Рисунок 11 – Распространение волн в сечении, перпендикулярном оси разрядного канала

Расчет параметров распространяющейся волны проводится в сечении, перпендикулярном оси канала. Рассмотрение развития и протекания ударно-волновых явлений позволяет оценить эффект отражения волны в усилении роли растягивающих тангенциальных напряжений. Задержка разрушения в течение (1,5–4) мкс позволяет использовать уравнения сплошной среды в форме законов сохранения импульса, массы и энергии.

Поведение горной породы и искусственного материала в модели описывается в рамках уравнений их упругопластического деформирования. На первый взгляд более привлекательно выглядит упруго-хрупкая модель. Однако, анализ экспериментальных данных, картин разрушения горных пород, полученных с использованием электроразрядной технологии, показал, что в результате импульсного пробоя твердого тела реализуются два механизма разрушения. В окрестности разрядного канала происходит раздавливание и переизмельчение породы. Этот тип разрушения реализуется в волне с амплитудой, существенно превышающей предел упруго-хрупкого разрушения. В зоне формирования радиальных трещин основным фактором является фаза растягивающих тангенциальных и сдвиговых напряжений в упругой волне, излучаемой из зоны переизмельчения (пластического деформирования среды). Такое представление электровзрывного разрушения качественно согласуется с многочисленными данными экспериментов и не

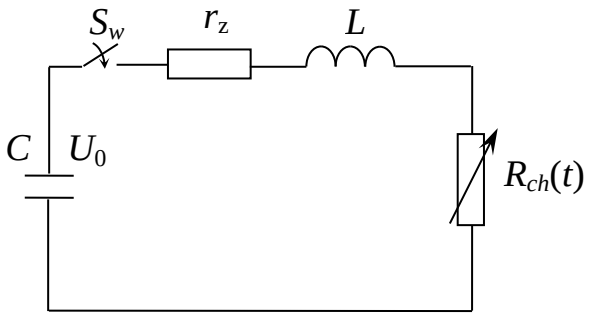
противоречит основным закономерностям волновой динамики, выявленным при анализе взрывов химической природы и микрометеоритного удара [23, 24].

В модели для описания разрушения используется идея "задержки разрушения", основанная на экспериментально зафиксированном результате изменения свойств твердого тела под нагрузкой [21, 25, 26]. Полагается, что среда остается сплошной, неразрушенной в некотором интервале времени пока не сформируется критическое напряженно-деформированное состояние. Области среды, в которых выполняются критерии разрушения считаются разрушенными. При этом полагается, что "разрушение" существует независимо от напряженно-деформированного состояния и не влияет на него. Идеология такого подхода позволяет выявить основные закономерности электровзрыва.

Рассмотренная физическая картина явления и принятые допущения и упрощения позволяют использовать широко известный метод Уилкинса [27] для расчета упругопластического деформирования прочных сред. Основные соотношения этого метода дополняются электротехническими уравнениями цепи, уравнением энергобаланса разрядного канала, уравнением состояния сред (горных пород и искусственного материала) и соответствующими начальными и граничными условиями.

## 2.2 Работа разрядного контура емкостного импульсного генератора

Работа генератора импульсных напряжений моделируется на основе эквивалентной схемы, содержащей генерирующий конденсатор емкостью $C$, сопротивление $r_z$, индуктивность $L$ и нагрузку с сопротивлением $R_{ch}(t)$ (рисунок 12). В электроразрядных технологиях чаще всего используются емкостные импульсные генераторы. Другие виды источников энергии могут быть приведены к аналогичной схеме замещения.




$C$ – емкость генератора, $U_0$ – зарядное напряжение, $S_w$ – ключ,
$L$ – индуктивность, $r_z$ – омическое сопротивление цепи,
$R_{ch}(t)$ – сопротивление разрядного канала

Рисунок 12 – Схема замещения генератора импульсных напряжений и нагрузки

При замыкании ключа $S_w$ в диэлектрике формируется разрядный канал радиусом $r_{ch}$, 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 $W_g = \frac{CU_0^2}{2}$. 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 $l_{ch}$. После замыкания ключа $S_w$ сумма напряжений на элементах цепи равна нулю:

$$U_C(t) + U_{r_z}(t) + U_L(t) + U_{R_{ch}}(t) = 0, \qquad (10)$$

где $U_C(t)$ – напряжение на емкости $C$;

$U_{r_z}(t) = i(t)r_z$ – напряжение на сопротивлении $r_z$;

$U_L(t) = L\frac{di(t)}{dt}$ – напряжение на индуктивности;

$U_{R_{ch}}(t) = i(t)R_{ch}(t)$ – падение напряжения на разрядном промежутке;

$i = -C\frac{dU_C}{dt}$ – ток, протекающий через генерирующий конденсатор С.

Или после подстановки значений падения напряжения в (10), получим уравнения Кирхгофа для разрядной цепи:

$$L\frac{di(t)}{dt}+(r_z+R_{ch})\cdot i(t)=U_C(t), \qquad \frac{dU_C(t)}{dt}=-\frac{i(t)}{C}\ . \tag{11}$$

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 [28]:

$$R_{ch}(t)=\frac{Al_{ch}}{\sqrt{\int_0^t i^2(t)dt}}, \tag{12}$$

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

Учитывая многочисленные факторы, определяющие сопротивление канала пробоя в твердом материале, трудно найти универсальный подход к предсказанию $R_{ch}(i, t)$ в широком спектре изменений свойств диэлектрика, способов инициирования канала разряда и параметров разрядной цепи. В [29] приведен массив результатов систематических измерений $R_{ch}(i, t)$, полученный для пяти твердых диэлектриков (монокристалл KCl, органическое стекло, песчаник, гранит и микрокварцит). Анализ показал, что с погрешностью не более (10–15) % относительно опыта, максимальная мощность, развиваемая в канале, и энергия, выделившаяся за время первой осцилляции тока, могут быть рассчитаны при $A$=const. Зависимость $A=f(\lambda)$ (рисунок 13), где $\lambda=\rho\cdot c_0$ – акустическая жесткость материала, $\rho$ – плотность материала, $c_0$ – скорость звука в нем позволяет определить искровую постоянную для некоторых горных пород.

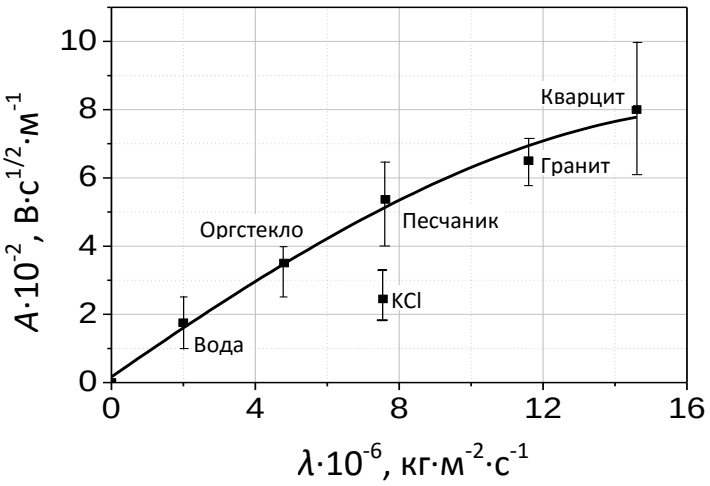



Рисунок 13 – Зависимость искровой постоянной $A$ от акустической жесткости среды $\lambda$ [29]

В большей части временного интервала протекания тока величина $A$ изменяется квазистационарно. Это дает основание использовать постоянное значение, равное $A_{ср}$.

Таким образом, значения емкости $C$ и напряжения $U_0$ определяют запасенную генератором энергию. На канальной стадии емкость $C$ и индуктивность $L$ определяют характер колебаний в цепи генератора. Расчеты проводились с учетом параметров существующих импульсных генераторов.

### 2.3 Баланс энергии в плазменном канале пробоя

В модели процесс энерговыделения в разрядном канале учитывает характер преобразования энергии для конкретного контура. Это позволяет установить непосредственную связь параметров волны давления с параметрами разрядного контура.

Законы Кирхгофа позволяют рассчитать ток в цепи $i(t)$, сопротивление разрядного канала $R_{ch}(t)$, омические потери в цепи $W_{r_z}(t)$:

$$W_{r_z}(t) = \int_0^t i^2(t) r_z dt; \qquad (13)$$

энергию в индуктивности $L$:

$$W_L(t) = \int_0^t U_L(t) \cdot i(t) dt; \tag{14}$$

и динамику энерговыделения в канале $W_{ch}(t)$:

$$W_{ch}(t) = \int_0^t i^2(t) \cdot R_{ch}(t) dt. \tag{15}$$

Описание изменения состояния плазменного канала пробоя основано на уравнении баланса энергии, связывающем электротехническую часть электровзрыва с волновой динамикой в среде. Электрическая энергия, выделенная в канале, преобразуется во внутреннюю энергию плазмы и механическую энергию ударной волны, которая также расходуется на расширение канала:

$$\frac{dW_{ch}}{dt} = \frac{dA_{ch}}{dt} + \frac{dW_{pl}}{dt}, \tag{16}$$

где $dA_{ch} = P_{ch} \cdot dV_{ch}$ – приращение работы, совершаемой расширяющимся каналом, при изменении его объема;

$V_{ch} = \pi r_{ch}(t)^2 l_{ch}$ – объем канала;

$P_{ch}$ – давление внутри канала ,

$r_{ch}(t)$ – радиус канала,

$W_{pl}$ – внутренняя энергия плазмы в канале.

Внутренняя энергия плазмы канала, расширяющегося в адиабатическом приближении, описывается выражением [30-32]:

$$W_{pl} = \frac{P_{ch} \cdot V_{ch}}{\gamma - 1}, \tag{17}$$

где $\gamma$ – эффективный показатель адиабаты.

Показатель адиабаты $\gamma$ влияет на распределение вводимой в канал энергии между плазмой и ударной волной. Оценка значения показателя адиабаты может быть получена, если известны термодинамические параметры канала. Экспериментальные данные дают достаточно приблизительное представление о значениях этих величин. Чем выше

значение $\gamma$, тем большая часть энергии $W_{ch}$, вводимой в канал, реализуется в энергию волны. Из экспериментальных работ известно [21, 33], что величина γ по мере расширения канала снижается. Для конденсированных сред его величина изменяется в диапазоне от 1,25 до 1,05 [32–36]. При моделировании величина $\gamma$ в основной серии расчетов полагалась равной значению 1,1, которое близко к реализуемым в электроразрядных технологиях.

С учетом уравнения (17) уравнение энергобаланса можно записать в виде:

$$\frac{dW_{ch}}{dt} = P_{ch}\frac{d(\pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch})}{dt} + \frac{1}{\gamma - 1}\frac{d(P_{ch}\pi r_{ch}^2 \cdot l_{ch})}{dt}. \qquad (18)$$

Потерями энергии на формирование канала пробоя, составляющими в сантиметровых промежутках около 10 Дж [37–40] пренебрегаем. Потери энергии на излучение и истечение плазмы из канала в моделировании не учитывались. В соответствии с оценками [41] при временах формирования волн, не превышающих порядка $10^{-6}$ с, излучение не превышает (2–5) % от выделенной в канале энергии $W_{ch}$. Энергия излучения при разряде в воде при длительностях разряда менее 40 мкс составляет не более (10–15) % от энергии, запасенной в конденсаторе $W_g$ [42]. Потери энергии на истечение плазмы из устьев канала в типичных условиях составляют порядка (1–2) % от $W_{ch}$ [34]. Шубин Б.Г. [21], сравнивая при временах энерговклада $t$ порядка $(1-10)\cdot 10^{-6}$ с камуфлетный разряд в *KCl* и разряд со свободным истечением плазмы при прочих равных условиях, экспериментально показал, что процесс истечения существенно влияет на эффективность электровзрыва при $l_{ch}/d_{ch}$ <10, где $d_{ch}$ – диаметр канала.

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

$$W_{ws} = 2\pi l_{ch} \int_{r_{ch0}}^{r_{ch}} P_{ch} r_{ch} dr_{ch} = W_{de} + W_{ke}, \quad (19)$$

$$W_{de} = 2\pi l_{ch} \cdot \int_{r_{ch}}^{R_w} e\rho R dR, \quad W_{ke} = \pi l_{ch} \int_{r_{ch}}^{R_w} u^2 \rho R dR, \quad (20)$$

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 $W_{r_z}$, $W_{ch}$, $W_{pl}$, $W_{ws}$, $W_{wt}$, $W_{wj}$, $W_{de}$, $W_{ke}$ нормировались делением на $W_g = \frac{CU_0^2}{2}$:

$$\eta_{r_z} = W_{r_z} / W_g, \ \eta_{ch} = W_{ch} / W_g, \ \eta_{pl} = W_{pl} / W_g, \eta_{ws} = W_{ws} / W_g, \quad (21)$$

$$\eta_{wt} = W_{wt} / W_g, \ \eta_{wj} = W_{wj} / W_g, \eta_{de} = W_{de} / W_g, \eta_{ke} = W_{ke} / W_g. \quad (22)$$

Динамика изменения объемной плотности энергии в разрядном канале описывается выражением:

$$w(t) = \frac{W_{ch}(t)}{V_{ch}(t)}. \quad (23)$$

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

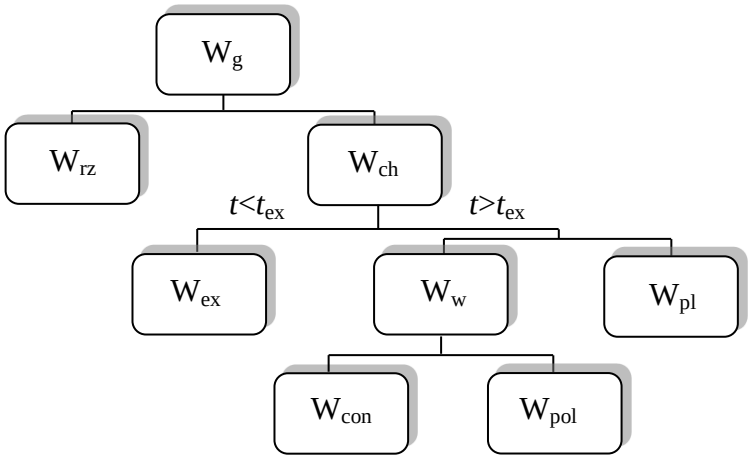
$$w_{de}(R) = \frac{W_{de}(R)}{V_l(R)} = e(R) \cdot \rho(R). \quad (24)$$

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

Энергия накопителя $W_g$ при разряде конденсатора частично расходуется в активном сопротивлении контура $W_{r_z}$ и, в основном, выделяется в разрядном канале $W_{ch}$. До $t<t_{ex}$ (где $t_{ex}$ – время взрыва проводника) окружающая проволочку среда оставалась невозмущенной. При $t>t_{ex}$ энергия, вводимая в плазменный канал $W_{ch} = \int_0^t i^2(t) R_{ch}(t) dt$ в соответствии

с уравнением энергобаланса канала $W_{ch} = W_{pl} + W_w$ распределяется между плазмой, описываемой уравнением $W_{pl} = P_{ch} V_{ch} / (\gamma - 1)$ и работой, совершаемой каналом над окружающей средой $W_w = P_{ch} dV_{ch}$, где $P_{ch}$, $V_{ch}$ – давление в канале и его объем, γ=1,1. Энергия волны трансформируется во внутреннюю энергию твердого тела (энергию всестороннего сжатия и энергию изменения формы тела) $W_{de}$ и кинетическую энергию его центробежного относительно канала движения $W_{ke}$.

Таким образом, в основе модели электровзрыва лежит схема, отражающая основные этапы преобразования энергии накопителя в энергию волновых возмущений (рисунок 14). Анализ рассматриваемой схемы позволяет оценить затраты энергии на каждом этапе ее преобразования, выяснить основные ограничивающие закономерности и выявить пути рационального использования энергии волны.




