

На правах рукописи

БОЧАРОВ Юрий Николаевич

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ
ПРИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

Санкт-Петербург

2004

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Официальные оппоненты: академик РАН, д.т.н., профессор Ф.Г. Рутберг
д.ф.-м.н., профессор Г.А. Дюжев
д.т.н., профессор В.Ф. Дмитриков

Ведущая организация: НИИ электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова

*Защита состоится 25 июня 2004 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет",
по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, ауд. 284*

*С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".
Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенном печатью, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет",
Электромеханический факультет, диссертационный совет Д 212.229.16.*

Автореферат разослан " ____ " _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Н.М. Журавлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Совершенствование процессов преобразования энергии обусловлено интенсивным развитием промышленного производства в условиях нарастания экологических проблем и необходимости применения энергосберегающих технологий.

Прогресс в освоении техники мощных импульсных разрядов позволил найти приложение для нее не только в технике физического эксперимента, но и в технологических операциях. Среди технологических процессов, использующих короткие мощные импульсы давления, можно выделить магнитно-импульсную обработку материалов (МИОМ), электроимпульсную дезинтеграцию материалов, электрогидравлическую обработку, электровзрывное диспергирование металлов. Для решения этих задач в качестве источника энергии используются генераторы импульсных токов и генераторы импульсных напряжений. Хорошо освоены технологические операции требующие выделения энергии накопителя за время в несколько микросекунд и более. Однако представляет интерес сокращение времени процесса, повышение мощности и скорости ввода мощности, что приводит к росту объемной плотности энергии. В этом случае можно ожидать изменения баланса энергии в канале и увеличения КПД.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИОКР по темам федеральной целевой программы "Интеграция" (пр. Ко 854 и Ао 142 раздел 9) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Цель работы. Целью данной работы является анализ физических процессов, сопровождающих быстрый разряд конденсаторной батареи (ГИТ), при котором первая амплитуда тока достигается за время менее 10^{-6} с, а также обоснование применения ГИТ такого диапазона в технологических процессах, использующих импульсы давления большой амплитуды.

В соответствии с поставленной целью задачи работы сформулированы следующим образом:

1. Провести и проанализировать эксперименты по изучению процессов, сопровождающих разряд в жидкости при времени нарастания тока до амплитудного значения менее 10^{-6} с.
2. Провести опыты и проанализировать экспериментальные данные по формированию импульсов давления и механических напряжений в металле

при воздействии сверхсильного импульсного магнитного поля с амплитудой индукции 100 Т и более, нарастающего за время порядка 10^{-6} с.

3. Изучить возможные особенности взрыва проводника при времени ввода энергии менее 10^{-6} с.
4. Определить возможности техники генерирования импульсов тока на основе емкостного накопителя энергии с позиции трансформации времени и амплитуды воздействия.
5. Оценить возможность использования в технологии импульсных разрядов с длительностью порядка 10^{-6} с.

Научная новизна сформулирована в следующих положениях:

- экспериментально показано, что при вводе энергии от конденсаторной батареи в канал подводного разряда за время менее одной микросекунды сохраняются основные энергетические соотношения, полученные для более медленных режимов, при этом давление на границе канал-жидкость повышается;
- экспериментально продемонстрирована возможность избирательной сепарации порошка, находящегося в воде, под действием давления, возникающего при электрическом разряде;
- теоретически и экспериментально показано, что для анализа процесса деформирования лайнера сверхсильным импульсным магнитным полем при скорости нарастания тока $0,5 \cdot 10^{13}$ А/с нет необходимости учитывать искажения картины магнитного поля в зазоре индуктор-лайнера, если выполняются соотношения, обеспечивающие условия динамического нагружения;
- экспериментально продемонстрирована возможность получения характеристик соударения метаемых тел, аналогичных реализуемым при метании взрывом, а также возможность реализации этого процесса в технологии сварки;
- экспериментально и теоретически продемонстрировано соединение непроводящих и плохо проводящих материалов и высокотемпературной сверхпроводящей керамики электрическим взрывом проводника;
- проанализированы возможности конденсаторных батарей с запасаемой

энергией менее 50 кДж с точки зрения повышения их быстродействия и предложены способы обострения импульса тока.

Практическая значимость работы заключается в:

- подтверждении основных энергетических соотношений для подводных разрядов при временах ввода энергии в канал менее одной микросекунды;
- демонстрации достижения давления и скорости метания в системе индуктор-лайнера, когда амплитуда индукции магнитного поля превышает 100 Т, соответствующих наблюдаемым при химическом взрыве;
- способе электрогидравлического диспергирования порошка, использующем для этой цели волну разгрузки;
- способе холодной сварки в сверхсильном импульсном магнитном поле;
- способе электровзрывного образования контактных соединений плохопроводящих материалов и высокотемпературной сверхпроводящей керамики;
- устройствах для обострения тока в малоиндуктивных емкостных накопителях энергии.

На защиту выносятся:

- результаты анализа процессов в канале пробоя воды при вводе энергии за время менее 10^{-6} с;
- результаты эксперимента и расчетов процесса соединения металлических лент под действием лайнера, ускоренного сверхсильным магнитным полем за время менее 10^{-6} с;
- исследования и разработки по созданию оборудования для коммутации и обострения импульса тока малоиндуктивных конденсаторных батарей;
- способы сепарации при подводном разряде, сварки в сверхсильном импульсном магнитном поле и при электрическом взрыве проводника, продемонстрированные впервые при временах ввода энергии от одной и менее микросекунды.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки эксперимента, использованием физического моделирования исследуемых процессов и совпадением данных эксперимента с результатами расчета, а также сравнением с результатами исследований других авторов, изложенных в печати.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на: международных конференциях "Мегагаусс 3" (Новосибирск, 1983 г.), "Мегагаусс 4" (Нью-Йорк, США, 1986 г.), "Мегагаусс 5" (Новосибирск, 1989 г.), "Мегагаусс 6" (Нью-Йорк, США, 1993 г.), "Мегагаусс 8" (Теллахасси, США, 1993г.), международной конференции по мощной импульсной технике (Балтимор, США, 1997 г.), 12-й международной конференции по мощным электромагнитам (Тель-Авив, Израиль, 1998 г.), международной научно-технической конференции "Электрофизические и электрохимические технологии" (Санкт-Петербург, 1997 г.), Российской научно-технической конференции "Инновационные наукоемкие технологии для России" (Санкт-Петербург, 1995 г.), научно-технической конференции "Фундаментальные исследования в технических университетах" (Санкт-Петербург, 1998 г.), международной научно-практической конференции "Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России" (Санкт-Петербург, 2002 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 печатных работ, включая 4 авторских свидетельства и 1 патент. Основное содержание диссертации изложено в 39 работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 148 наименований, и 2-х приложений. В работе 197 – страниц, в том числе 100 рисунков и таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ

В первой главе рассматриваются особенности работы емкостных накопителей энергии, которые используются для технологических операций. В качестве технологических устройств нашли применение обе схемы емкостных накопителей: генератор импульсных токов (ГИТ) и генератор импульсных напряжений (ГИН). Эти установки работают, как правило, в микросекундном диапазоне, и анализ процессов в контуре описывается соотношениями, характерными для цепей с сосредоточенными параметрами.

В существующих электрофизических методах обработки материалов можно условно выделить операции с использованием импульса давления, генерируемого в процессе разряда конденсаторной батареи. Это магнитно-

импульсная штамповка, когда ГИТ разряжается на индуктор, создающий импульсное магнитное поле в зоне расположения проводящей детали, в результате чего происходит деформирование заготовки. Это применение электрогидравлического эффекта, особенностей развития канала разряда в воде при протекании сильного импульсного тока от ГИТ для штамповки, обрубки и очистки литья, диспергирования материалов и сырья, сейсмической разведки при инженерно-геологических изысканиях на акваториях и др. Отдельно можно отметить использование электрического взрыва проводника (ЭВП) в той его части, которая касается взрыва в воде или плотной среде, где важно формирование импульсов давления для задач диспергирования, а также холодная ломка проката и возможность получения скалывающих напряжений на границе упругих сред. В перечисленных выше технологических приложениях в качестве источника энергии используется генератор импульсных токов с запасаемой энергией, как правило, не более 50 кДж. Длительность разряда составляет от нескольких микросекунд и выше (за исключением непосредственно самого взрыва проводника). Таким образом, в указанных приложениях применяется высоковольтная импульсная техника (ВИТ) одного класса, в которой компоновка, элементы (конденсаторы, коммутаторы, обострители) сходны по характеристикам.

Сокращение времени ввода энергии может привести к укорочению фронта импульса давления возникающего при электрическом разряде, что позволяет надеяться на изменение хода процесса диспергирования материалов из-за использования не только волн сжатия, но и растяжения. В свою очередь это влияет на размеры частиц, подвергшихся нагружению.