$W_g$ – энергия накопителя; $W_{rz}$ – энергия омических потерь в контуре; $W_{ch}$ – введенная в проводник энергия; $W_{ex}$ – энергия, затрачиваемая на взрыв проводника; $W_w$ – энергия волны; $W_{pl}$ – энергия плазмы канала; $W_{con}$ – энергия волны в бетоне; $W_{pol}$ – энергия волны в полиэтилене

Рисунок 14 – Схема преобразования энергии

Анализ уравнения энергобаланса показывает, что практически все его составляющие в существенной мере определяются динамикой энерговклада, то есть, в конечном счете, параметрами разрядной цепи генератора импульсов.

## 2.4 Импульсное деформирование упругопластической среды

Для описания импульсного деформирования упругопластической среды вокруг канала и распространения волны в твердом теле и частично преломленной в передающий ударную волну материал (полиэтилен) используются уравнения в виде законов сохранения импульса, массы, энергии в Лагранжевых координатах для цилиндрической симметрии [27, 43]:

уравнение движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = V_0 \cdot \frac{R}{r}\frac{\partial \sigma_1}{\partial r} + V \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{R}$$
$$\sigma_1 = S_1 - (P+q), \quad \sigma_2 = S_2 - (P+q), \quad \sigma_3 = S_3 - (P+q), \tag{25}$$
$$S_3 = -(S_1 + S_2), \quad \frac{\partial R}{\partial t} = u;$$

уравнение неразрывности

$$V = V_0 \cdot \frac{R}{r} \cdot \frac{\partial R}{\partial r}, \quad V = \frac{1}{\rho}, \quad V_0 = \frac{1}{\rho_0}; \tag{26}$$

уравнение энергии

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -(P+q)\frac{\partial V}{\partial t} + V(S_1 \cdot \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} + S_2 \cdot \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t}) \tag{27}$$

соотношения для компонент девиатора напряжений

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = 2\mu \cdot (\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} - \frac{1}{3 \cdot V}\frac{\partial V}{\partial t}),$$
$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = 2\mu \cdot (\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t} - \frac{1}{3 \cdot V}\frac{\partial V}{\partial t}), \tag{28}$$

соотношения для тензора скоростей деформации

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial R},$$
$$\frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t} = \frac{u}{R}, \tag{29}$$
$$\frac{\partial \varepsilon_3}{\partial t} = 0.$$

где $r$ и $R$ – начальная и текущая координаты элементов среды;

$u$ – массовая скорость;

$\rho_0, \rho$ – начальная и текущая плотности среды;

$\sigma_1$, $\sigma_2$ – полные радиальное и тангенциальное напряжения в среде;

$P$ – давление;

$S_1$, $S_2$, $S_3$ – компоненты девиатора напряжений;

$q$ – квадратичная искусственная вязкость;

$e$ – внутренняя энергия единицы массы среды;

$\mu$ – модуль сдвига.

Для расчета течений с ударными волнами используется метод искусственной вязкости. Согласно основной идее метода в уравнения движения и энергии добавляется слагаемое, отвечающее за диссипацию энергии во фронте. В результате этого скачок заменяется относительно гладким изменением значений $u$, $P$, $V$ на протяжении небольшого числа интервалов расчетной сетки. Используется следующее соотношение для квадратичной искусственной вязкости для расчета фронтов ударных волн [43]:

$$q = \begin{cases} \left(\frac{l^2}{V}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 \ при \ \frac{\partial u}{\partial r} < 0, \\ 0 \ при \ \frac{\partial u}{\partial r} \geq 0, \end{cases} \tag{30}$$

где $l$ – безразмерный коэффициент, определяющий ширину фронта ударной волны (толщина скачка). При моделировании $l$=6.

Предел упругого деформирования (переход материала из упругого деформирования в пластическое состояние) описывается условием Мизеса:

$$S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \leq (2/3)Y^2, \tag{31}$$

где $Y$ – предел текучести среды.

Соотношением, замыкающим эту систему уравнений, служит уравнение состояния среды. Поскольку максимальный уровень давлений, развиваемых при обычных режимах, используемых в электроразрядных технологиях, относительно невелик (порядка $10^9$ Па), то в качестве уравнения

состояния среды можно использовать баротропную зависимость в виде $P = f(\rho)$ или в виде линейной зависимости скорости ударной волны $u_s$ от массовой скорости вещества за фронтом волны $u_p$ (адиабаты Гюгонио) [44 – 46]:

$$u_s = c_0 + s u_p . \tag{32}$$

Коэффициенты $c_0$ и $S$ известны для многих материалов, в том числе и горных пород.

Так, уравнения Ренкина–Гюгонио [44] были получены для установившегося во времени профиля ударной волны. Эти уравнения связывают давление *P*, внутреннюю энергию *E*, удельный объем *V*, или плотность $\rho$, за ударной волной с соответствующими значениями перед ударной волной, используя скорость ударной волны $u_s$ и массовую скорость за ударной волной $u_p$. Приведенные уравнения выражают законы сохранения массы, импульса и энергии и в системе координат, в которой вещество перед фронтом ударной волны находится в покое, соответственно имеют вид:

$$\rho_0 u_s = \rho(u_s - u_p), \tag{33}$$

$$P - P_0 = \rho_0 u_s u_p, \tag{34}$$

$$\left[(E - E_0) - \frac{u_p^2}{2}\right]\rho_0 u_s = P_0 u_p . \tag{35}$$

Из уравнений (33) и (34) можно получить

$$u_s = V_0\left[(P - P_0)/(V_0 - V)\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{36}$$

$$u_p = \left[(P - P_0)(V_0 - V)\right]^{\frac{1}{2}}. \tag{37}$$

Введем сжимаемость среды $\eta$, определив ее следующим образом:

$$\eta = \frac{(V_0 - V)}{V_0} = 1 - \rho_0 V. \tag{38}$$

Из закона сохранения массы (33) получаем

$$\eta = \frac{u_p}{u_s}. \tag{39}$$

Тогда из адиабаты Гюгонио в виде линейной зависимости $u_s$ от $u_p$ (32) следует, что

$$u_p = \frac{c_0 \eta}{(1 - s\eta)} \quad \text{и} \quad u_s = \frac{c_0}{(1 - s\eta)}. \tag{40}$$

Уравнение (34), описывающее сохранение импульса, дает тогда связь на ударной волне между давлением и объемом или эквивалентные соотношения между *P* и $\eta$ вида:

$$P = \rho_0 c_0^2 \eta / (1 - s\eta)^2. \tag{41}$$

Или с учетом (38) уравнение (39) можно записать в виде:

$$P = \rho_0 c_0^2 (1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \Big/ \left[ 1 - s(1 - \frac{\rho_0}{\rho}) \right]^2. \tag{42}$$

Баротропная зависимость в виде (42) используется для описания горных пород. Значения коэффициентов и констант уравнения (42) приведены в таблице 2 согласно [45, 47].

Таблица 2 – Значения параметров $c_0$ и $s$

| материал | $c_0$ | $s$ | $\rho_0$, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|
| песчаник | 2580 | 1.42 | 2200 |
| микрокварцит | 3680 | 2.12 | 2680 |

В качестве уравнения состояния для искусственного материала (бетона) используется баротропная зависимость:

$$P = \rho_0 c_0^2 \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \tag{43}$$

Значения параметров уравнения (43) для полиэтилена и бетона представлены в таблице 3:

Таблица 3 – Значения параметров $c_0$, $n$, $\rho_0$ для бетона и полиэтилена

| материал | $c_0$ | $n$ | $\rho_0, кг/м^3$ |
|---|---|---|---|
| бетон | 2330 | 1,51 | 2200 |
| полиэтилен | 2901 | 1,481 | 940 |
| гранит | 5850 | 2 | 2670 |

В качестве уравнения состояния воды используется зависимость:

$$P = A_l((\rho_l / \rho_{0l})^{n_l} - 1). \quad (44)$$

Для воды значения констант уравнения (44) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения констант $A_l$, $n_l$, $\rho_{0l}$ для воды

| материал | $A_l, кГ/см^2$ | $n_l$ | $\rho_{0l}, кг/м^3$ |
|---|---|---|---|
| вода | 3045 | 7,15 | 1000 |

Приведенные уравнения моделируют состояние элемента среды, расположенного на расстоянии $R$ от разрядного канала в любой момент времени.

### 2.5 Начальные и граничные условия

На фронте ударно-волнового возмущения граничные условия задаются обычно соотношениями Ренкина–Гюгонио, однако введение искусственной вязкости Неймана–Рихтмайера для расчета ударных фронтов [43] при численном решении уравнений, заключающееся в "размывании" фронта волны на 5–6 счетных ячеек, позволяет ограничиться записью граничного условия на стенке канала. Граничным условием является временная зависимость давления на стенке канала $P_{ch}(t)$, которая рассчитывается итерациями из уравнения энергобаланса (18) и уравнений (11)–(15), (25)–(30) для первой расчетной ячейки, примыкающей к каналу.

Возмущениями среды вокруг канала в предпробивной стадии пренебрегаем, считаем, что среда не возмущена и давление в ней равно атмосферному или приближенно нулю. Тогда начальными условиями уравнений (11)–(16), (25)–(30) являются условия невозмущенной среды при $t$=0: $R \geq r_{ch}$, $R = r$, $u(R) = 0$, $P(R) = 0$, $\rho(R) = \rho_0$, $\sigma_{1,2}(R) = 0$, $q = 0$, $e(R) = 0$.

Таким образом, разработана комплексная физико-математическая модель электроразрядного откола горных пород и искусственных материалов с учетом переходного процесса в разрядном контуре импульсного генератора, ударно-волновой динамики (отражения и преломления волн от границ разрушаемого блока, интерференции при ударно-волновом воздействии) в конденсированных средах.

Модель описывает последующие за электрическим пробоем стадии электровзрыва вплоть до откола материала на свободную поверхность при заглубленном (шпуровом) электровзрыве в материалах с разными акустическими и механическими свойствами.

В настоящее время создано большое количество физико-математических моделей, по отдельности описывающих стадии развития канала электрического разряда, формирование волны давления, распространение ударно-волновых возмущений в разнородных конденсированных средах, формирование напряженно-деформированного состояния, инициирование и рост трещин. Но до сих пор не создана комплексная физико-математическая модель откольного разрушения твердых материалов при шпуровом электровзрыве, описывающая все вышеперечисленные процессы согласованно и позволяющая моделировать процесс разрушения материалов в зависимости от начальных параметров накопителя электрической энергии, что является актуальной задачей как теоретической физики в области физики прочности материалов, так и практического применения. Представленная в проекте модель позволяет

выполнять прогноз возможной картины разрушения материала с определенными физико-механическими свойствами, а также выбирать необходимые параметры электроразрядных установок, создаваемых для их разрушения.

Представленная модель применима в широком диапазоне параметров воздействия и дает степень сходимости с результатами экспериментальных исследований не менее 85 %.

# 3 Исследование энергетических характеристик электроразрядного откола

Компьютерные эксперименты, отражающие связь энергетических характеристик с параметрами разрядного контура и медного проводника, проводились на основе разработанной физико-математической модели электровзрыва. Исследования и анализ закономерностей преобразования электрической энергии накопителя в энергию ударно-волновых воздействий выполнялись для бетонного блока с пробуренным шпуром, в полости которого располагался полиэтиленовый картридж с медным проводником (схема была приведена в разделе 1). Электроразрядный откол происходит только в случае наличия свободной поверхности твердого тела. При исследовании энергетических характеристик расстояние до свободной поверхности бетонного блока класса В22 от места расположения шпура составляло 50 см. Полиэтиленовый картридж использовали диаметром 24 мм.

Параметры разрядной цепи изменяли в следующих диапазонах: $U_0 \in$ (10–20) кВ, $C \in$ (560–1120) мкФ, $L \in$ (2–10) мкГн, $r_z \in$ 0,022 Ом. Длина проводника $l_{ch}$ варьировалась от 6 до 15 см, а диаметр – от 0,075 до 0,37 мм.

В момент, когда происходит замыкание ключа S (рисунок 1), возрастают внутренняя энергия и проводимость разрядного канала и, как следствие, рост тока (рисунок 15, а, б). Период колебаний тока определяется индуктивностью $L$ и емкостью $C$ генератора. Положительная обратная связь между тепловыделением и проводимостью вызывает нарастание внутренней энергии плазмы в канале (рисунок 15, в, г). Мощность энерговыделения достигает 500 МВт при $C$=1120 мкФ. Взрывное выделение энергии в канале приводит к резкому росту в нем давления (рисунок 16, а) порядка 2,4 ГПа, вызывающему его расширение (рисунок 16, б).

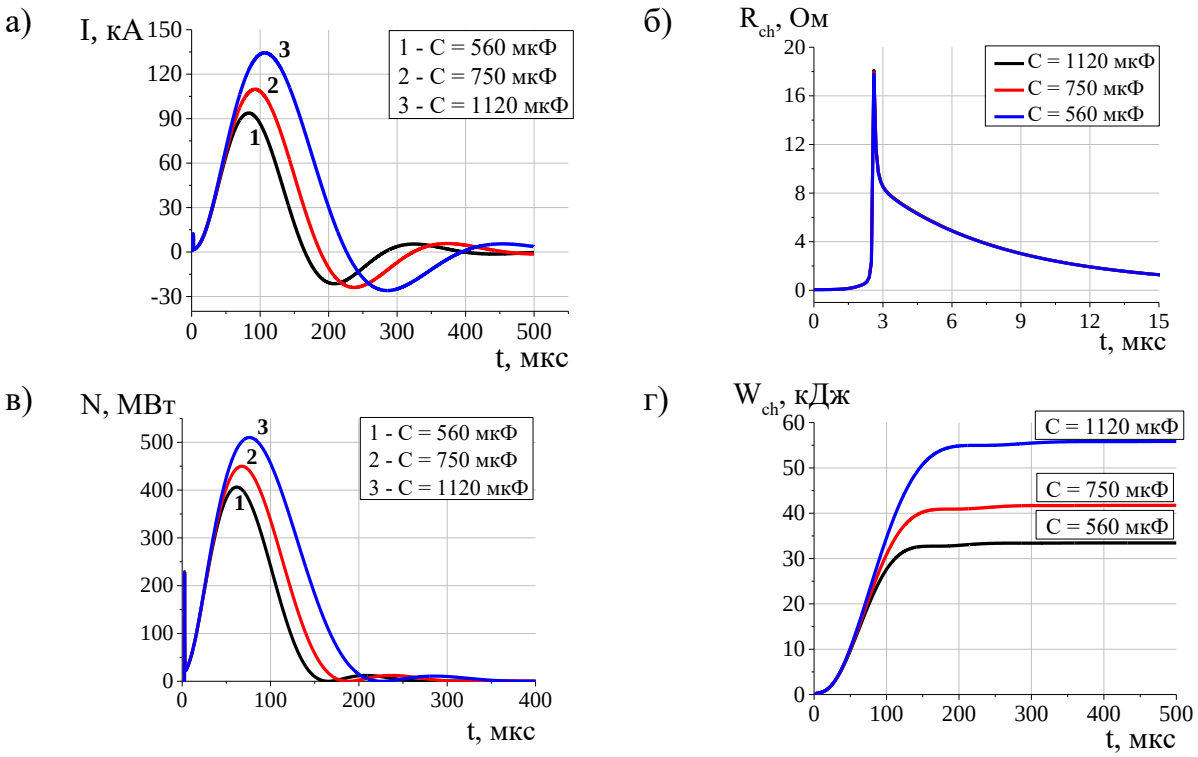



Рисунок 15 – Зависимости тока (а), сопротивления (б), мощности энерговвода (в) и энергии канала (г) от емкости генератора при $U_0$=13 кВ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022 Ом

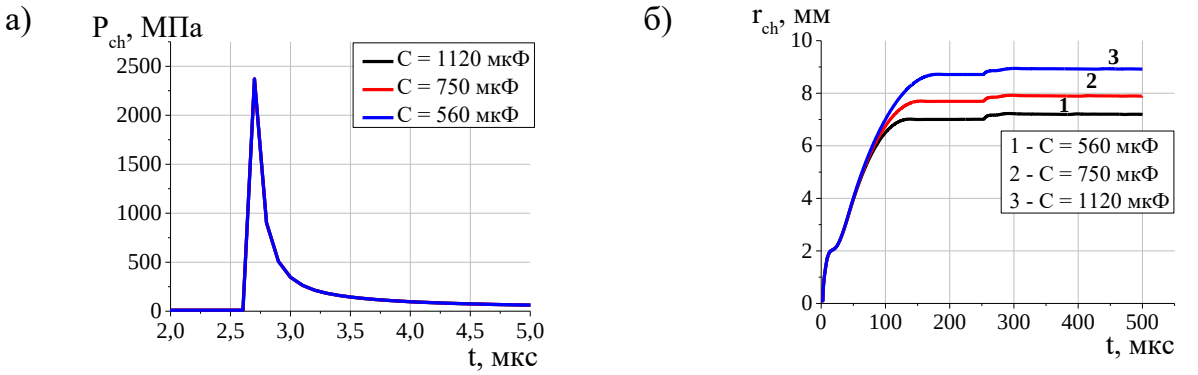
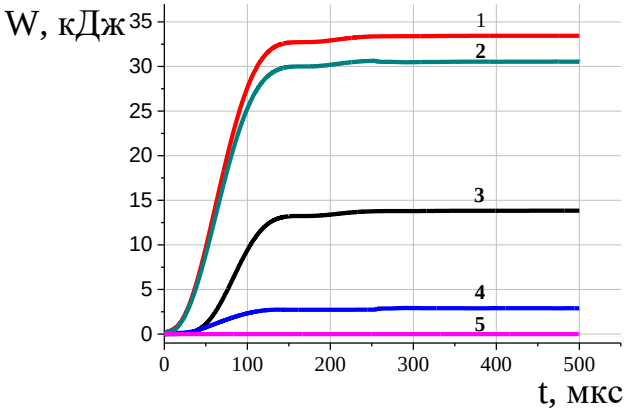



Рисунок 16 – Зависимости характеристик плазменного канала от емкости генератора при $U_0$=13 кВ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022 Ом

На рисунке 17 графически отображено распределение энергии накопителя на каждом этапе ее преобразования при $U_0$ =13 кВ, C=560мкФ, $L$=2 мкГн, $rz$=0,022 Ом. Из графиков видно, что основная энергия накопителя, как упоминалось ранее, выделяется за первый полупериод колебаний тока в разрядном канале (кривая 1), а энергия ударной волны составляет небольшую часть от общего количества выделенной энергии. Обзор литературных

данных свидетельствует о том, что энергия, затрачиваемая на излучение и истечение плазмы ($W_{izl}$) составляет не более 5 %, поэтому при моделировании этим показателем пренебрегаем.




1 – энергия в канале ($W_{ch}$); 2 – энергия плазмы ($W_{pl}$); 3 – энергия омических потерь ($W_{rz}$); 4 – энергия ударной волны ($W_{ws}$); 5 – энергия излучения плазмы ($W_{izl}$)

Рисунок 17 – Распределение энергии накопителя при $U_0$=13 кВ, С=560мкФ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022 Ом

Последующие колебания тока слабо влияют на эффективность преобразования энергии. Это обусловлено тем, что разрядный канал может являться источником импульсной нагрузки лишь на начальном этапе разряда (в течение $t = T_{0,5}$). Это можно проследить и по объемной плотности энергии (рисунок 18) в разрядном канале.

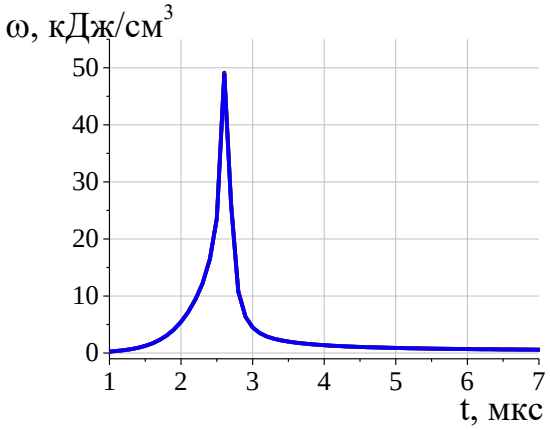



Рисунок 18 –Объемная плотность энергии при $U_0$=13 кВ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022 Ом

В интервале $t \leq T_{0.5}$ канал интенсивно расширяется и генерирует в окружающий материал ударную волну. В дальнейшем ($t > T_{0.5}$) объем канала возрастает, объемная плотность энергии значительно снижается и, соответственно, разрядный канал теряет свойства источника взрывного импульсного нагружения. В связи с этим дополнительный ввод энергии во второй и последующих колебаниях тока менее эффективен.

Ниже приведены энергетические характеристики волнового процесса (рисунки 19, 20), соответствующие первому полупериоду колебаний разрядного тока $t=T_{0,5}$.

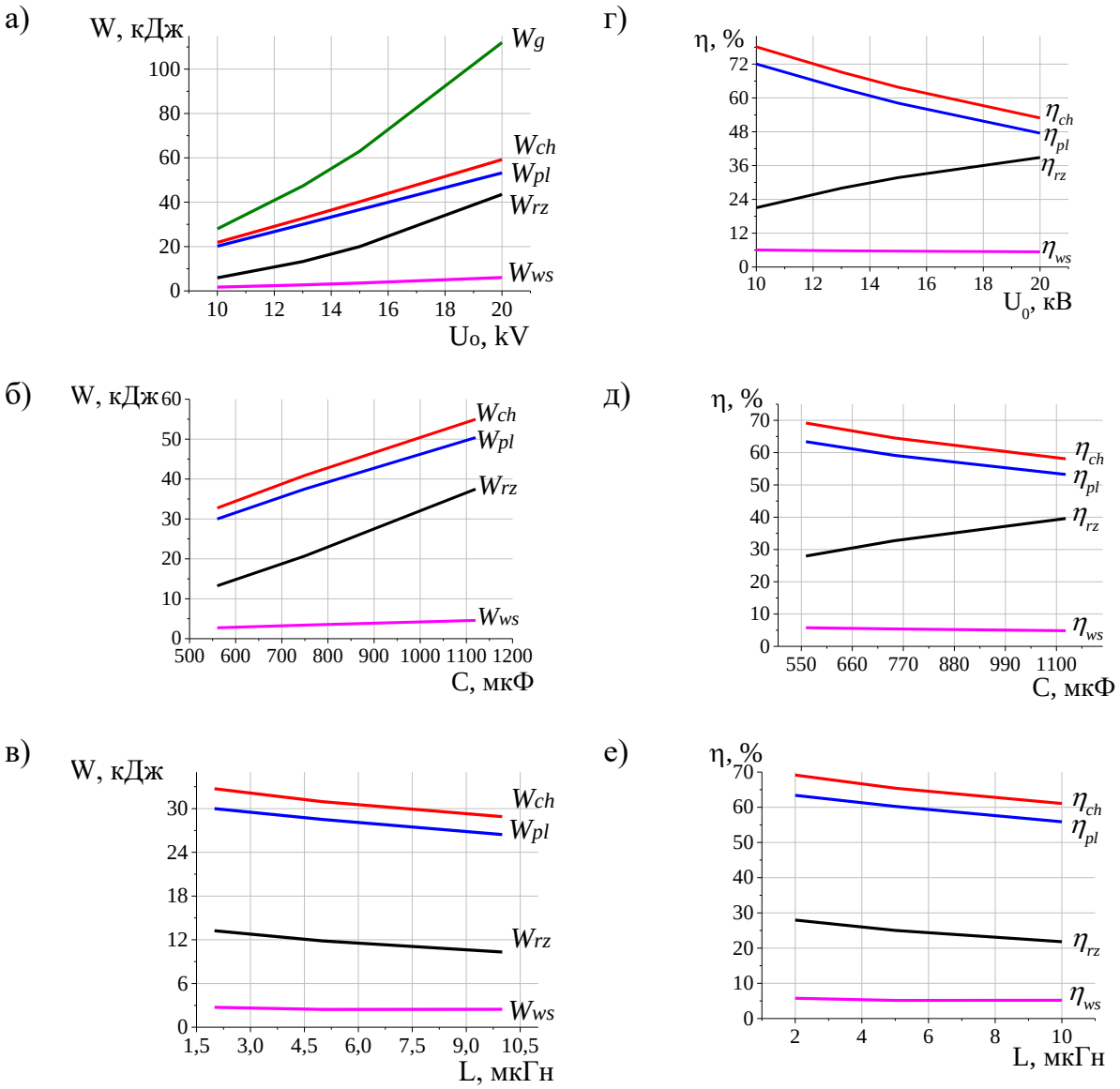



Рисунок 19 – Зависимость энергетических характеристик электровзрыва (а–в) и коэффициентов преобразования энергии (г–е) от параметров генератора

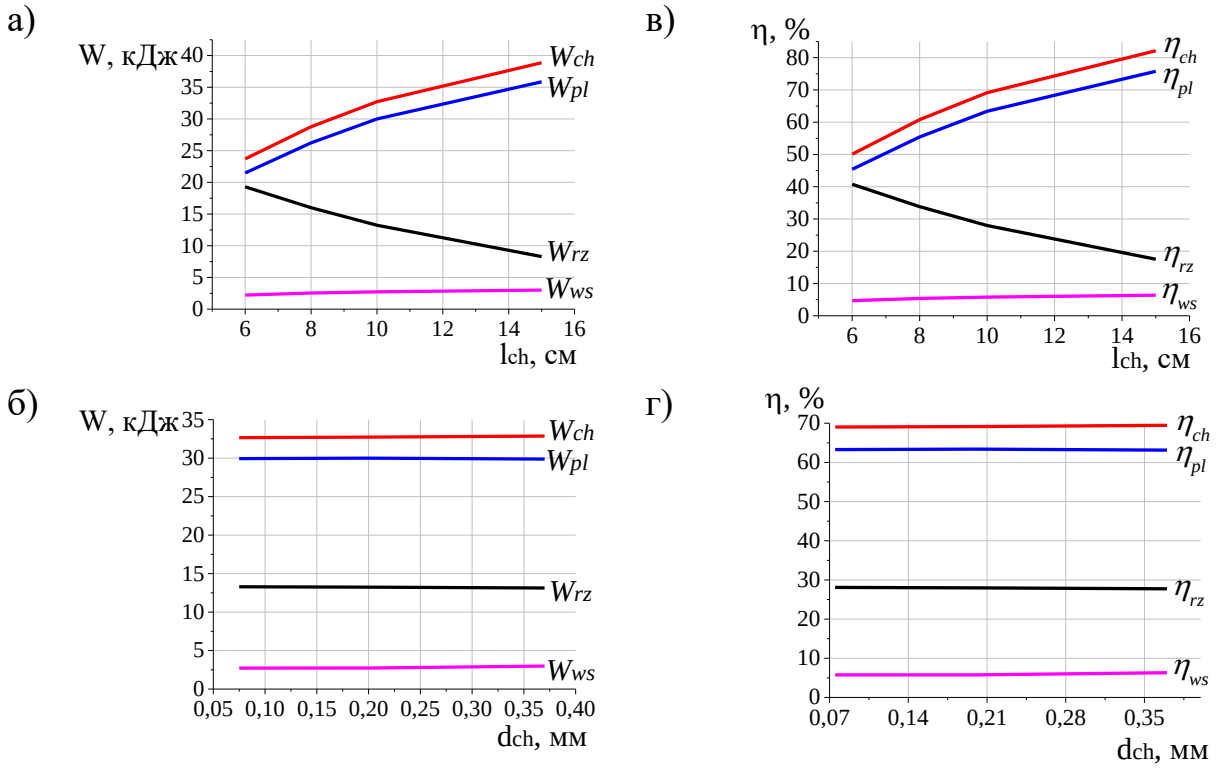



Рисунок 20 – Зависимость энергетических характеристик электровзрыва (а, б) и коэффициентов преобразования энергии (в, г) от параметров проводника

При изменении соответствующих параметров генератора ($C \in [560, 1120]$ мкФ, $U_0 \in [10, 20]$ кВ, $L \in [10, 25]$ мкГн), отмечается увеличение энергозапаса источника за счет его емкости или зарядного напряжения в интервале времени $t \leq T_{0,5}$, а при изменении индуктивности наблюдается обратная картина (рисунок 19, в), т.е. увеличение индуктивности приводит к снижению эффективности преобразования электрической энергии в ударную волну.

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, а также прирост энергии волны в течение $t \leq T_{0,5}$. В результате значения $\eta_{ch}$ и $\eta_{ws}$ снижаются.

С увеличением длины канала растет его сопротивление, увеличивается доля энергии, выделяемая в канале и, соответственно растут значения $\eta_{ch}$ и $\eta_{ws}$ (рисунок 20, в).

# 4 Исследование ударно-волновой динамики при электроразрядном откole твердых тел

## 4.1 Влияние параметров генератора и взрываемого проводника

В данном разделе рассмотрим зависимости влияния параметров разрядной цепи генератора и длины взрываемого проводника на распределение радиальных ($\sigma_R$) и тангенциальных ($\sigma_\tau$) напряжений в волне.