В разрушающихся системах при генерации импульсов магнитного поля высокой амплитуды индукции, скорость нарастания тока является определяющей. В этом случае возможна реализация условий, сопровождающих взрыв химических В.В. При амплитуде индукции магнитного поля 100 Т плотность энергии соответствует твердому В.В. и составляет 4 кДж/см^3 , а время процесса менее 10^{-6} с.

Электрический взрыв проводника при уменьшении времени ввода энергии может обеспечить снижение требований по ограничению явления обратного перекрытия промежутка, и сам процесс в металле будет развиваться без развития неустойчивостей. В этих условиях генератор импульсных токов является

одним из наиболее популярных импульсных источников электромагнитной энергии.

Основываясь на систематизации экспериментальных данных, а также их анализе, в первой главе сформулированы задачи, решению которых посвящена работа.

Глава 2. ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ РАСШИРЕНИЕ КАНАЛА В ВОДЕ

В качестве объекта исследования по технологическому применению подводного электрического разряда малой длительности использовалась взвесь порошка феррита в воде с максимальным размером фракции менее 400 мкм. Экспериментальная установка, состояла из малоиндуктивного высоковольтного импульсного конденсатора с плоской ошиновкой вывода собственной емкостью $C_0 = 0,1$ мкФ, зарядным напряжением до 50 кВ и собственной индуктивностью

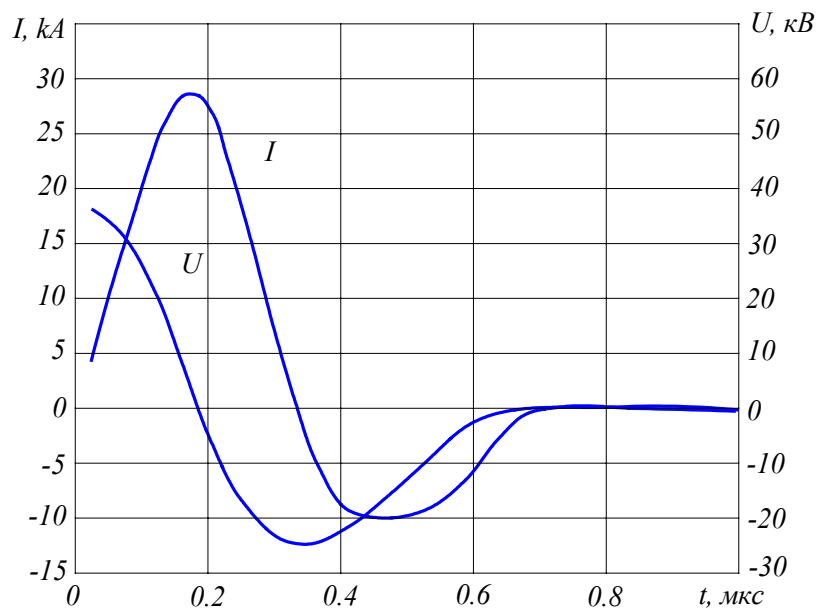


Рис. 1. Экспериментальные зависимости от времени тока (i) и напряжения (U)

конденсатора $L_0 = 25$ нГн. Коммутация тока осуществлялась многоканальным газовым разрядником под давлением с дополнительной "подсветкой" промежутка ультрафиолетовым излучением. Ток нарастал до максимума за 0,2 мкс и при зарядном напряжении 37,5 кВ был равен 30 кА. Типичная осциллограмма тока и напряжения приведена на рис. 1.

Эксперимент проводился следующим образом. Порошок засыпался в камеру с водой, производился один разряд, затем содержимое изымалось, и экс-

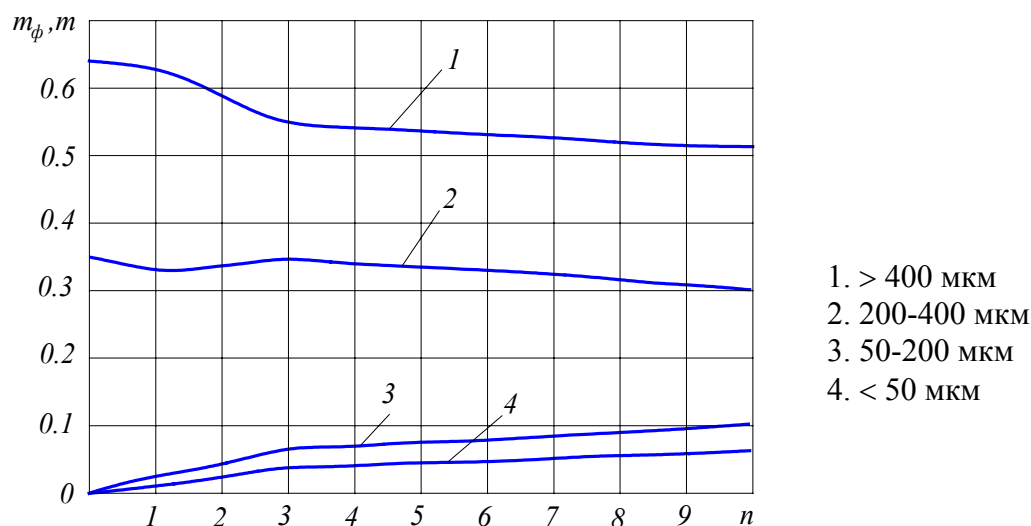


Рис. 2. Относительное распределение по фракциям в зависимости от числа разрядов n – число разрядов, m_{ϕ} – вес одной фракции, m – вес всех фракций

перимент повторялся. После трех опытов порошок высушивался, ссыпался вместе и подвергался просеиванию. Следующая порция порошка подвергалась воздействию три раза и десять раз. Полученный порошок так же подвергался просеиванию, как и контрольная порция, на которую не оказывалось воздействие. Для чего использовались сита 0,4 мм, 0,2 мм, 0,05 мм.

Из данных, представленных на рис.2 видно, что в результате относительное содержание фракции с размерами зерен > 400 мкм снижается, появляется отсутствующая в контрольной партии фракция с размерами зерен < 50 мкм, увеличивается фракция с размерами 50-200 мкм и практически не изменяется фракция с размерами 200-400 мкм. Справедливо предположить, что разрушаются только зерна, имеющие размер > 400 мкм.

Сравнение удельных энергозатрат иллюстрирует факт небольшого увеличения веса фракции с размерами < 200 мкм при значительном увеличении числа разрядов.

Выполнены оценки значения давления на границе канал-жидкость, электроакустического КПД, по известным аналитическим формулам, полученным в работах Наугольных Н.А., Роя И.А., Малюшевского П.П. и др.

Значения давления на границе канал-жидкость достаточно хорошо совпадают для четырех анализируемых вариантов. Величина давления по разным оценкам колеблется в диапазоне $(2 \div 9) \cdot 10^9$ Па.

Полученные экспериментальные зависимости тока и напряжения (рис. 1) использованы для расчета параметров плазменного канала разряда, согласован-

ного с радиальным гидродинамическим течением в камере, на основе уравнения энергии и модели испарения стенки Кнудсена-Ленгмюра. В непрерывном режиме производился расчет степени ионизации проводимости плазмы и потерь на излучение H_2O -плазмы. Радиальное течение за пределами канала рассчитывалось по модели одномерного течения сжимаемой жидкости с использованием уравнения состояния воды при высоких давлениях.

Уравнение энергии:

$$\frac{dE}{dt} = -P \frac{dV}{dt} + Q_J - Q_R - \Delta W,$$

где E – полная внутренняя энергия плазмы в канале, P – давление плазмы, V – объем плазменного канала, Q_J – мощность, выделяемая в канале в виде джоулева тепла, Q_R – мощность потерь энергии из канала на излучение, ΔW – мощность, затрачиваемая на испарение стенки канала при протекании по нему электрического тока высокой плотности.

Уравнение для массы газа в канале M , полученное на основе модели Кнудсена-Ленгмюра, имеет вид:

$$\frac{dM}{dt} = -2\pi a l \frac{P - C_T \exp(-H / RT)}{\sqrt{2\pi k T / m}},$$

где H – энергия сублимации моля жидкости, R – универсальная газовая постоянная, m – масса молекулы жидкости, C_T – постоянная Трутона. Концентрация частиц плазмы n выражается через массу и объем как $n = NM/mV$, где N – число атомов, на которые распадаются молекулы жидкости при диссоциации (для воды $N=3$). Температура плазмы выражается через давление и концентрацию как $T = P/kn$, где k – постоянная Больцмана.

Проводимость плазмы определяется с помощью формулы, комбинирующей проводимость спитцеровской и слабо ионизованной плазмы

$$\sigma = \frac{x e_0^2}{\sqrt{3k T m_e} [(1-x)\sigma_{ea} + \sigma_{ei}]},$$

где x – степень ионизации, m_e , e_0 – масса и заряд электрона, σ_{ea} , σ_{ei} сечения рассеяния электрона на нейтральных атомах и ионах. Для сечения рассеяния используется простая аппроксимация: $\sigma_{ea} = \pi r_a^2$, где r_a – радиус атома.