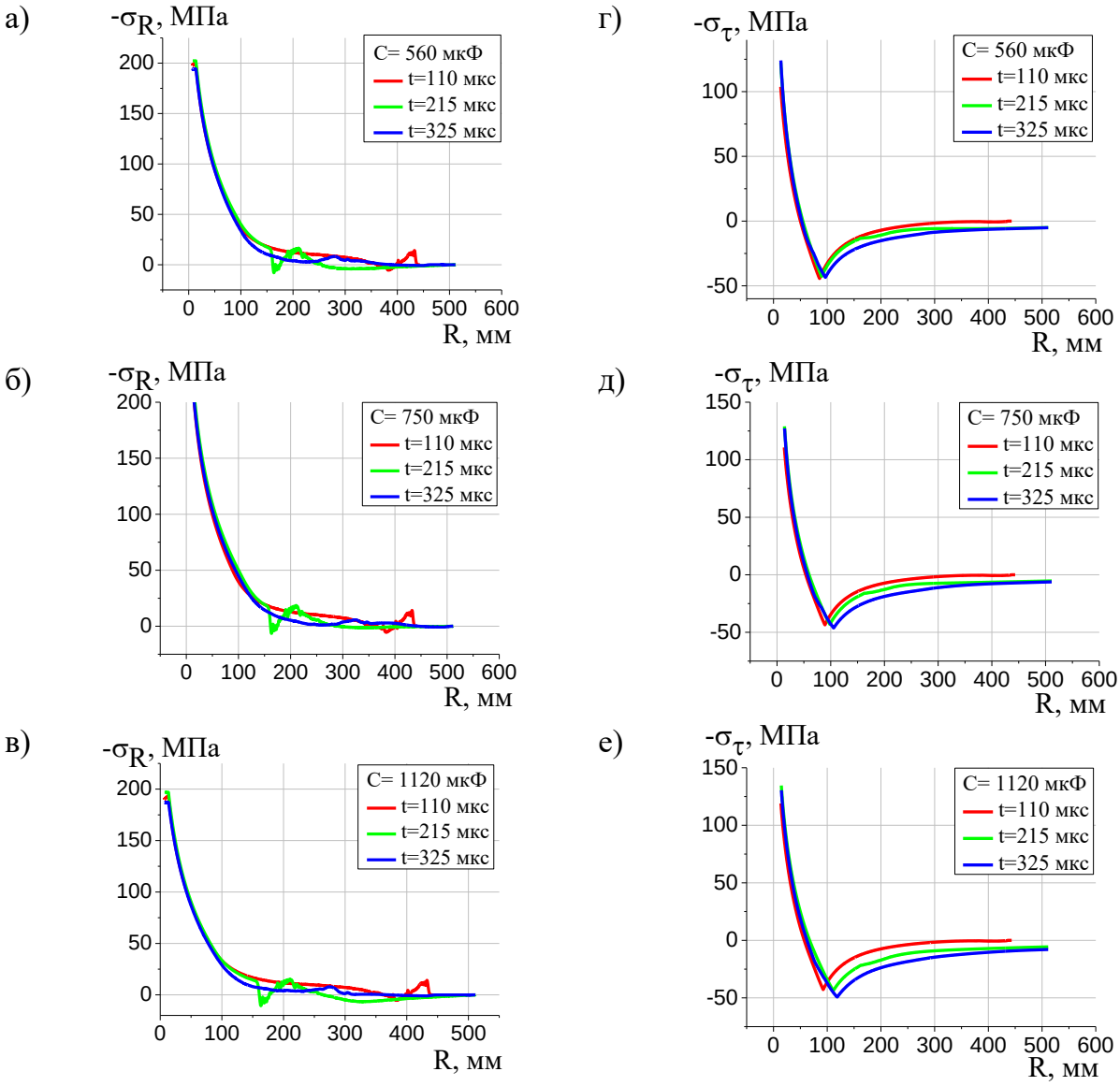



Рисунок 21 – Зависимость радиальных $\sigma_R$ (а–в) и тангенциальных $\sigma_\tau$ (г–е) напряжений от емкости генератора

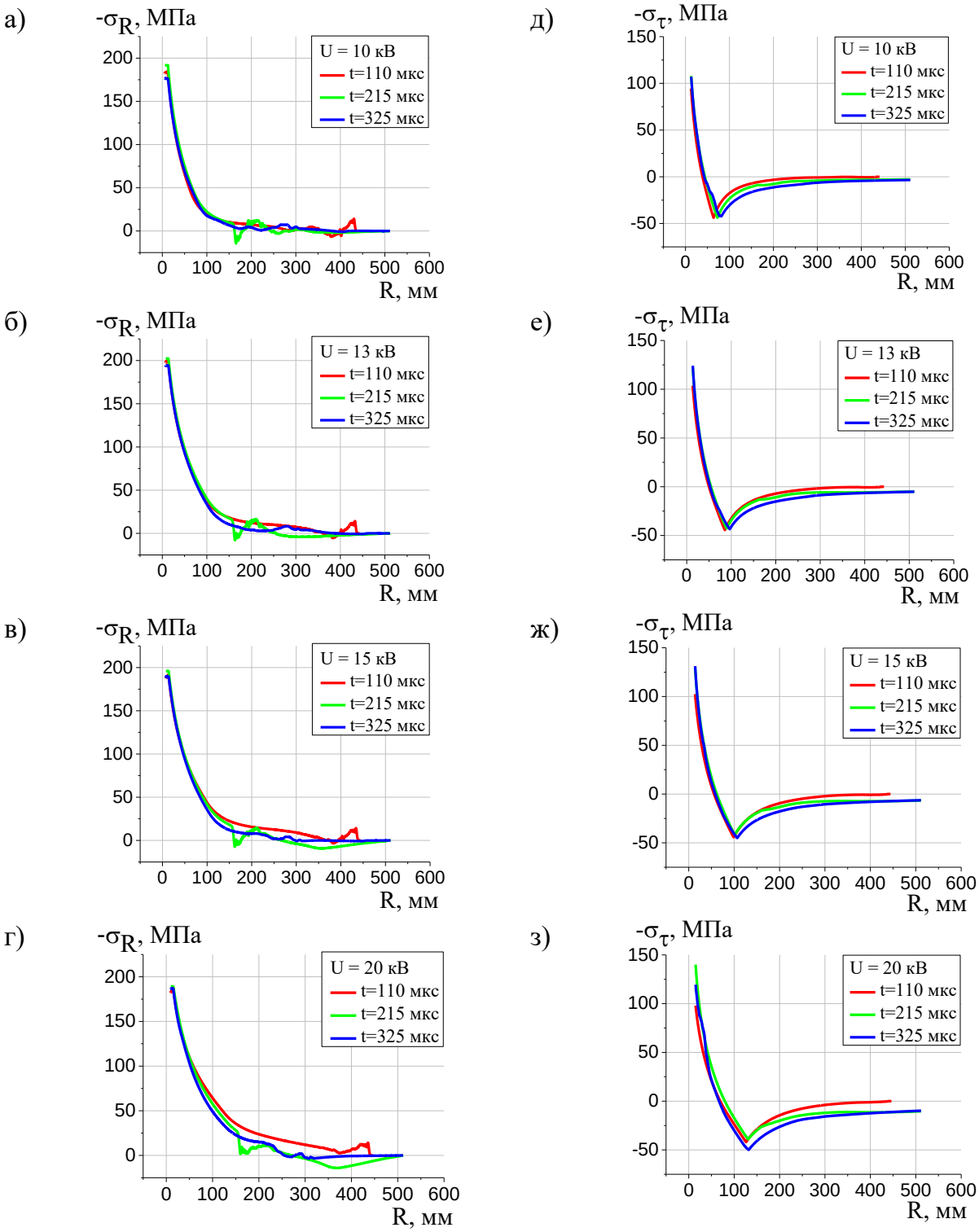



Рисунок 22 – Зависимость радиальных $\sigma_R$ (а-г) и тангенциальных $\sigma_\tau$ (д-з) напряжений от начального напряжения

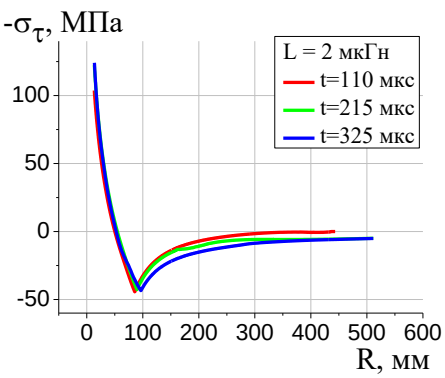
Нас интересует влияние отраженной волны на картину разрушения, это связано с предположением о том, что при взаимодействии прямой и отраженной волн в материале усиливается действие растягивающих напряжений, для которых материалы обладают меньшим значением предела

прочности, чем при сжатии. По данным рисунков 21(а – в) можно сказать, что при действии радиальных напряжений отраженная от свободной поверхности волна не влияет на растягивающие усилия при разрушении, а в момент времени t=215 мкс (время когда волна достигает периферии), под действием прямой волны можно заметить область растягивающих напряжений, формирующуюся на расстоянии порядка 250 мм в материале (при С = 1120 мкФ), что стимулирует зарождение и рост трещины. Из рисунка 21 (г – е) видно влияние отраженной волны в тангенциальном направлении, область растягивающих напряжений формируется раньше (уже на расстоянии 70 мм от разрядного канала). В зависимости профилей механических напряжений от напряжения генератора (рисунок 22) наблюдается похожая ситуация.

В качестве исследуемого материала использовался бетон класса В22, его прочность на сжатие составляет 22 МПа, на растяжение 2,2 МПа. Исходя из этого, можно сделать вывод, что даже при действии прямой волны (t=215) длина трещины становится соизмеримой с расстоянием до свободной поверхности, что может служить основанием для предположения откола в этом направлении, а с увеличением значений С и $U_0$, вероятность развития магистральной трещины, формирующей откол увеличивается.

Влияние индуктивности генератора (рисунок 23) и длины проводника (рисунок 24) на ударно-волновую динамику приведено только для тангенциальных напряжений, так как они вносят наибольший вклад в процесс развития электроразрядного откола.

а)




б)

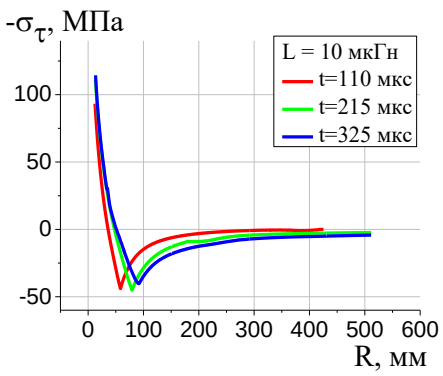
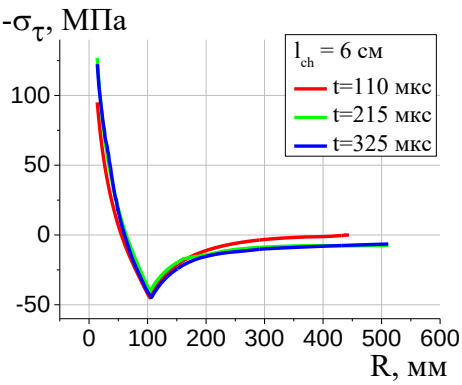



Рисунок 23 – Зависимость растягивающих $\sigma_\tau$ (д-з) напряжений от индуктивности

Из рисунка 23, для значений индуктивности 2 мкГн и 10 мкГн, видно, что она влияет на амплитуду растягивающих напряжений как прямой, так и отраженной волны, но при этом с увеличением индуктивности зона растягивающих напряжений покрывает меньшую область материала, что свидетельствует о том, что рост радиальных трещин прекратится. Влияние длины инициирующего взрыв проводника на профили распространяющихся в бетоне волн механических напряжений приведено на рисунке 24. Видно, что с увеличением длины проводника амплитуда растягивающих тангенциальных напряжений в волне увеличивается незначительно. Однако заметно это влияние на профиль отраженной волны при большем значении длины проводника (15 см).

а)




б)

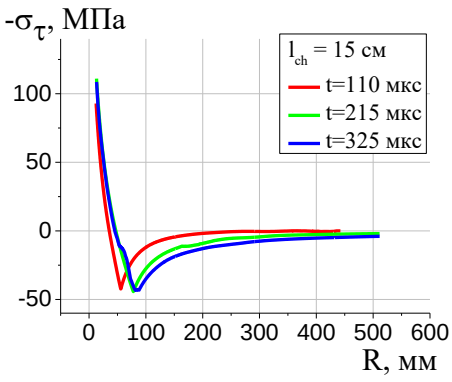



Рисунок 24 – Зависимость растягивающих $\sigma_\tau$ (д-з) напряжений от длины проводника

Изменяя параметры контура, можно увеличить область растягивающих напряжений для повышения эффективности процесса электроразрядного откола.

## 4.2 Влияние габаритов образца и физико-механических свойств исследуемого материала

Область растягивающих напряжений увеличивается при суммарном воздействии прямой и отраженной от свободной поверхности материала волн. Ввиду этого можно предположить, что вследствие снижения амплитуды фронта распространяющейся на периферию твердого тела волны, сила воздействия отраженной волны на процесс образования области растягивающих напряжений с увеличением расстояния до свободной поверхности твердого тела будет уменьшаться. В предыдущих экспериментах, расстояние до свободной поверхности в материале составляло 50 см, поэтому для того чтобы оценить влияние размеров исследуемого материала на профили ударно-волновых возмущений в системе конденсированных сред полиэтилен–бетон, необходимо дополнительно рассмотреть распределение тангенциальных напряжений для значений расстояния до свободной поверхности твердого тела – 30 см и 90 см (рисунок 25).

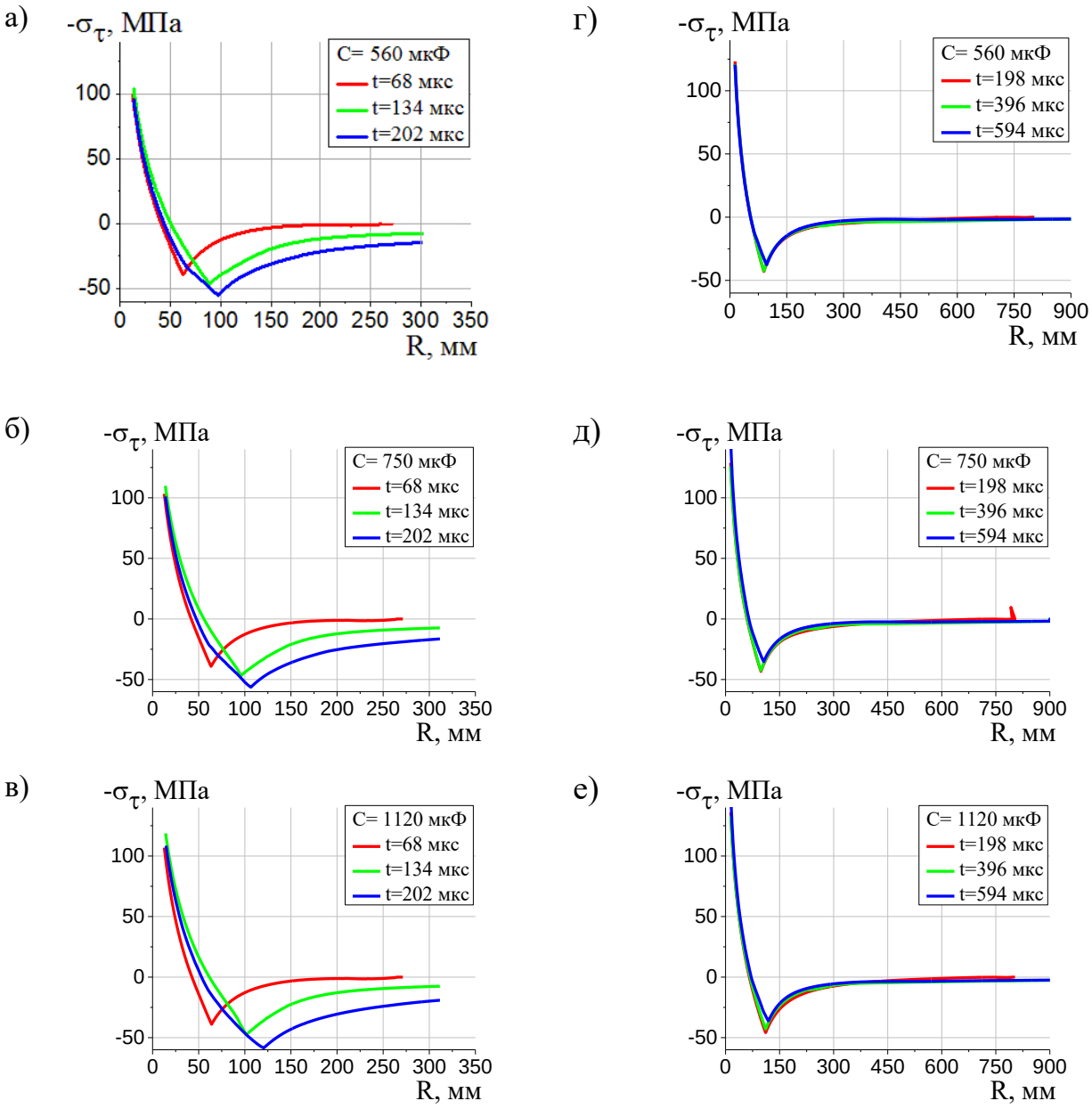



Рисунок 25 – Зависимость тангенциальных $\sigma_\tau$ напряжений от расстояния до свободной поверхности равного 30 см (а-в) и 90 см (г-е)

Анализируя профили распространяющихся волн механических напряжений при разных расстояниях до свободной поверхности, можно заключить, что чем меньше расстояние до свободной границы материала, тем раньше формируются условия для образования области растягивающих напряжений как в прямой, так и в отраженной волне. При этом наибольший вклад в развитие растягивающих усилий в материале создает отраженная от стенок блока волна. С увеличением расстояния до свободной поверхности, влияние отраженных волн на формирование областей растягивающих

напряжений уменьшается. Варьирование значений емкости генератора (рисунок 25) оказывает незначительное влияние лишь на амплитуду механических напряжений. По данным рисунка 25 (г – е) следует вывод, что при расстоянии 90 см до свободной поверхности материала при параметрах генератора $U_0$ =13 кВ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022 Ом и различных значениях С рост магистральных трещин останавливается до достижения периферии твердого тела. Таким образом, можно констатировать тот факт, что для отрыва отдельной части твердого тела от его массива необходимо выполнять шпуры на небольшом расстоянии от свободной поверхности, в этом и заключается принцип откольного разрушения.