Степень ионизации x и электропроводность рассчитываются с учетом сложного атомного состава плазмы, в частности для воды $2/3$ частиц плазмы

атомы и ионы водорода, $1/3$ – кислорода. В частности для расчета степени ионизации решается система уравнений Саха

$$\frac{x_m \sum_{l=1}^N \alpha_l x_l}{1 - x_m} = A_m, \quad m=1 \dots N$$

$$\text{где } A_m = \frac{2g_{im}}{g_{am}} \left(\frac{8\pi m_e k T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{e_0 U_{im}}{k T} \right), \quad U_{im}, g_{am}, \alpha_m$$

– соответственно потенциал ионизации, статистический вес и относительная доля компоненты m в газовой смеси, g_{im} – статистический вес иона компоненты m , h – постоянная Планка.

Для определения текущего значения радиуса разрядного канала к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в канале и внешней электрической цепи, добавляется система уравнений гидродинамики. При этом для упрощения модели используется симметрия в геометрии разрядного промежутка и разрядной камеры.

Расчетные зависимости скорости расширения разрядного канала, давления в канале, радиуса канала, проводимости плазмы, ее температуры представлены в функции времени на рис. 3 – 6.

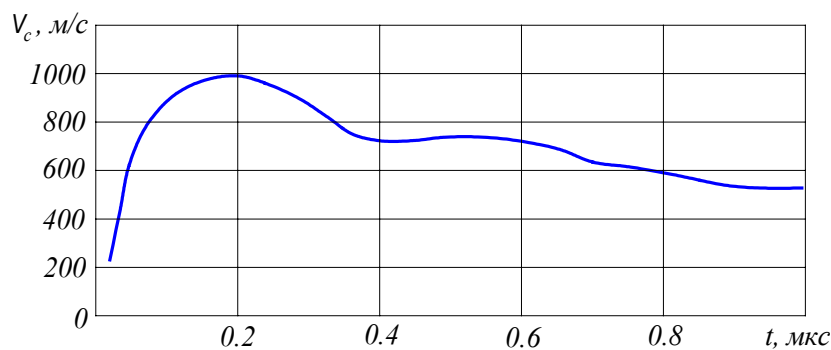


Рис. 3. Расчетная зависимость от времени скорости расширения разрядного канала

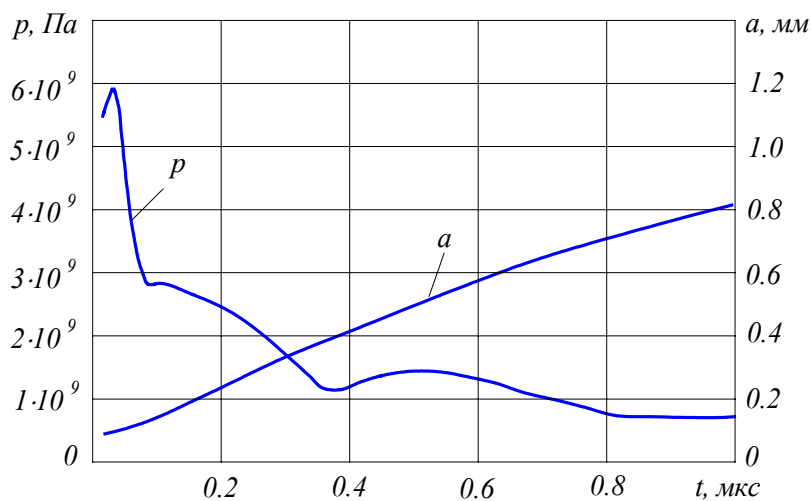


Рис. 4. Расчетные зависимости от времени давления (P) в канале и радиуса канала (a)

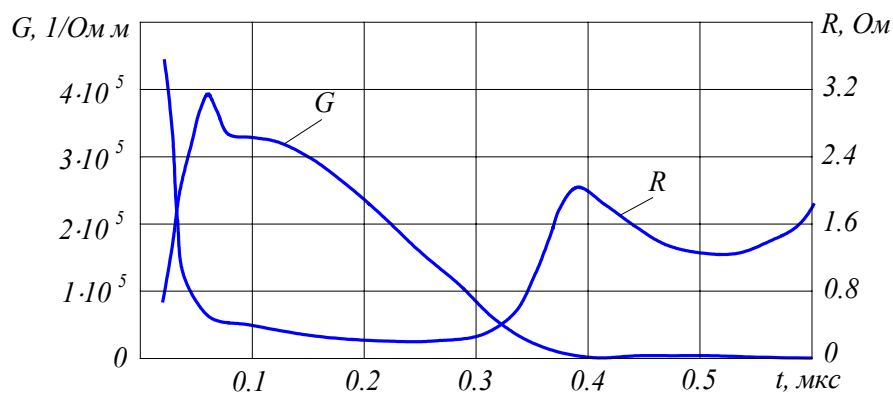


Рис. 5. Расчетные зависимости от времени электрической проводимости плазмы разряда (G) и полного электрического сопротивления канала (R)

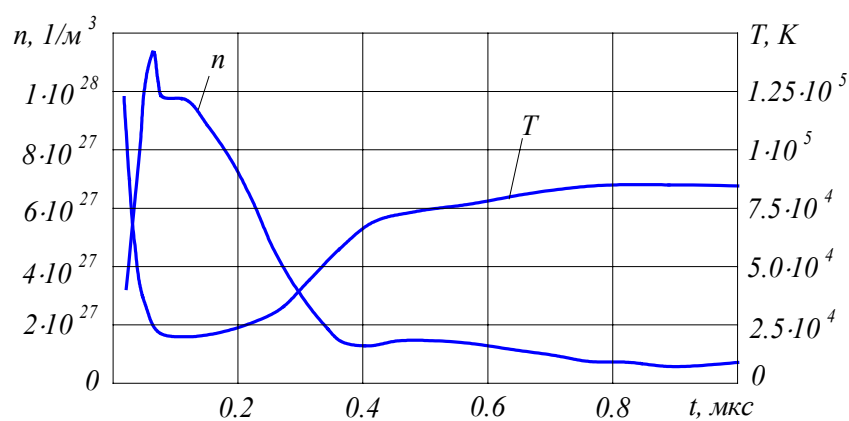


Рис. 6. Расчетные зависимости от времени концентрации (n) и температуры (T) плазмы разрядного канала

Можно определено констатировать качественное совпадение результатов обсуждаемого эксперимента с исследованиями более "медленных" разрядов, а именно:

- амплитуда давления в канале достигает максимума ранее момента максимума тока;
- длительности фронта и импульса давления короче фронта и длительности импульса тока;
- скорость расширения канала не превышает значений, наблюдаемых экспериментально в более "медленных" разрядах, а ее максимум совпадает с максимумом разрядного тока;
- амплитуда импульса давления падает по мере удаления от канала.

К особенностям более быстрого ввода энергии можно отнести:

- значение температуры в канале в начальной стадии превосходит 10^5 К;
- скорость изменения давления по радиусу остается равной скорости звука;
- электроакустический КПД достигает практически предельного значения.

По-видимому, это связано с тем, что смещение стенки канала к моменту максимума давления практически отсутствует.

Расчетные данные, полученные по описанным моделям, данные эксперимента и численного расчета по величине импульса давления на границе канал-жидкость на момент старта процесса отличаются мало.

Для анализа результатов по дроблению порошка выполнен расчет давления в камере для различных моментов времени при действии прямоугольного импульса давления на стенке канала амплитудой $P = 2 \cdot 10^9$ Па, длительностью $t = 0,2$ мкс. Результат расчета представлен на кинограмме (рис. 7).

Показано, что уменьшение времени ввода энергии в канал разряда приводит к увеличению электроакустического КПД, амплитуды импульса давления. Продемонстрирована возможность избирательного дробления фракций порошка при обеспечении соответствующей длительности фронта импульса давления и его длительности.

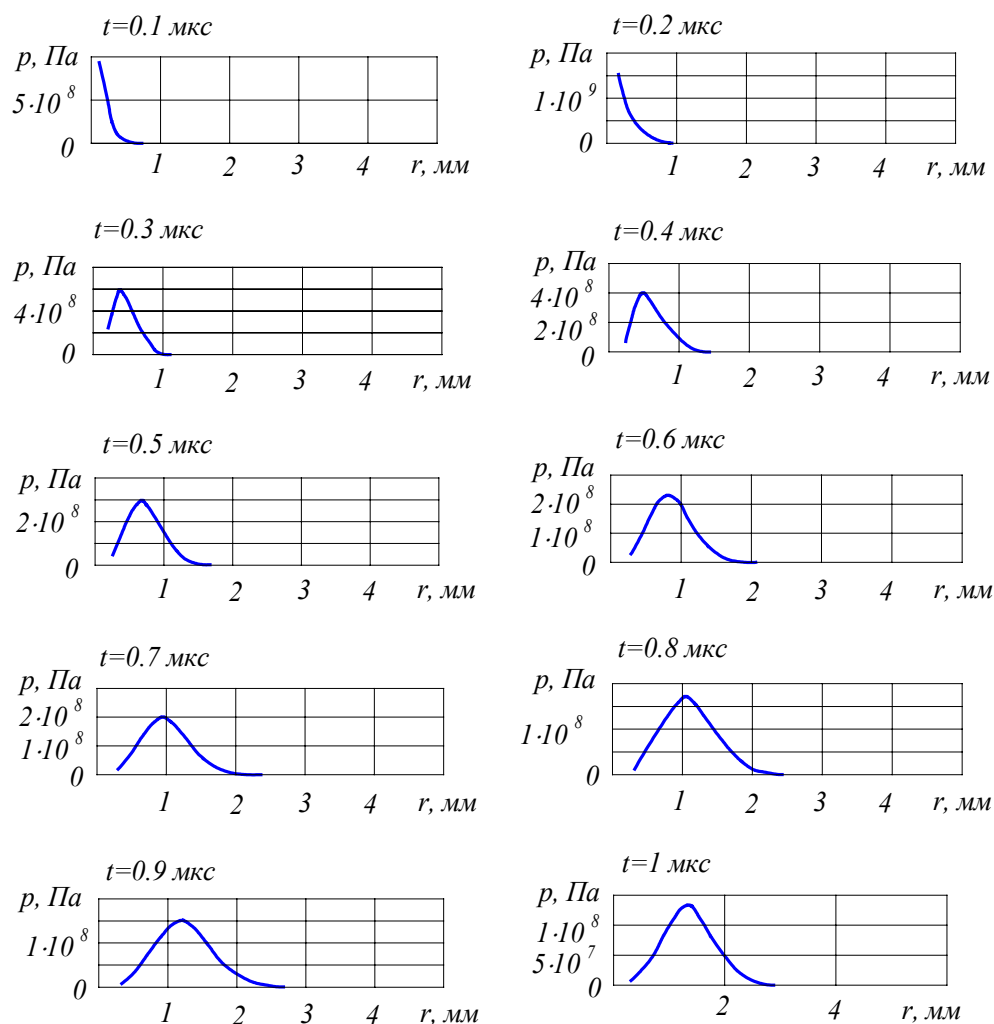


Рис. 7. Распределение давления в различные моменты времени при действии прямоугольного импульса давления в канале разряда ($p = 2 \cdot 10^9$ Па, $t = 0,2$ мкс)

Глава 3. ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРЯМОМ РАЗРЯДЕ КОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕИ НА СОЛЕНОИД

Анализ экспериментальных данных разных авторов для тонкостенных соленоидов показывает, что картина разрушения при микросекундных временах нарастания тока приблизительно одинакова. Слабое увеличение радиуса канала имеет место к моменту максимума тока ($\approx 10\%$) и, как следствие, наблюдается малое уменьшение геометрического фактора катушки. Характер деформации соленоида исследовался с помощью теневой фотографии в рентгеновских лучах. Типовые фотографии приведены на рис. 8. Снимки производились в осевом направлении.

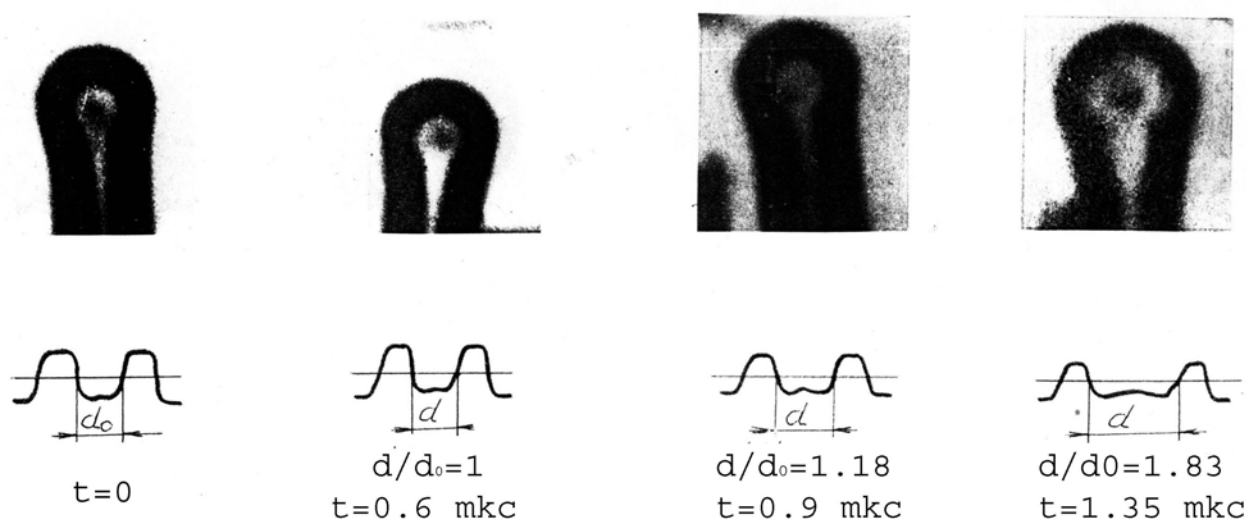


Рис. 8. Рентгеновские фотографии взрыва соленоида, полученные в разные моменты времени

Эксперименты по сжатию лайнера магнитным полем выполнялись на установке, обеспечивающей импульс тока 10^6 А при времени нарастания тока 1,1 мкс. К описанному накопителю энергии присоединялись соленоиды, радиус которых оставался постоянным и равным 2,8 мм, а длина в различных экспериментах изменялась от 2 до 5 мм. В соленоид помещался медный лайнер с толщиной стенки 1 мм, внутри которого располагались две наложенные друг на друга ленты сечением 2×3 мм (рис. 9). В месте наложения ленты были спилены наполовину так, что их суммарная толщина составляла 2 мм.

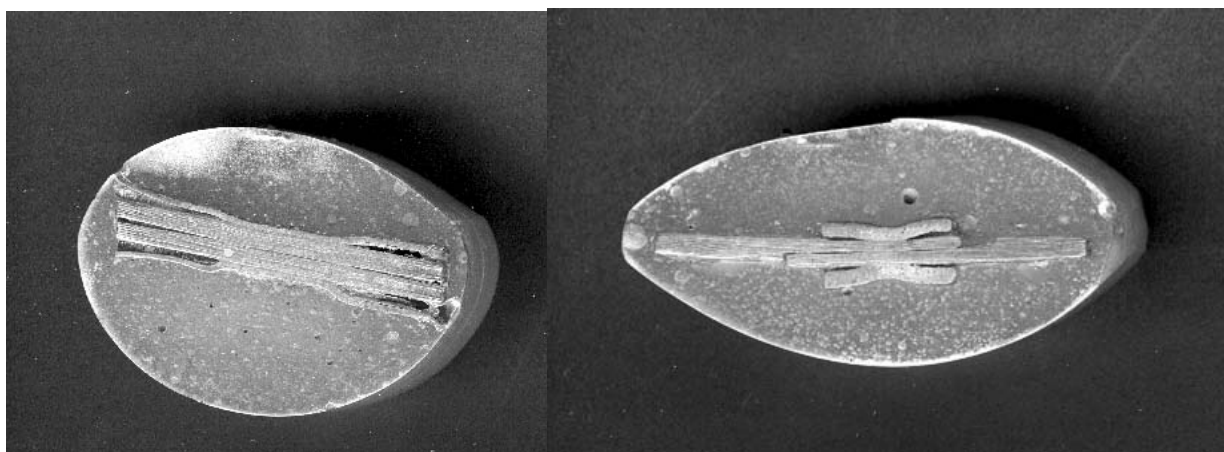


Рис. 9. Фотографии образцов

По данным измерений индукция в зазоре составляла в зависимости от длины соленоида и зарядного напряжения батареи величину, изменяющуюся в пределах $100 \div 200$ Т. При разряде накопителя под действием магнитного поля стенки соленоида и лайнера ускорялись в противоположных направлениях, и

радиус соленоида увеличивался, а радиус лайнера уменьшался. На рис. 9 представлены фотографии типичных экспериментальных образцов, распиленных вдоль оси и зафиксированных на парафине для наблюдений зон деформации (с предварительной шлифовкой и травлением) под микроскопом. На рис. 10 изображена характерная фотография места контакта лент, наглядно иллюстрирующая факт образования волны сварки в зонах деформации при различных режимах нагружения.

Для анализа процесса деформации необходимо изучение пространственно-временной картины магнитного поля в системе соленоид-лайнер, и последующего смещения и деформации объекта лайнер-ленты.

Обосновывается возможность идеализации задачи пренебрежением к движению элементов системы соленоид-лайнер и замены реального распределения тока распределением с постоянной по осевой координате линейной плотностью, закон изменения во времени которой повторяет заданный характер изменения тока в соленоиде.



Рис. 10. Волна сварки увеличение $\times 500$

Вихревые токи, индуцируемые в лайнере при диффузии поля, принимаются равномерно распределенными по его толщине d , что позволяет упростить решение, исключив из рассмотрения область, занятую вихревыми токами. Для описанных условий эксперимента, в которых время нарастания тока до максимума составляло $1,1 \text{ мкс}$, а $d^2 \mu \gamma \approx 10^{-8} \text{ с}$, это условие, очевидно, выполняется.