Исследование влияния физико-механических свойств материала на эффективность электроразрядного воздействия проводилось для кварцита и песчаника (рисунок 26), характеристики которых представлены в таблице 5. Расстояние от канала разряда до свободной поверхности в материале составляло 30 см.

Таблица 5 – Характеристики кварцита и песчаника

| Материал | $\rho_0, кг/м^3$ | $c_0$ | $n$ |
|---|---|---|---|
| Кварцит | 2680 | 6100 | 1,24 |
| Песчаник | 2200 | 2180 | 1,42 |

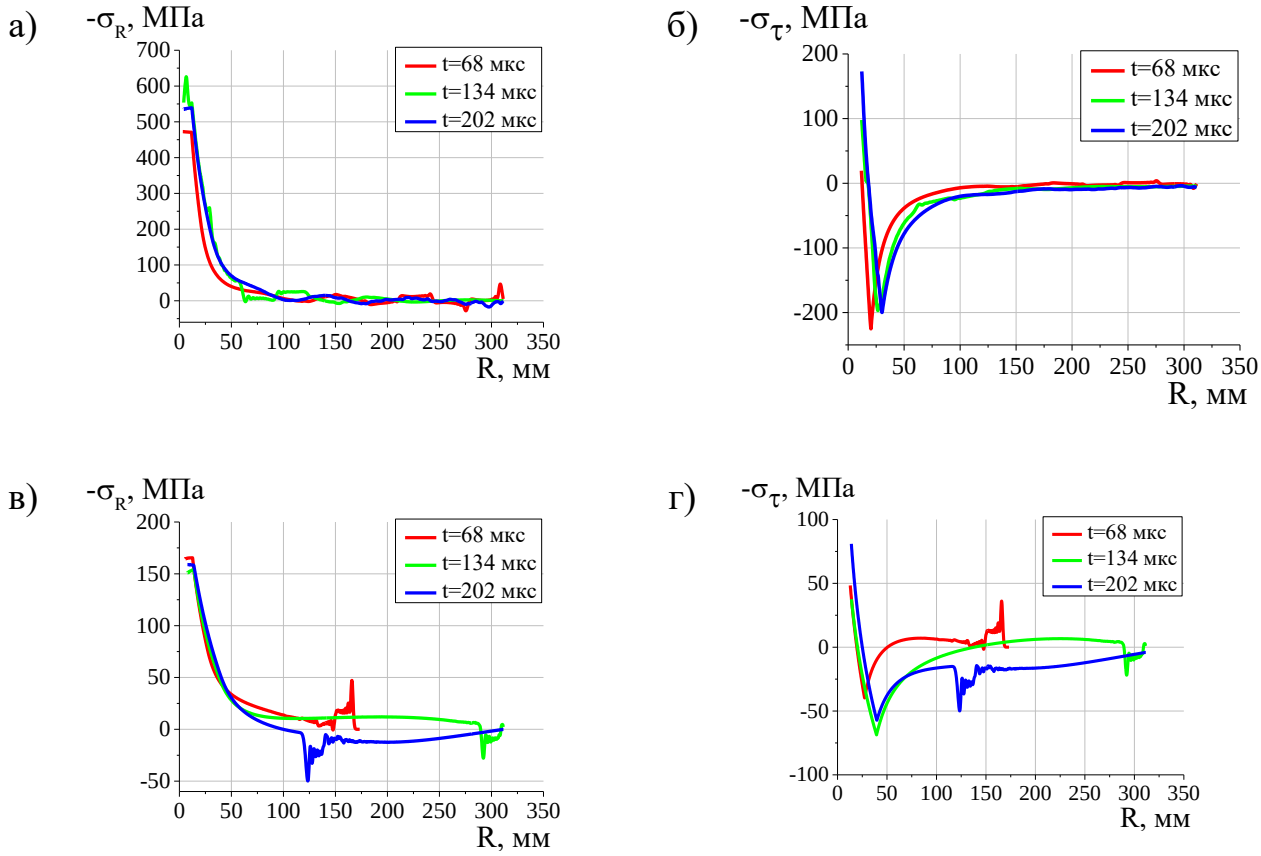



Рисунок 26 – Зависимость волновой динамики от физико-механических свойств кварцита (а, б) и песчаника (в, г) при $U_0$=13 кВ,С = 560 мкФ, $L$=2 мкГн, $r_z$=0,022

Для кварцита радиальные напряжения на рассматриваемом расстоянии до свободной поверхности остаются сжимающими, при радиальных напряжениях на расстоянии порядка 20 мм в материале начинает формироваться область растягивающих напряжений, что способствует зарождению трещин и их рост заканчивается примерно на 150 см. Влияние отраженной волны на процесс откольного разрушения не значителен.

Формирование растягивающих напряжений в песчанике в результате воздействия отраженной волны имеет большее значение, чем в случае кварцита, зона действия растягивающих тангенциальных напряжений в этом случае занимает все расстояние в материале до периферии.

Амплитуда механических напряжений в кварците в разы больше, чем в песчанике. Такие различия в волновой динамике объясняются акустической

жесткостью материалов, которая зависит от плотности материала и скорости звука в нем, и пределов прочности материала на сжатие и растяжение.

### 4.3 Исследование влияния режима работы генератора

Как было упомянуто в разделе 1.3, для зарождения трещин в материале необходимо использовать «быстрый» режим энерговвода в разрядный канал, а для их роста «медленный». В соответствии с этим утверждением исследуем два режима работы генератора.

Первый режим – $U_0$=10 кВ, C=96 мкФ, $L$=1,22 мкГн, $rz$=0,022 Ом.

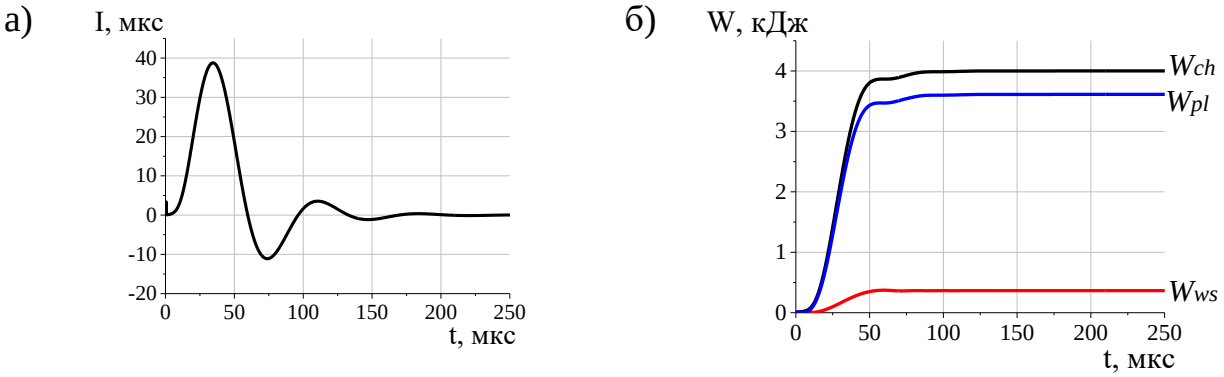



Рисунок 27 – Зависимости тока (а) и трансформации энергии в канале (б) от времени

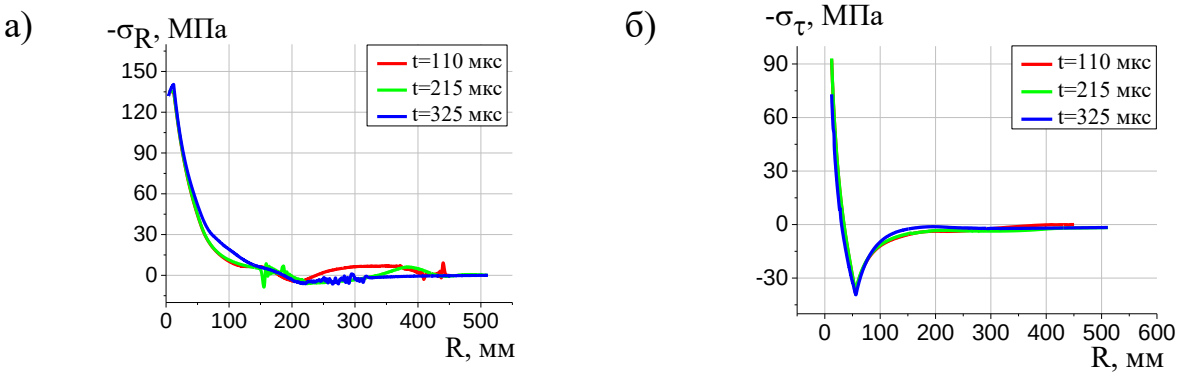



Рисунок 28 – Распределение радиальных (а) и тангенциальных (б) напряжений при первом режиме работы генератора

Второй режим – $U_0$=20 кВ, С=24 мкФ, $L$=1,22 мкГн, $rz$=0,022 Ом.

а) б)

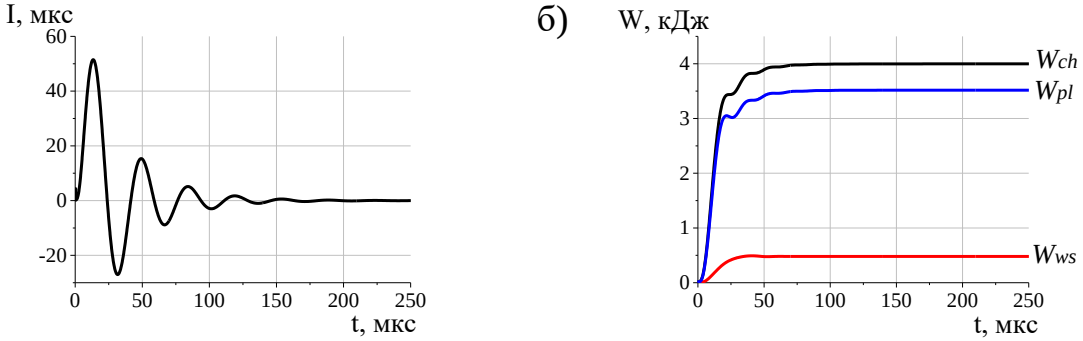



Рисунок 29 – Зависимости тока (а) и трансформации энергии в канале (б) от времени при втором режиме работы генератора

а) б)

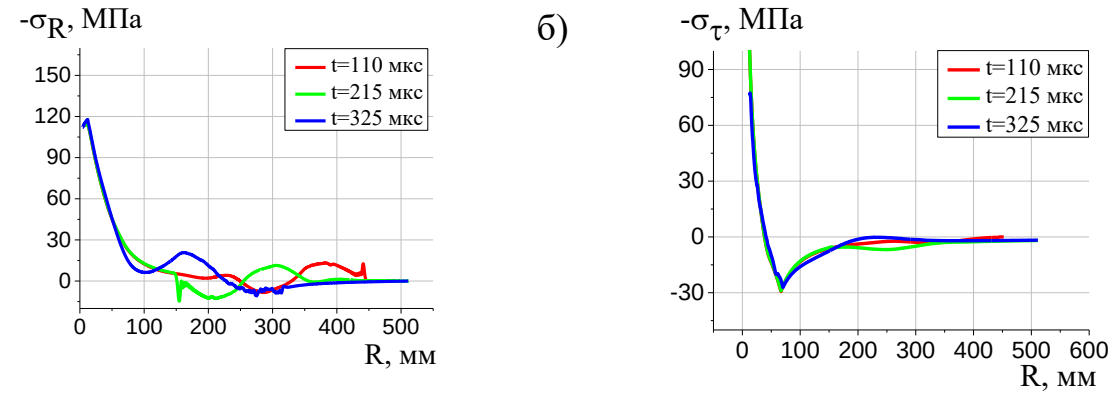



Рисунок 30 – Распределение радиальных (а) и тангенциальных (б) напряжений при втором режиме работы генератора

Рассмотренные режимы работы генератора, при запасенной генератором энергии 4,8 кДж, позволяют сделать следующие выводы:

1) при быстром вводе энергии в канал (второй режим) откол формируется за счет растягивающих радиальных и тангенциальных напряжений в прямой волне (t=215), влияние отраженной волны слабо выражено.

2) при медленном вводе энергии в канал (первый режим) формирование откола происходит под действием тангенциальных растягивающих напряжений. Влияние отраженной в этом случае также менее значимо.

## 5 Верификация модели

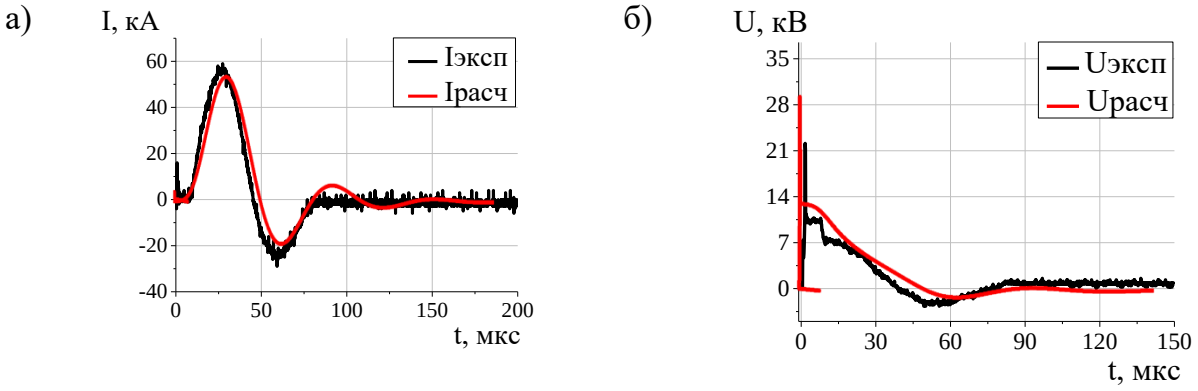



Рисунок 31 – Зависимости тока (а) и напряжения (б) от времени для первого режима работы генератора

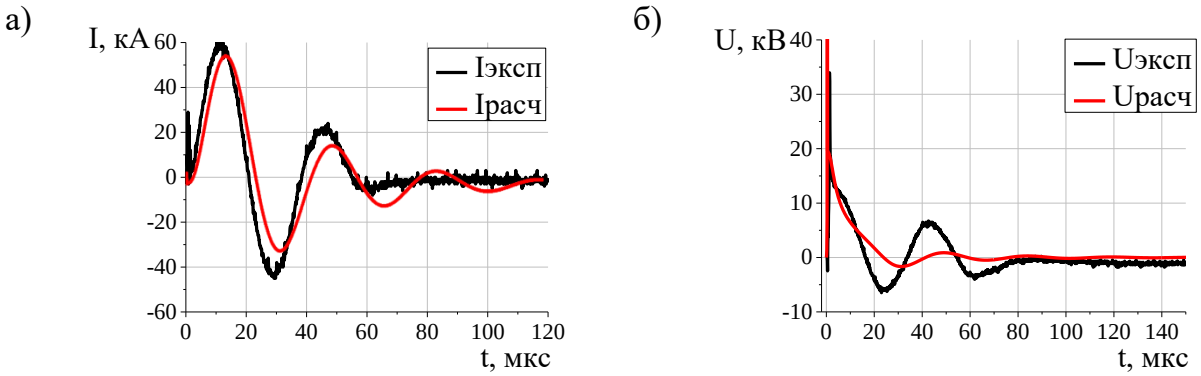



Рисунок 32 – Зависимости тока (а) и напряжения (б) от времени для второго режима работы генератора

Сравнение расчетных и экспериментальных данных в этой работе было проведено только для двух представленных режимов работы генератора. По построенным графикам тока и напряжения наблюдается допустимая схожесть полученных расчетных данных с экспериментальными. Для подтверждения соответствия рассчитанных с помощью модели данных результатам, полученным при проведении реальных экспериментов, необходимо провести ряд дополнительных исследований.

## Заключение

В ходе проделанной работы была разработана феноменология электроразрядного разрушения и откола твердых тел при электровзрыве проводника.

С помощью разработанной физико-математической модели электровзрыва в конденсированных средах, включающей генерацию ударно-волновых возмущений расширяющимся плазменным каналом в капилляре, формирование изменяющихся полей механических напряжений и упругопластических деформаций, было проведено компьютерное моделирования процесса электроразрядного откола.

Исследования показали, что разрядный канал является источником ударно-волновых возмущений только на первом полупериоде разрядного тока, когда достигается максимальная мощность энерговыделения и высокая объемная плотность энергии в канале, последующие колебания тока оказывают слабое влияние на эффективность откола.

Исследовано влияние параметров генератора, проводника и исследуемого материала на энергетические характеристики и ударно-волновую картину откола. При увеличении значений $U_0$ и C, увеличивается запасаемая генератором энергия, и следовательно, энергия ударной волны. Увеличение диаметра и длины взрываемого проводника нецелесообразно с точки зрения потерь энергии на его нагрев и последующий взрыв.

В работе показано, что с увеличением расстояния до свободной поверхности разрушаемого материала уменьшается влияние отраженной волны на формирование растягивающих напряжений, формирующих зарождение и рост трещин. Для зарождения трещин необходимо реализовывать режимы энерговвода в канал с меньшим периодом колебаний тока.

Для прогноза возможной картины откольного разрушения применялся критериальный подход, в основе которого лежит условие для разрушения твердых тел при достижении ими предела прочности на растяжение.

В работе проведены оценки коммерческого, инновационного потенциала и экономической эффективности исследования, рассмотрены вопросы социальной и экологической безопасности технологического процесса электроразрядного откола.

# Приложение А

Раздел 1.1

**Physical and thermodynamic processes in the discharge channel**

Раздел 3

**Research of power characteristics of an electrodischarge splitting off**

Раздел 4

**Shock wave dynamics at solid bodies electrodischarge splitting off**

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|---|---|---|---|
| 4ТМ41 | Цаер Лидия Андреевна | | |

Консультант кафедры ВЭСЭ:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|---|---|---|---|
| Ассистент кафедры ВЭСЭ ИФВТ | Карнаухова Анна Алексеевна | к.ф.-м.н. | | |

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ФТИ:

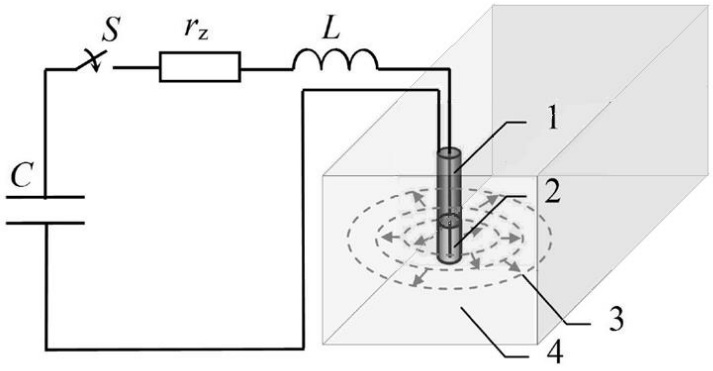
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|---|---|---|---|
| Преподаватель каф. ИЯ ФТИ | Игна Ольга Николаевна | д.пед.н., доцент | | |

### 1.1A Physical and thermodynamic processes in the discharge channel

The way of solid dielectric and semiconducting materials destruction with an electric discharge is based on use of pulsed electric discharge energy at their direct electric breakdown.

Use of the phenomenon of conductor electric explosion in the shot hole is a perspective way for splitting off and destruction of rocks. Electric explosion represents a complex of interdependent processes: discharge initiation and development, discharge channel expansion, which is followed by effective energy transformation of the powerful current pulse to shock waves energy, creating the field of the mechanical tension leading to cracks development and growth and, as a result, the destroying deformations in material.

In experimental and technological electric discharge installations capacitor pulse generators of a high voltage [1] which work is described by means of the equivalent scheme shown in figure 1A are most often used.




1 – the coaxial bringing cable; 2 – the cartridge (the copper conductor in polyethylene); 3 – the shock and wave disturbance in material, generated by channel expansion; 4 – the destroyed material

Figure 1A – Scheme of electric discharge destruction of solid materials [2]

Resistance *rz* and inductance *L* consist of resistance and inductance of the capacitor bank *C*, a spark gap in the gas-discharge switch *S*, a busbar and the bringing cable – 1. The cartridge – 2 represents the solid cylinder from plastic

material (polyethylene) with high acoustic rigidity in which central axis the exploding copper conductor is placed [2].

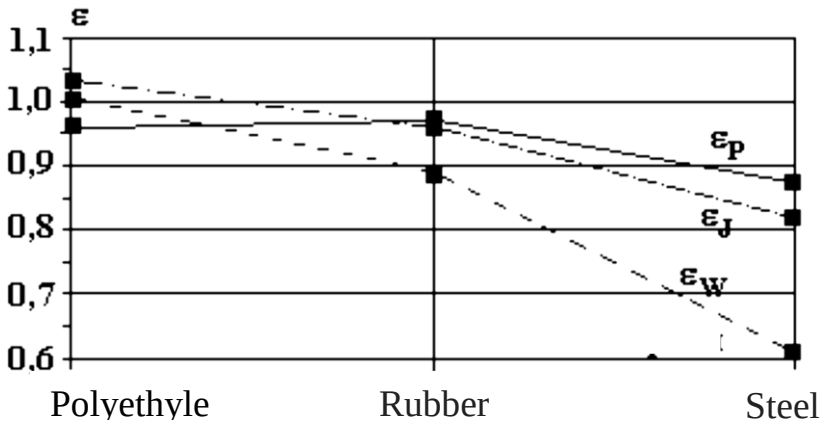
The choice of the conductor for discharge channel initiation in a solid body (the phenomenon of conductor electric explosion) is caused generally by an opportunity to reduce operating voltage level of technological installations, and also to provide development of the plasma channel in the location of the conductor.

Polyethylene is the medium for shock wave transfer to the destroyed material, which amplitude and energy depends on physical-mechanical properties of this medium. Use of polyethylene allows increasing the generated wave energy (~ 20-25%) and pressure amplitude (~ 25-30%). According to the table 1A [3] it is evident that polyethylene transfers wave energy most effectively. Study of energy release in the discharge channel was conducted using the electric energy storage with a charge voltage of 10 kV, capacity of 12 μF, inductance 1,067 μH, ohmic resistance $r_z$=0,0197 Ohm. The cartridge used in the research was made of polyethylene in cylinder form, with a diameter of 24 mm and exploding copper conductor with a diameter of 0,15 mm and 50 mm long [3].

Table 1A – Efficiency of a shock wave energy transmission from the discharge channel to solid material

| Transmitting medium | Shock wave energy, transferred to a solid matter, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | concrete | granite | marble | sand stone |
| Water | 69,7 | 32,9 | 29,1 | 73,5 |
| Paraffin | 64,7 | 30 | 26,3 | 68,9 |
| Polyethylene | 90,5 | 46,8 | 42 | 89,1 |
| Plasticine | 89 | 46 | 41,3 | 87,6 |

S.G. Poklonov, V. G. Zhekul, A.P. Smirnov [4] have reported during pilot studies, positive influence of an elastic barrier from polyethylene to pressure wave transfer parameters at an electric discharge (figure 2A).




Amplitudes of: $\varepsilon_P$ – pressure pulse; $\varepsilon_J$ – specific pulse; $\varepsilon_W$ – acoustic energy

Figure 2A – Transformation parameters coefficients of pressure wave by the limiting covers from various materials [4]

The choice of polyethylene as a medium, surrounding the conductor is caused also by the fact that in the channel vicinity there is no area of crush and crushing grinding of material, and it allows to avoid considerable expenses of energy on border of the channel.

At short circuit of a key *S*, pulsed current (~10 kA) [5] begins to proceed through the conductor, and within a short period of time (~$10^{-6}$ s) [6] the main energy of the storage *C* is emitted, that leads to conductor heating and its further explosion. On metal vapors in the discharge channel the low-temperature plasma with parameters T ~ (10–12)$10^3$K and pressure upon shot walls (~ 108 – 109 Pa) is formed [5, 6]. There is a sharp increase of internal energy of plasma in the channel, and the power of energy release reaches ~ 200-300 MW (figure 3A). Explosive release of energy in the channel leads to sharp growth of pressure in it up to several hPa (figure 4A) and, respectively, to channel expansion that leads to mechanical tension waves generation which disperse from walls of the discharge channel towards free surfaces in material. Distribution of these waves forms the intense deformed condition of a solid body in the range from tens to hundreds MPa [2] which defines its destruction.

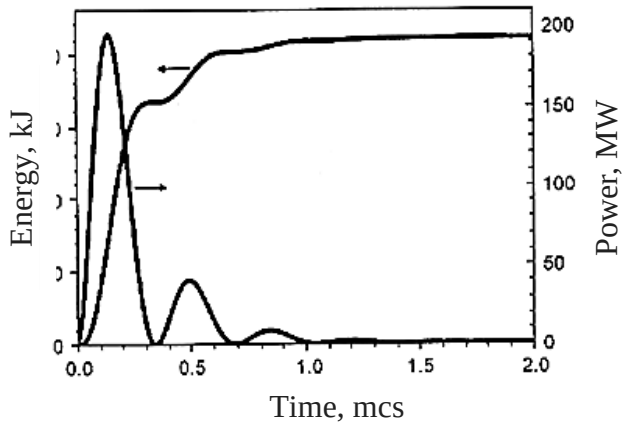



Figure 3A – Time dependences of energy release power and the energy emitted in channel [1]

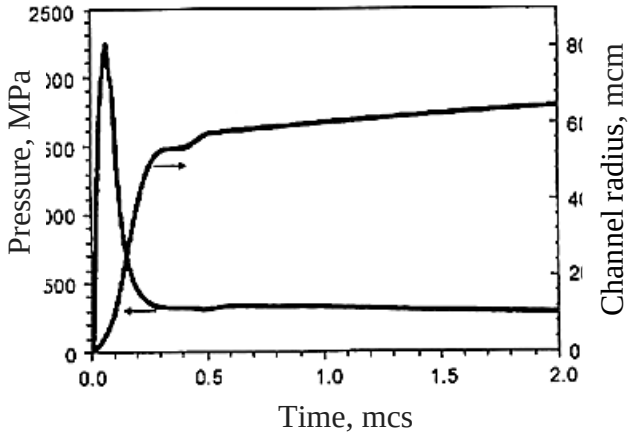



Figure 4A – Time dependences of pressure in the channel and channel radius [1]

Further increase in volume of the discharge channel leads to decrease pressure in it and to delay of its expansion (figure 4A), as the subsequent fluctuations of energy release exert insignificant impact on pressure and channel radius. It means that the main shock impact on the destroyed material is created in the first half-cycle of fluctuations by the waves generated at radial expansion of the channel after conductor explosion.

Speed of channel expansion in time for energy release stages can be calculated, having designated the radius of the channel through $R_0$ in a timepoint $t$, on a formula:

$$V = \frac{R_0}{t}. \quad (1A)$$

Experiments show that the speed of discharge channel expansion at energy release stage for various possible conditions changes slightly. It allows considering

it constant for a crude approach. The sizes and a form of the channel after completion of energy release process generally are defined by the size of the emitted energy and environment properties.

So far for solid bodies the characteristic and an estimation of a channel stage are presented for very limited number of materials and the modes of a power contribution, unlike liquid media. This is connected with the fact that studying of the discharge channel dynamics in solid bodies is difficult due to their opacity, optical inactivity, high complexity of the description taking into account their structure, local changes of properties, etc.

## 3 Research of power characteristics of an electric discharge splitting off

Computer experiments reflecting connection of power characteristics with discharge circuit parameters and the copper conductor were carried out on the basis of the developed physical and mathematical model of electric explosion. Research and the analysis of electric energy transformation regularities of the storage to shock wave influences energy were carried out for the concrete block with the drilled shot in which cavity the polyethylene cartridge with the copper conductor was mounted (the scheme has been provided in section 1A). The electric discharge splitting off occurs only in case of free surface existence of a solid body. At power characteristics research the distance to a free surface of the concrete block from the cartridge location made 50 cm. The polyethylene cartridge was used with a diameter of 24 mm.

Parameters of a discharge circuit were changed in the following ranges: $U_0$= (10–20) kV, S=(560-1120) μF, L=(2–10) μH, $r_z$=0,022 Ohm. Conductor length lch varied from 6 to 15 cm, and diameter – from 0,075 to 0,37 mm.

At the moment, when there is a short circuit of a key S (figure 1A) internal energy and conductivity of the discharge channel increase that leads to the current growth (fig. 15A, a, b). The period of current fluctuations is defined by inductance L and generator capacity C. Positive feedback between a thermal emission and

conductivity causes increase of internal energy of plasma in the channel (fig. 15a, c, d). Power of energy release reaches 500 MW at C=1120 μF. Explosive release of energy in the channel leads to sharp growth of pressure in it (figure 16A, a) ~ 2,4 hPa, causing its expansion (figure 16A, b).