Принятая расчетная модель включает в себя цилиндрический соленоид, расположенный коаксиально снаружи проводящего лайнера (рис. 11).

Поле принимается осесимметричным и описывается с помощью векторного потенциала, имеющего единственную составляющую $A_\varphi = A$, удовлетворяющую в области, свободной от токов, уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = 0.$$

Тогда в векторный потенциал поля вихревых токов лайнера

$$A_1 = \mu \int_0^\infty F(\lambda) \begin{cases} I_1(\lambda r) K_1(\lambda R_1) \\ I_1(\lambda R_1) K_1(\lambda r) \end{cases} \cos(\lambda z) d\lambda \quad \begin{array}{l} \text{при } r < R_1 \\ \text{при } r > R_1 \end{array}$$

в векторный потенциал поля соленоида

$$A_2 = \frac{2\mu\eta R_2}{\pi} \int_0^\infty \begin{cases} I_1(\lambda r) K_1(\lambda R_2) \\ I_1(\lambda R_2) K_1(\lambda r) \end{cases} \frac{\sin \lambda l \cos \lambda z}{\lambda} d\lambda \quad \begin{array}{l} \text{при } r < R_2 \\ \text{при } r > R_2 \end{array}$$

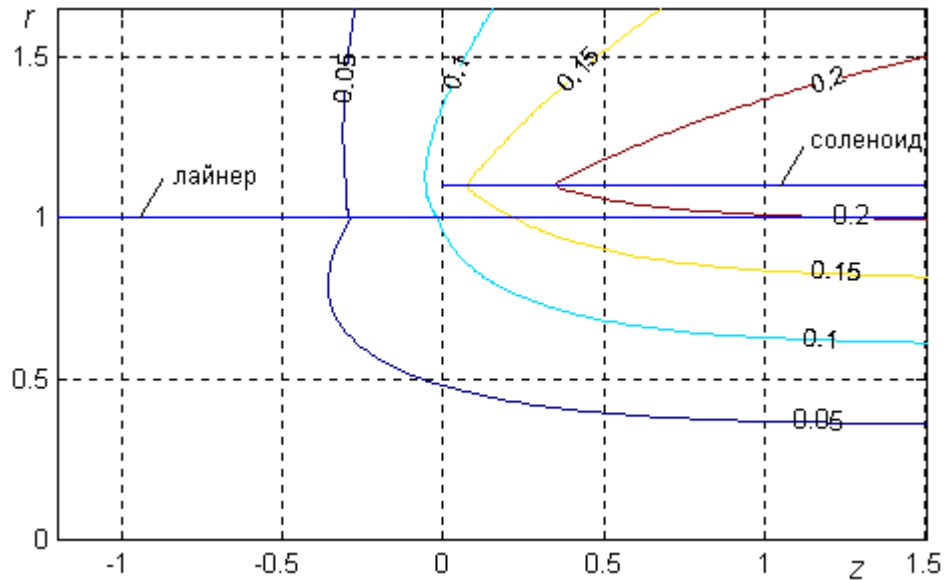


Рис. 11. Проникновение импульсного поля в краевой зоне

Условие на поверхности лайнера при равномерном распределении вихревого тока по толщине и произвольном законе изменения во времени тока соленоида $\eta(t)$

$$\eta_B = -d \cdot \gamma \frac{dA}{dt} = H_{z1-} - H_{z1+} = -\frac{1}{R_1} \int_0^\infty F(\lambda) \cos(\lambda z) d\lambda \tau \frac{dF}{dt} + F = -G \frac{d\eta}{dt}$$

$$F = F(0) e^{-\frac{t}{\tau}} - G \int_0^t \frac{d\eta}{dx} e^{-\frac{t-x}{\tau}} dx \quad \varphi(t) = \eta(0) e^{-\frac{t}{\tau}} + \int_0^t \frac{d\eta}{dx} e^{-\frac{t-x}{\tau}} dx$$

Решение для векторного потенциала

$$A = \frac{2\mu R_2}{\pi} \int_0^\infty 2 \left\{ \begin{array}{l} K_1(\lambda R_2) I_1(\lambda r) (\eta(t) - \varphi(t)) \\ K_1(\lambda R_2) I_1(\lambda r) \eta(t) - \frac{I_1(\lambda R_1)}{K_1(\lambda R_1)} K_1(\lambda r) \varphi(t) \\ K_1(\lambda r) \left[I_1(\lambda R_2) \eta(t) - \frac{I_1(\lambda R_1) K_1(\lambda R_2)}{K_1(\lambda R_1)} \varphi(t) \right] \end{array} \right\} \frac{\sin \lambda l \cos \lambda z}{\lambda} d\lambda \begin{array}{l} \text{при } r < R_1 \\ \text{при } R_1 < r < R_2 \\ \text{при } r > R_2 \end{array}$$

Усилие, действующее на лайнер

$$\bar{f}' = B_n (\bar{H}_+ - \bar{H}_-) - \frac{\mu}{2} (H_+^2 - H_-^2) \eta_B = \frac{2R_2}{\pi R_1} \int_0^\infty \frac{K_1(\lambda R_2)}{K_1(\lambda R_1)} \varphi(t) \frac{\sin \lambda l \cos \lambda z}{\lambda} d\lambda.$$

При идеальной проводимости полубесконечного лайнера

$$B_z = \frac{\mu \eta}{\pi} \int_0^\infty \frac{K_1(\lambda R_2)}{K_1(\lambda R_1)} \frac{\sin(\lambda z')}{\lambda} d\lambda + \frac{\mu \eta}{2}.$$

Результаты расчетов показывают, что при значениях безразмерного параметра $\omega \tau_0 > 2$, выражающего добротность лайнера по отношению к экранированию продольного однородного поля с частотой ω , проникшее поле практически не оказывает влияния на характер распределения радиальной силы. Это имеет место в условиях эксперимента, для которых $\omega \tau_0 \approx 160$, следовательно, влияние проникновения поля на характер нагружения лайнера несущественно и можно использовать приближение идеально проводящего лайнера, когда $\varphi_\lambda(t) = \eta(t)$, и осевая составляющая индукции представляется более простым интегралом

$$B_z = \frac{\mu \eta}{\pi} \int_0^\infty \frac{K_1(\lambda R_2)}{K_1(\lambda R_1)} \frac{\sin(\lambda z')}{\lambda} d\lambda + \frac{\mu \eta}{2}.$$

Таким образом, анализ процесса деформации соленоид-лайнер возможно начать в приближении равномерного распределения давления по поверхности лайнера с амплитудой соответственно 40 000 атм и 160 000 атм и длительностью 0,5 мкс.

Расчет динамических напряжений, контактных давлений, пластических деформаций, скоростей смещения границ в функции времени выполнялся с использованием программы LS-DYNA.

Давление прикладывается под соленоидом (рис. 12) осесимметрично относительно оси цилиндра (рис. 13).

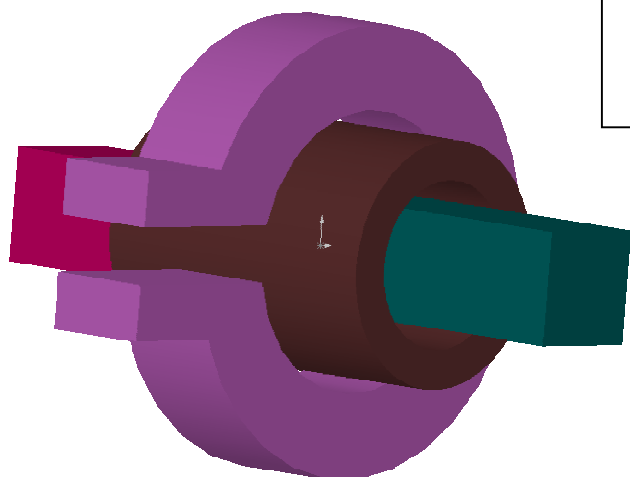


Рис. 12.

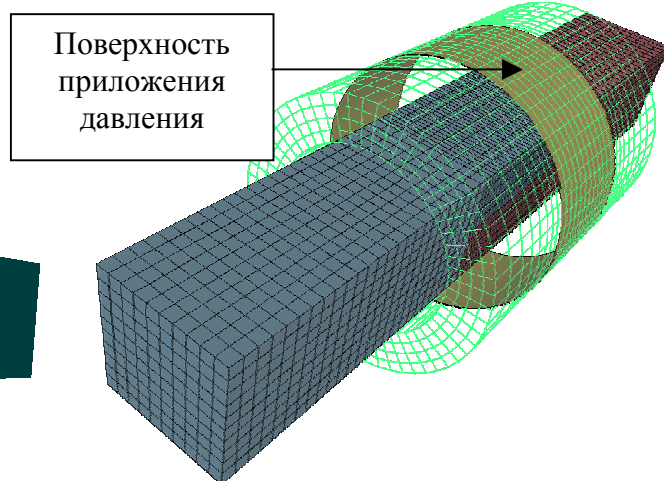


Рис. 13.