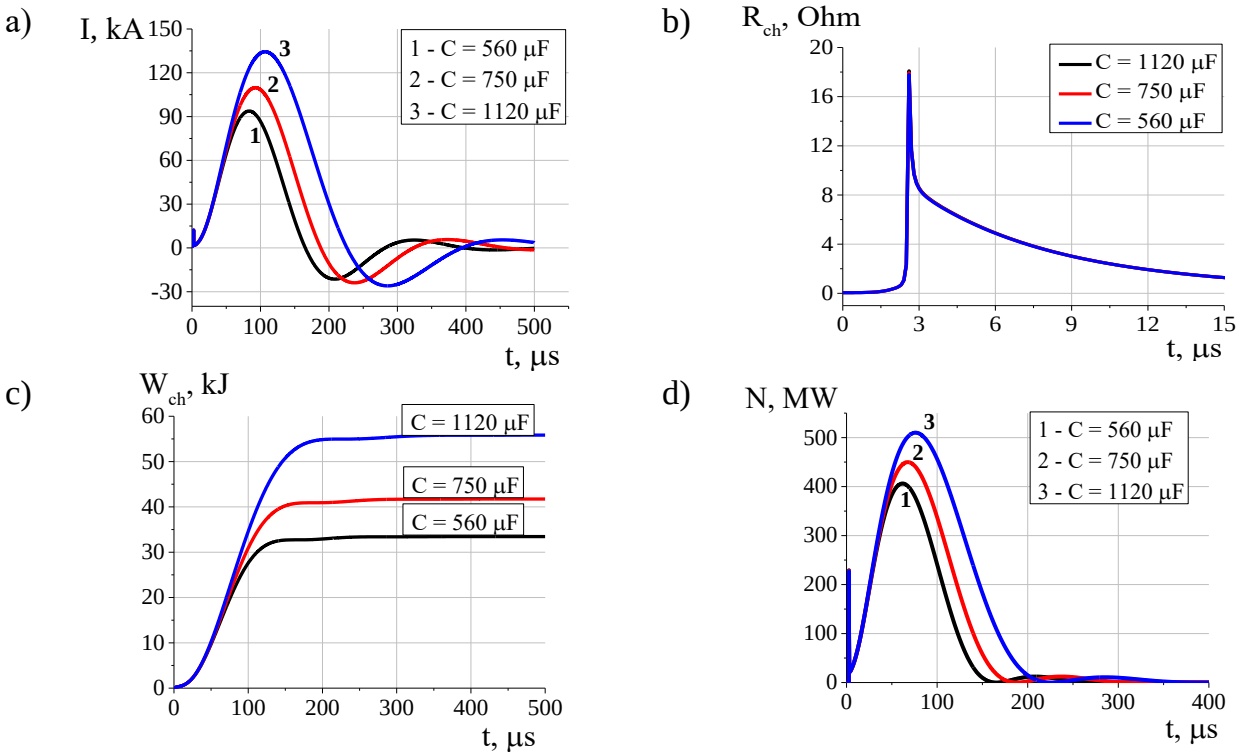



Figure 15A – Dependences of current (a), resistance (b), energy of the channel (c) and power of electroinput (d) from generator capacity at $U_0$ =13 kV, L=2 μH, $r_z$=0,022 Ohm

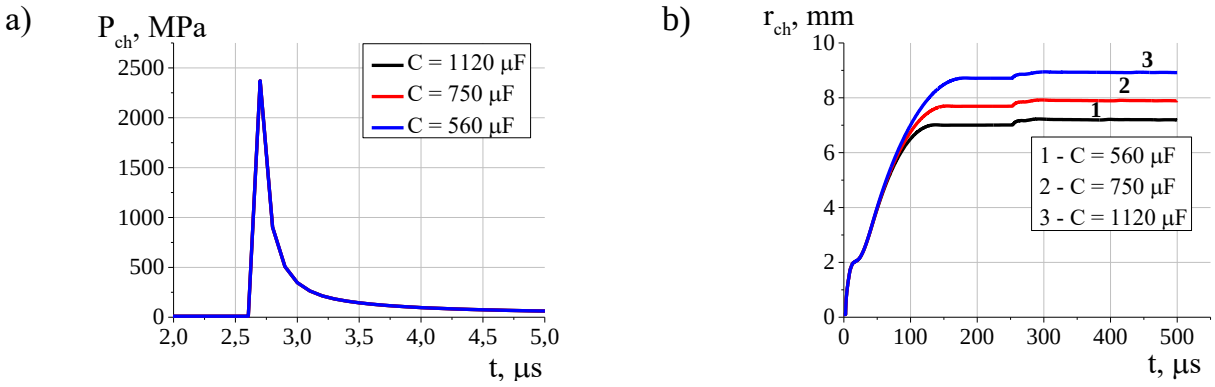
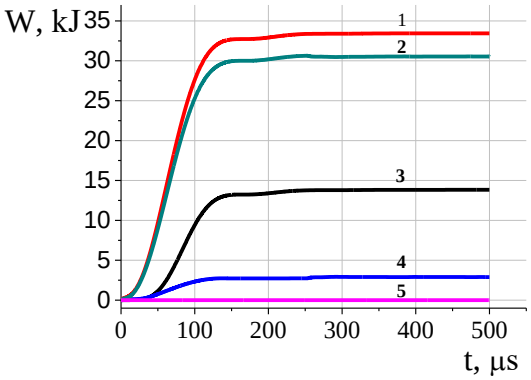



Figure 16A – Dependences of the plasma channel characteristics on generator capacity at $U_0$ =13 kV, L=2 μH, $r_z$=0,022 Ohm

In figure 17A the storage energy distribution at each stage of its transformation to wave perturbation energy is graphically displayed at $U_0$ =13 kV, S=560 μf, L=2 μH, by $r_z$=0,022 Ohm. From graphs it is evident that the main energy of the storage as it was mentioned earlier, is released for the first half-cycle

of current fluctuations in the discharge channel (curve 1), and shock wave energy makes small part of total emitted energy. The review of published data demonstrates that the energy spent for radiation and the outflow of plasma ($W_{izl}$) makes no more than 5% therefore this indicator it is neglected when simulating.




1 – energy in the channel ($W_{ch}$); 2 – energy of plasma ($W_{pl}$); 3 – energy of ohmic losses ($W_{rz}$); 4 – energy of a shock wave ($W_{ws}$); 5 – energy of plasma radiation ($W_{izl}$)

Figure 17A – Distribution of storage energy at $U_0$ =13 kV, S=560μF, L=2 μH, $r_z$=0,022 Ohm

The subsequent current fluctuations poorly influence the efficiency of energy transformation. It is caused by the fact that the discharge channel can be a source of pulsed loading only at the initial stage of discharge (during t ~ $T_{0,5}$). That can be tracked also on the volume density of energy (figure 18A) in the discharge channel.

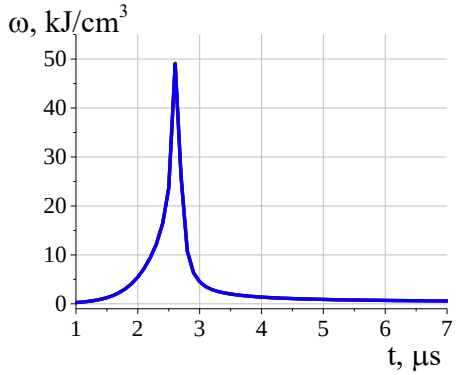



Figure 18A – The volume density of energy at $U_0$ =13 kV, L=2 μH, $r_z$=0,022 Ohm

In the range of $t \leq T_{0.5}$ the channel extends intensively and generates a shock wave in environment. Further ($t > T_{0.5}$) the volume of the channel increases,

the volume density of energy decreases considerably and, respectively, the discharge channel loses properties of explosive loading source. In this regard additional input of energy in the second and the subsequent current fluctuations is less effective.

The power characteristics of wave process (figures 19A, 20A) corresponding to the first half-cycle of discharge current fluctuations of $t=T_{0,5}$ are given below.

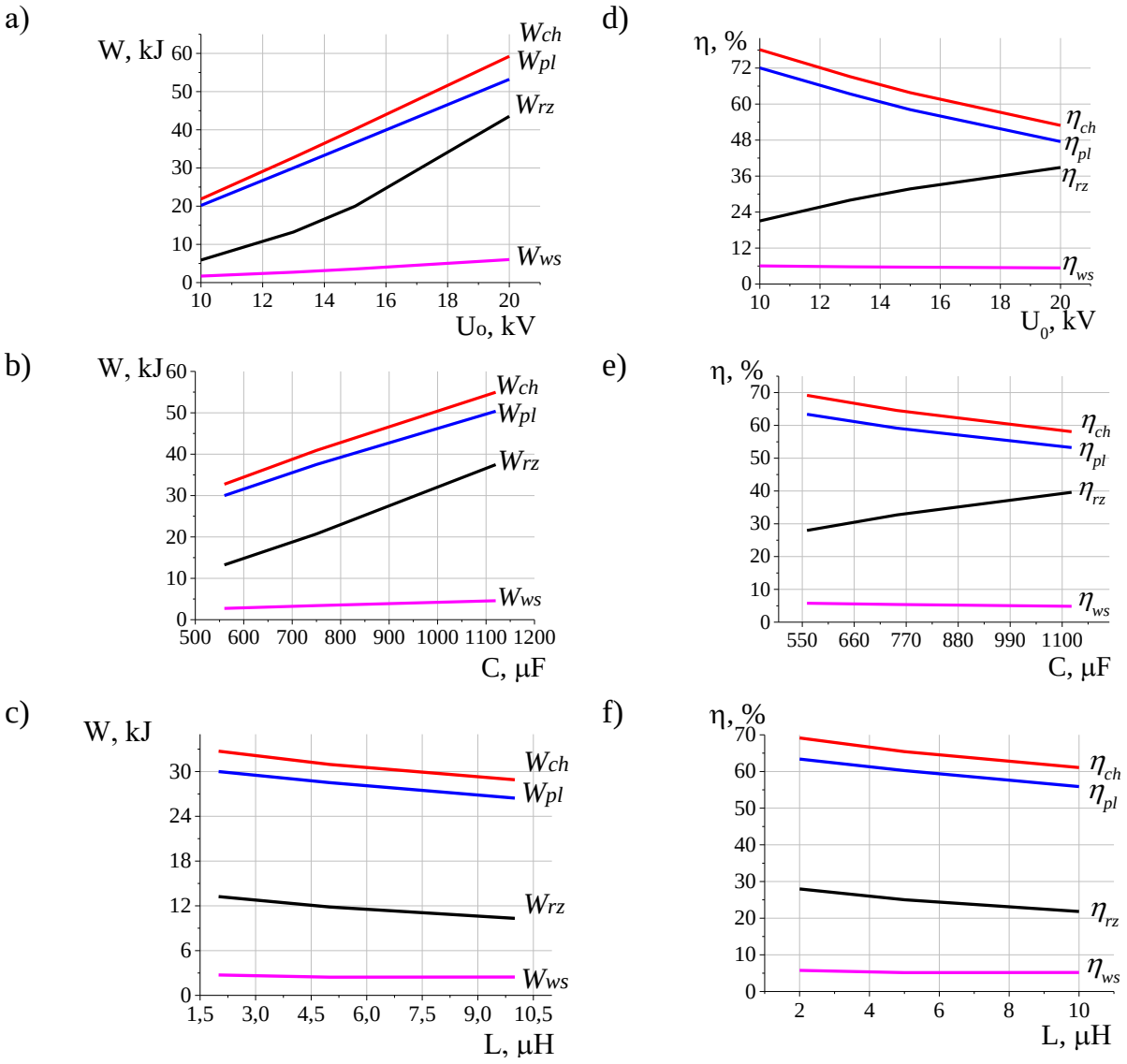



Figure 19A – Dependence of power characteristics of the electric explosion (a - c) and coefficients of energy transformation (d-f) on generator parameters

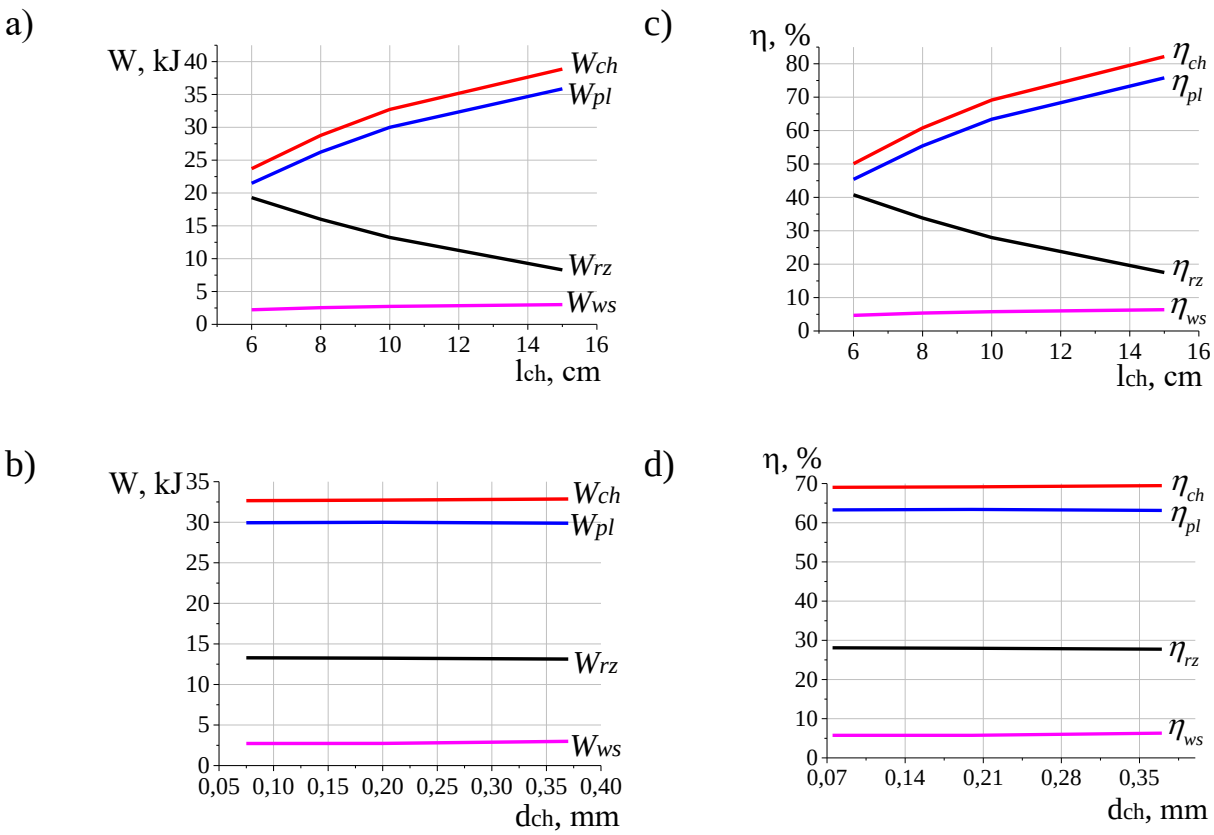



Figure 20A – Dependence of power characteristics of the electric explosion (a, b) and energy transformation coefficients (c, d) on conductor parameters.

At change of the corresponding generator parameters (C ∈ [560, 1120] μF, $U_0$ ∈ [10, 20] kV, L ∈ [10, 25] μH), there is an increase in a power stock energy storage of a source at the expense of its capacity or a charge voltage in the range of time $t \leq T_{0,5}$. And at change of inductance the opposite picture is observed (figure 20A, c), i.e. increase in inductance makes harmful effects on the scheme of energy transformation.

The received regularities are caused by the fact that growth of store energy $W_g$ due to increase in C and $U_0$ advances significantly the corresponding increase in the energy injection into the channel, and also a gain of wave energy during t ≤ by $T_{0,5}$. As a result, values $\eta_{ch}$ and $\eta_{ws}$ also decrease.

With increase in channel length its resistance grows, the energy share released in the channel increases and, respectively, values $\eta_{ch}$ and $\eta_{ws}$ grow (figure 20A, c).

## 4 Shock wave dynamics at solid bodies electric discharge splitting off

In this section we will consider dependences of circuit parameters influence on distribution of compression stress ($\sigma_R$) and tensile stress ($\sigma_\tau$) in a wave.

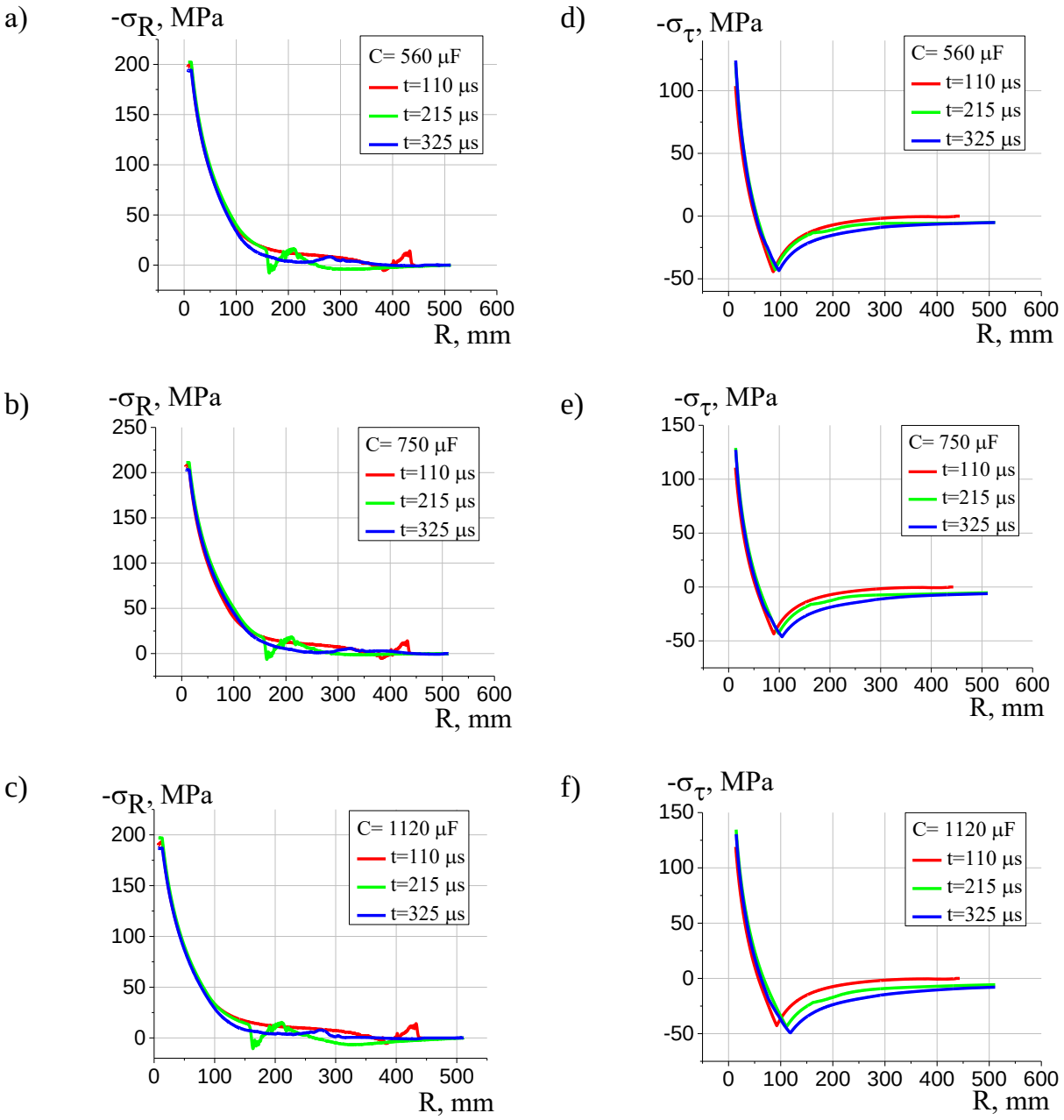



Figure 21A – Dependence compression stress $\sigma_R$ (a - c) and tensile stress $\sigma_\tau$ (d-f) on generator capacity

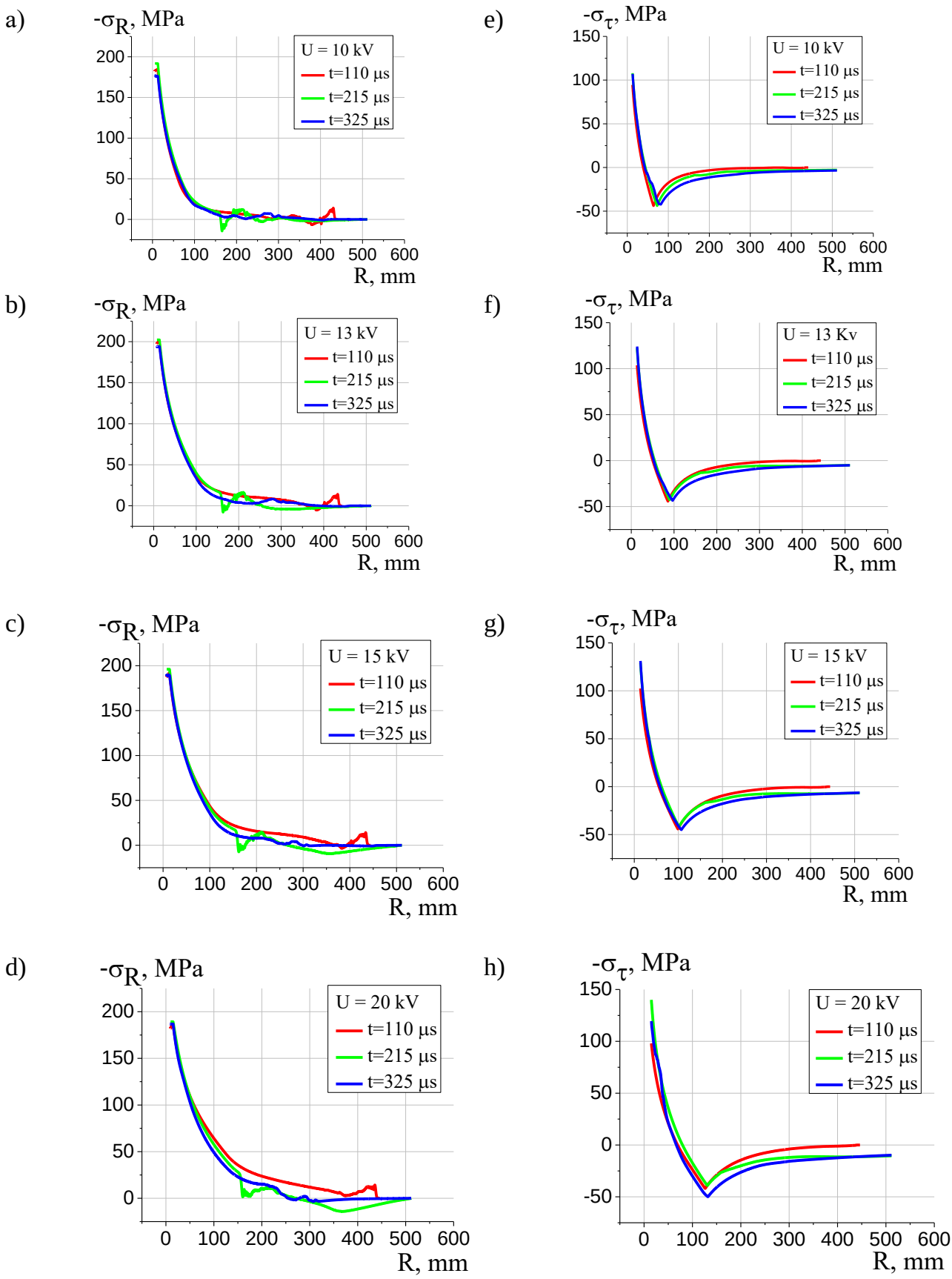



Figure 22A – Dependence compression stress $\sigma_R$ (a-d) and tensile stress $\sigma_\tau$ (e-h) on initial stress

From figures 21A and 22A it is evident that change of generator capacity and voltage practically have no impact on compression stress change. In case of tensile stress the influence is more considerable, but nevertheless, not so strong as it would be desirable.

a) b)

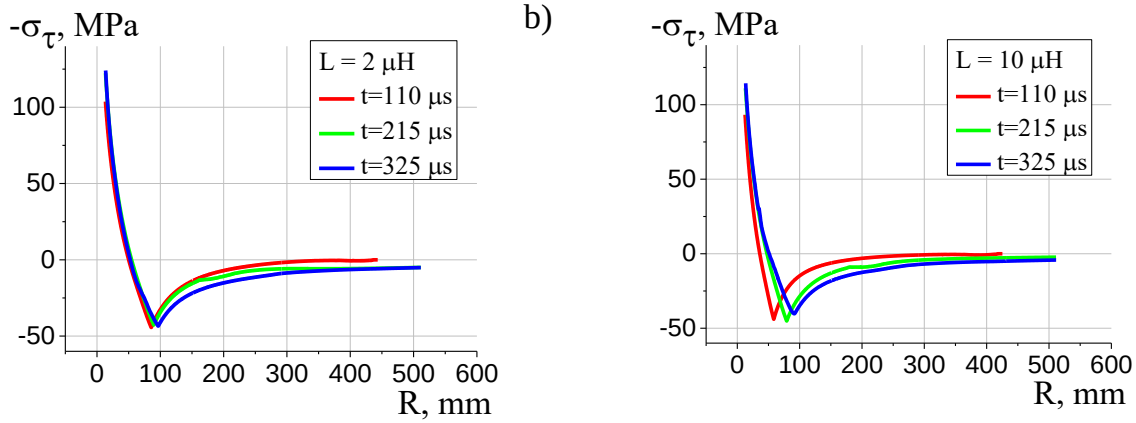



Figure 23A – Dependence of tensile stress $\sigma_\tau$ on inductance

As it is seen from dependences of mechanical stress on capacity and generator voltage, the radial stress undergoes not strong changes, therefore the influence of inductance has been considered only for tangential stresses. From figure 23A, for inductance values 2 and 10 μH, it is seen that it influences destruction area depth, and has weak impact on growth of cracks to the periphery. In figure 24A the similar picture, for dependence of the tangential phenomena on conductor length is observed.

a) b)

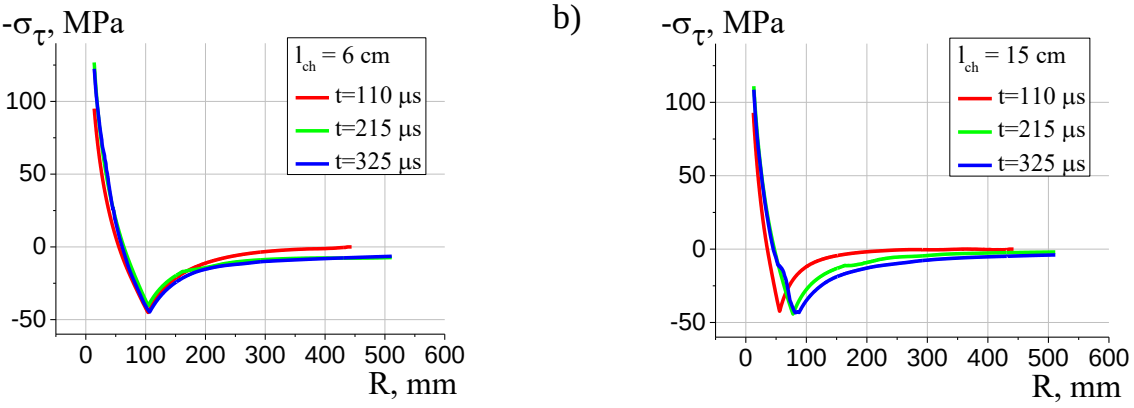



Figure 24A – Dependence of tensile stress $\sigma_\tau$ on conductor length

Changing circuit parameters, we try to increase tensile stress area, as the resistance of materials to the latter ones has smaller indicators, than resistance to destruction due to compression stress. The maximum compression strength for concrete is equal to 22 MPa, and tensile strength, respectively ~ 2,2 MPa, so if to draw in graphs a straight line through these values, we will see that destruction areas are observed both in the field of compression (more), and in the field of the tensile stress.

The area of the tensile stress increases in places of interaction of a straight wave and the wave reflected from a free surface of material. So it is possible to assume that owing to decrease in the front, the wave extending to the periphery of a solid body, the impact of reflected wave to destruction process will decrease with increase in distance up to a free surface of a solid body. In our case, the distance to a free surface in material is equal to 50 cm, therefore we will carry out the analysis of the influence of the studied material sizes on the wave dynamics of a splitting off. For this purpose we will in addition consider distribution of tangential stress for two values of distance to a free surface of a solid body – 30 cm and 90 cm (figure 25A).

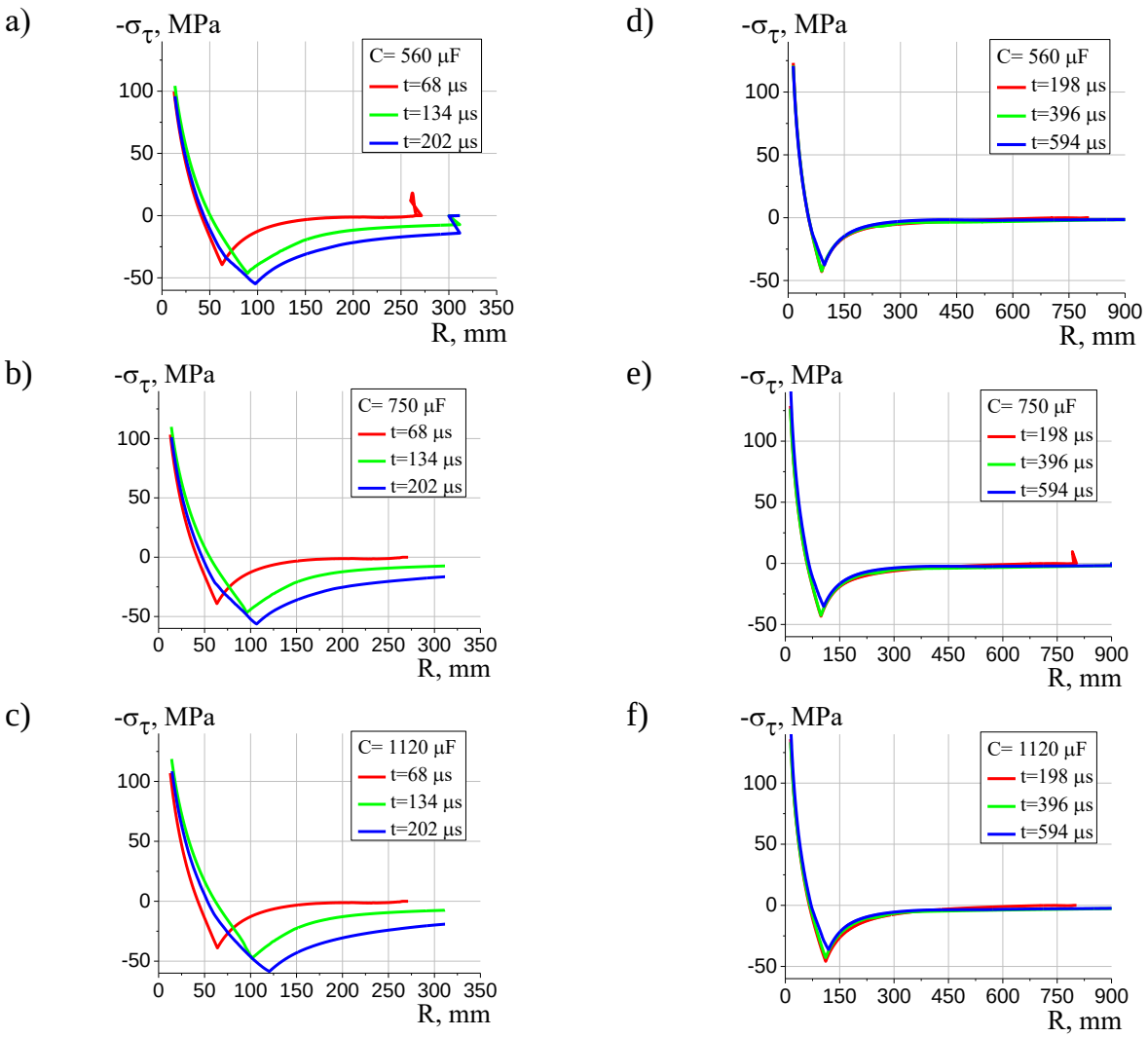



Figure 25A – Dependence of tangential $\sigma_\tau$ stress on distance to a free surface equal to 30 cm (a - c) and 90 cm (d-f)

Analyzing the graphs, given in figures 22A and 25A, received by mathematical modeling, it is possible to tell with confidence that the distance from a shot location to a free surface of a solid body strongly influences a wave picture of destruction. That is, at smaller distances to the material periphery the influence of the reflected wave on splitting-off destruction process is shown more distinctly that can demonstrate probability of splitting-off existence. Thus, it is possible to draw a conclusion that for increase of electric discharge splitting-off efficiency it is necessary not only to select an optimum operating mode of the generator, but also to consider the sizes of the destroyed materials.