На рис. 14 изображен график зависимости давления от времени. Данная кусочно-линейная функция представляет собой аппроксимацию расчетной функции давления вида $P = P_0 e^{-\pi} \sin^2(\omega t)$, при условии $\frac{P_{01}}{P_{02}} \ll 1$. Амплитуда давления соответствует индукции магнитного поля 100 Т.

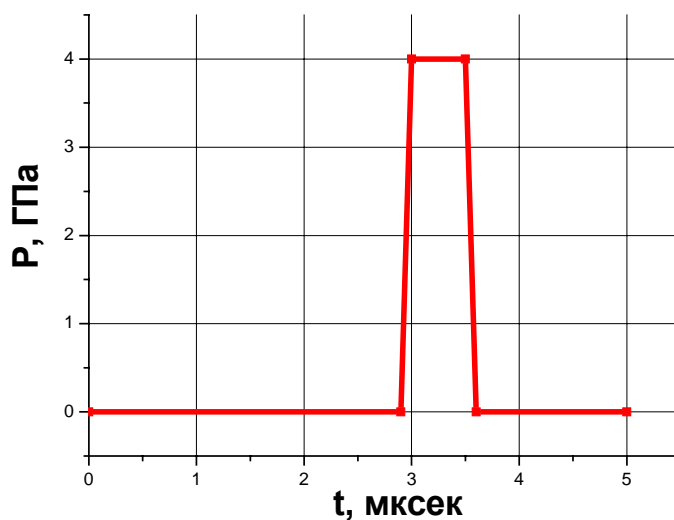


Рис. 14.

На рис. 15 представлены точки на контактной поверхности, в которых строятся графики зависимости контактного давления от времени (рис. 16). Из полученных результатов видно, что на контактной поверхности давление действует в течение небольшого промежутка времени, а именно, порядка $t = 0,8$ мкс.

Из построенных графиков видно, что после прохождения волны сжатия по контактной поверхности значения давлений быстро уменьшаются в несколько раз.

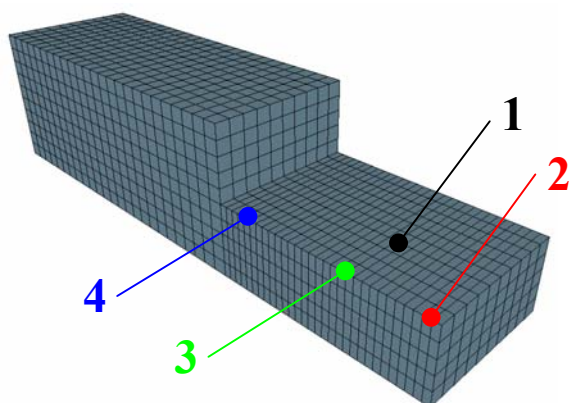


Рис.15.

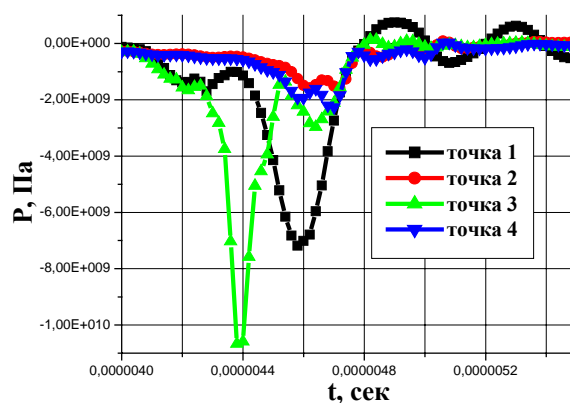


Рис. 16.

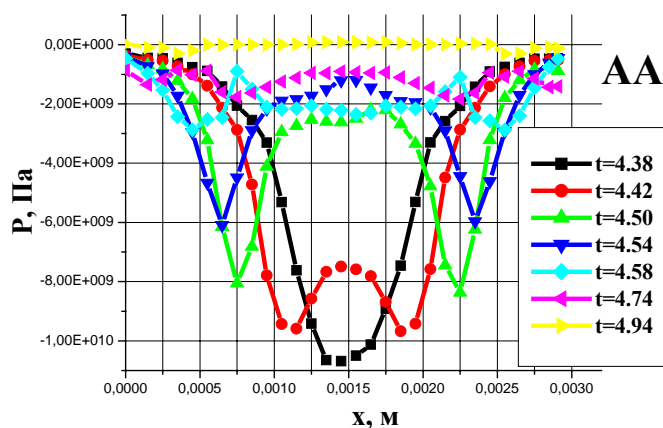


Рис. 17.

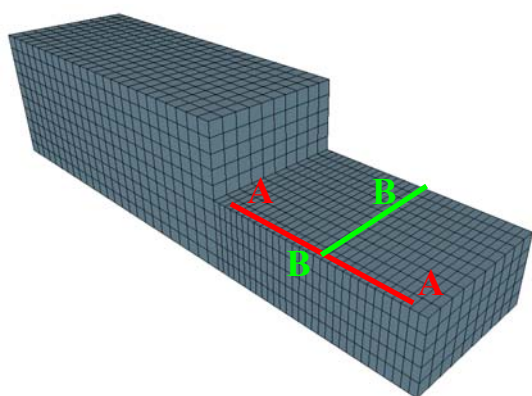


Рис. 18.

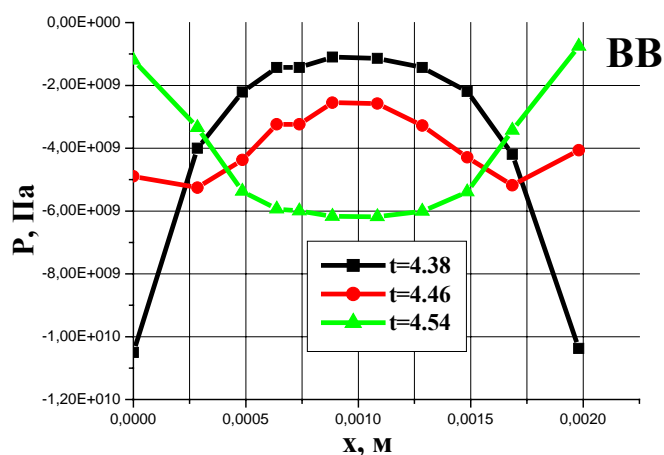


Рис.19.

В процессе деформирования внешнего кольца скорости точек на его внешнем радиусе составляют $v=350$ м/с, на внутреннем радиусе – $v=500$ м/с.

На рис. 20 изображены точки на контактной поверхности, в которых строятся графики зависимости скорости от времени (рис. 21).

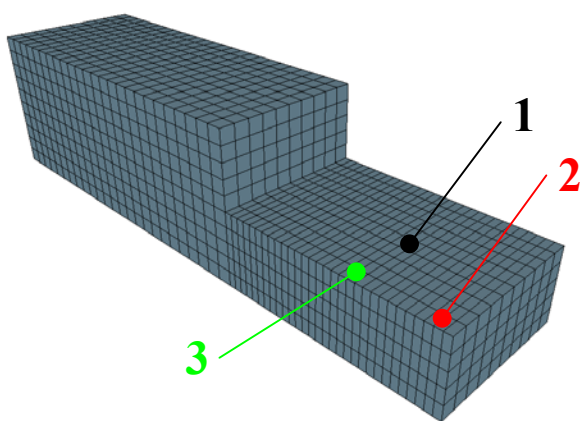


Рис. 20.

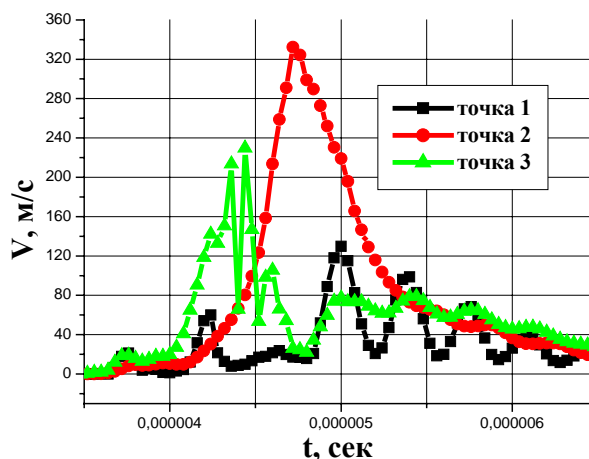


Рис. 21.

Таким образом, анализируя поля давлений в различные моменты времени и в разных геометрических точках соприкасающихся поверхностей, можно сделать выводы о том, что амплитуда давлений значительно превосходит прочностные пределы меди даже при индукции в 100 Т. Скорости смещения лент достигают 450 м/с. То есть создаются условия для реализации процесса сварки, аналогичные условиям сварки взрывом практически в любом сечении деформируемой области. Процесс нагружения динамический, деформации и смещения происходят после того как заканчивался импульс давления, генерируемый в зазоре индуктор-лайнер протекающим импульсным током.

Глава 4. ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

Выполнена оценка параметров рабочей среды при импульсной сварке твердых тел с помощью электрического взрыва фольги. Расчет температуры и давления, достигаемых в нагреваемой фольге, основан на определении объемной плотности тепловой (внутренней) q энергии к моменту обрыва тока. При

этом $q=Q/V$, где $Q = \int_0^{T/4} R(q)i^2 dt$ полное энерговыделение на участке металличе-

ской фольги в области соединения, $R(q) = R_0 (1 + \beta q)$ – электрическое сопротивление фольги в области соединения, β – тепловой коэффициент удельного электрического сопротивления, $R_0 = \rho_0 l_{\Phi} / S_{\Phi}$ – начальное значение сопротивления

фольги, ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала фольги, l_Φ , S_Φ – длина и площадь сечения фольги, $V = l_\Phi/S_\Phi$ – объем фольги.

Давление в металлической фольге можно найти с помощью уравнения состояния металла Ми-Грюнайзена, справедливого при высоких давлениях и температурах

$$P = R_x(\gamma) + P_T(\gamma, T).$$

Первое слагаемое в приведенном выражении – «холодное» давление, равное нулю при нормальной плотности металла, что имеет место в условиях сваривания плоских тел. Вторая «тепловая компонента» связана с объемной плотностью внутренней энергии соотношением

$$P_T = \Gamma_g \cdot T \cdot \gamma \cdot C_v,$$

где Γ_g – параметр Грюнайзена, равный для алюминия 2,09. Расчеты для приведенных параметров токового импульса дали следующие значения давления в области соединения:

$3,38 \cdot 10^5$ Па для фольги длиной 1 см и сечением 16 мм^2 и

$1,96 \cdot 10^5$ Па для фольги той же длины и сечение 21 мм^2 .

В экспериментах использовались оптическое стекло с целью индикации пороговых значений давления на свариваемую поверхность, возникающих при электрическом взрыве фольги, высокотемпературная сверхпроводящая керамика $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ и диски оксидно-цинковых нелинейных сопротивлений – варисторов (ОЦВ).

Данные экспериментов показали возможность соединения пар непроводящих или плохопроводящих материалов с обеспечением малого контактного сопротивления и большой площади контактов.

Глава 5. ТЕХНИКА ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ БЫСТРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

В этой главе рассматриваются методы обострения импульса тока, основанные на применении электрического взрыва проводника, многократного ферромагнитного размыкателя, а также коммутационная техника.

При обострении тока в малоиндуктивном ГИТ необходимо уменьшать индуктивность фольги и токоподводящего тракта с целью снижения потерь

магнитного потока и повышения амплитуды передаваемого в нагрузку импульса тока. Скорость нарастания тока в нагрузке определяется напряжением, генерируемым взрывающейся фольгой и индуктивностью нагрузки. В связи с этим при разработке ГИТ необходима минимизация индуктивности фольги и токоподводов к нагрузке.

Исходя из этих требований, разработан узел нагрузки, конструкция которого показана на рис. 22. Узел нагрузки позволяет использовать фольгу различных размеров, индуктивность токоподводов к нагрузке и разрядника-обострителя мала и составляет $(1-3) \cdot 10^{-9}$ Гн

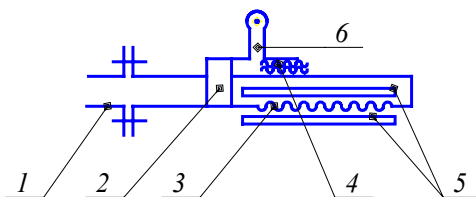


Рис. 22. Узел нагрузки: 1 – выход ГИТ; 2 – объемный токоподвод к нагрузке; 3 – ЭВФ; 4 – разрядник-обостритель; 5 – дугогасящая среда; 6 – нагрузка; изоляция узла нагрузки и ГИТ не показана

Использование разработанного узла нагрузки на установке ГИТ-50, имеющей собственную индуктивность 10 нГн, позволило в нагрузке с индуктивностью 3 нГн сформировать импульс тока с амплитудой 800 кА и длительностью переднего фронта 350 нс. На рис. 23 приведена осциллограмма импульса тока в нагрузке и общего тока батареи.

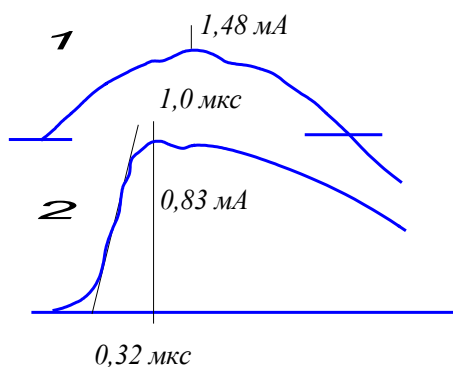


Рис. 23. Осциллограммы тока разряда батареи *I* и тока в нагрузке *II*

Показано, что повышение плотности тока в ЭВФ увеличивает время взрыва и снижает возможность обострения тока. В то же время, использование такого типа обострителя в малоиндуктивных накопителях неизбежно ведет к увеличению плотности тока в ЭВФ, так как интеграл действия остается посто-

янным. По-видимому, приведенные результаты близки к предельным в таких системах. Для продвижения возможно использование экзотических режимов взрыва, например, в присутствии наложенного дополнительного магнитного поля.

Ферромагнитный размыкатель является альтернативой известным методам коммутации в мощных импульсных источниках энергии. Предлагаемая система является системой многократного использования, поскольку в ней нет элементов конструкции, которые разрушались бы или совершали механические перемещения во время коммутации.

Для быстрого переброса тока в нагрузку индуктивного или емкостного накопителя используются схемы, в которых происходит резкий рост переходного импеданса элемента цепи. Этот процесс может быть осуществлен различными способами, включая скачок индуктивности в схеме (рис. 24) от начального значения L_1' до конечного L_1'' . При этом ток i_2 в индуктивной нагрузке возрастает до значения:

$$i_2'' = i_0' \frac{K - 1}{\frac{L_2}{L_1} + K \left(1 + \frac{L_2}{L_0} \right)},$$

где i_0' – начальное значение тока i_0 , $K = L_1''/L_1'$ – кратность изменения индуктивности.

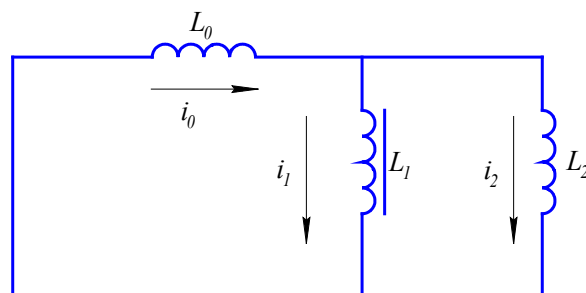


Рис. 24. Цепь для переброса тока в индуктивную нагрузку в результате изменения индуктивности L_1

В случае $L_2 \ll L_0$ эффективность системы коммутации характеризуется множителем $(K - 1)/(K + L_2/L_1')$, который близок к единице, если $K \gg 1$, и достигает 0,8, если, например, $K = 5$, $L_2 \ll L_1'$.

В данной работе предлагается использовать для этой цели систему с ортогональными полями, примеры которых представлены на рис. 25.

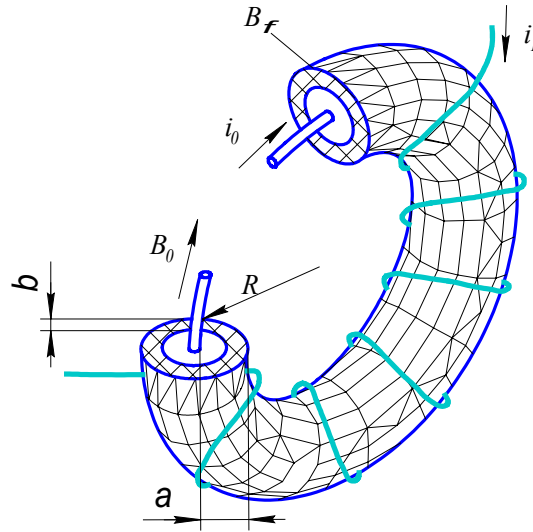


Рис. 25а. Пример идеальной тороидальной магнитной системы с ортогональными полями

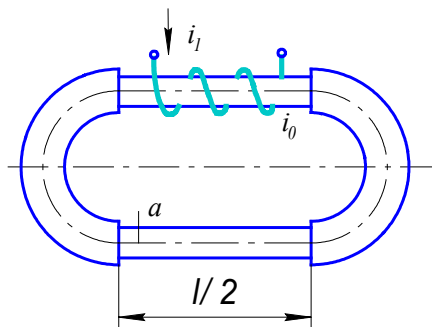


Рис. 25б. Пример магнитной системы для оценочных расчетов

В качестве примера соавтором работ Ефимовым И.П. был выполнен расчет ферромагнитного размыкателя (ФР) для генератора импульсных токов с параметрами:

Энергия накопителя при зарядке до 50 кВ	$W_{\max} = 0,8$ МДж
Рабочее напряжение ГИТ	$U_{\text{раб}} = 35$ кВ
Емкость конденсаторной батареи	$C_0 = 64$ мФ
Собственная индуктивность батареи	$I_0 = 31$ нГн
Амплитуда импульса тока	$I_{\max} = 5$ МА
Время нарастания тока (четверть периода)	$\tau_{\phi} = 7$ мкс
Величина нагрузки (малоиндуктивный соленоид)	$I_m = 3$ нГн

В результате показано, что использование ФР обеспечивает ток в нагрузке с амплитудой 3,2 МА и длительность около 0,3 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Емкостной накопитель энергии по-прежнему достаточно эффективное средство преобразования энергии. Изменение диапазона его работы, переход к более коротким временам преобразования энергии приводит к перераспределению между составляющими баланса энергии, а при взаимодействии с механическими системами – к динамическому характеру воздействия. Минимально достижимая амплитуда импульса давления на границе канал разряда – вода зависит от двух соревновательных процессов: ввода энергии и расширения канала. При малых временах поступления энергии и ограниченной скорости расширения канала его радиус меняется мало и значения давления достигает предельных величин. Этим объясняется и рост КПД, так как на этой стадии разряда практически отсутствует перемещение жидкости вследствие малого изменения радиуса канала.

Генерация сверхсильных импульсных магнитных полей при разряде конденсаторной батареи сопровождается разрушением магнитной системы. Достижимая амплитуда индукции магнитного поля определяется скоростью нарастания тока. Процесс деформирования в системе индуктор – лайнер – заготовка в этих условиях является динамическим. Электрический взрыв фольги в режиме быстрого ввода энергии может обеспечить условия для технологических применений в случае, если давление, сопровождающее взрыв, не будет превышать определенных значений.

Анализ протекающих процессов затруднен из-за большого количества функционально связанных факторов влияния. В работе проведено исследование особенностей разряда в жидкости, взаимодействия сверхсильного импульсного магнитного поля с металлом и электрического взрыва проводника в одинаковых временных диапазонах.

В качестве источника энергии использовался генератор импульсных токов с относительно невысокой запасаемой энергией. Уровень запасаемой энергии определяется оптимизацией параметров накопителя (емкость, индуктивность, скорость нарастания тока, КПД). В данном случае интегрирующим эле-

ментом разных условий нагрузки является источник энергии, и именно с позиции его возможностей проводился анализ.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Показано что, уменьшение времени ввода энергии емкостного накопителя в канал разряда в воде до значения $0,2 \cdot 10^{-6}$ с (I максимум тока) приводит к увеличению электроакустического КПД до 50 %, а значения импульса давления у стенки канала превышает 10^9 Па.
2. Установлено, что известные теоретические и экспериментальные формулы, связывающие параметры разрядного контура и амплитуду давления на границе канал-жидкость для более медленных скоростей ввода энергии могут быть использованы с достаточной степенью точности и в исследуемом диапазоне, так же как и вариант численного моделирования эксперимента, приведенный в работе.
3. Подтверждено, что скорость расширения канала не превышает 1000 м/с, длительность фронта давления определяется скоростью ввода энергии и характеристиками воды. Достижение значений давления в импульсе сжатия, превышающих 10^9 Па, возможно при скоростях нарастания тока более чем $2 \cdot 10^{12}$ А/с.
4. Предложенный способ избирательного дробления порошка фракции определенного размера предполагает технологическое применение, когда возможно разрушение по характеристикам на разрыв по типу откола.
5. Экспериментально и численным моделированием обоснована необходимость учета лишь «стартовой» конфигурации магнитного поля в зазоре лайнер-индуктор в случае разгона лайнера при динамическом режиме нагружения.
6. Продемонстрирована возможность реализации условий, аналогичных условиям сварки взрывом, при использовании сверхсильных импульсных полей в системе индуктор – лайнер – заготовка. Экспериментально продемонстрирована возможность получения волн сварки, численно – скорости смещения и амплитуда давлений, обеспечивающих условия сварки.
7. Опытным путем и моделированием показано, что электрический взрыв фольги в режиме быстрого ввода энергии (длительность четверти периода

тока менее 10^{-6} с) осуществляется без генерации импульсов давления большой амплитуды ($\sim 3 \cdot 10^5$ Па).

8. Предложены опробованные варианты технологических применений электрического взрыва фольги для нанесения поверхностного покрытия и контактного низкоомного соединения высокотемпературной сверхпроводящей керамики.
9. Предложен способ соединения нелинейных оксидно-цинковых резисторов, улучшающий их эксплуатационные характеристики.
10. Показано, что емкостной накопитель энергии остается достаточно эффективным средством преобразования энергии. Наибольшей сложностью при продвижении в область малых времен и высоких частот разряда, а также для повышения КПД является относительно низкая плотность энергии в конденсаторах.
11. Предложены и опробованы варианты коммутационной и обострительной аппаратуры, позволяющие существенно расширить диапазон работы накопительной техники на основе конденсаторных батарей по схеме генератора импульсных токов.

Результаты работы отражены в 16 публикациях и опубликованы в трудах 12 международных и 6 Российских научных конференциях. По материалам работ получено 4 авторских свидетельства и 1 патент.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бочаров Ю.Н., Кручинин А.И., Шнеерсон Г.А. Выбор параметров емкостного накопителя для получения сверхсильного магнитного поля в разрушающихся соленоидах малого объема / Вестник Харьковского политехнического института. Магнитно-импульсная обработка металлов. 1977. № 123 выпуск 4. – С. 49-87.
2. Бочаров Ю.Н., Григорьев А.В., Шнеерсон Г.А. Управляемый многоканальный твердотельный разрядник / Б.И. 1980. № 13. А.с. № 726613.
3. Бочаров Ю.Н., Баранов А.И. Коммутатор тока / Б.И. 1980. № 13. А.с. № 492017.
4. Megagauss magnetic field production in small volumes / Botcharov Y.N., Chetchel A.N., Krivosheev S.I. a tall – Megagauss Physics and technology. - New York and London: Plenum Press, 1980. – P. 485-498.

5. Малоиндуктивный накопитель для получения сверхсильных импульсных магнитных полей / Ю.Н. Бочаров, С.Л. Зайенц, П.Г. Попов и др./ Приборы и техника эксперимента. 1981. № 1. С. 167-169.
6. Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Шнеерсон Г.А. Задержка начала разрушения одновиткового соленоида в мегагауссном магнитном поле. – Письма в Журнал технической физики. 1982. Т. 8. № 4. С. 212-215.
7. Исследование разрушения одновитковых соленоидов в сверхсильном магнитном поле. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение / Ю.Н., Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин и др. – М.: Наука, 1984. – С. 77-87.
8. Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Чураев В.А. Твердотельный многоканальный разрядник / А.с. № 1212265. 1985.
9. Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Кручинин А.И. Малоиндуктивный коммутатор на скользящем разводе / Труды совместного заседания секции научных советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики" и "Проблемы мощной импульсной энергетики". Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы. – Томск: 1986. – С. 39.
10. Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И., Шнеерсон Г.А. Малоиндуктивный фольговый коммутатор в цепи разряда конденсаторной батареи с высокой скоростью нарастания тока / Сборник АН СССР "Научные основы электрофизики и электроэнергетики". – Томск: 1986. – С. 98-99.
11. Численные экспериментальные исследования разрушения соленоидов в быстронарастающем магнитном поле. Мегагауссная импульсная техника и приложения / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин и др. – Третья конференция. Нью-Йорк и Лондон. 1987. – Р. 33-44.
12. Емкостной накопитель с ошиновкой и коммутаторами на скользящем разряде / Ю.Н. Бочаров, О.Ю. Грущина, С.Л. Зайенц и др. // Межвузовский сборник "Высоковольтные электроэнергетическое и электрофизическое оборудование и линии электропередачи". Л.: ЛПИ, 1987 – С. 88-93.
13. Многовитковый соленоид для создания сильных импульсных магнитных полей / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин и др. А.с. № 1349578. 1987.

14. Предельные возможности емкостных накопителей энергии с точки зрения получения мегагауссных магнитных полей в разрушающихся соленоидах. / Ю.Н. Бочаров, О.Ю. Грущина, В.В. Титков и др. – Всесоюзная конференция "Импульсные источники энергии". Ленинград, 1989 г. – С. 96.
15. Бочаров Ю.Н., Кривошеев С.И. Фольговый обостритель тока в цепи разряда малоиндуктивной конденсаторной батареи / Современные вопросы создания электроэнергетических и электрофизических конструкций и аппаратов высокого напряжения // Межвузовский сборник научных трудов ЛПИ им. М.И. Калинина. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1989. – С. 107-110.
16. Изучение взрывного разрушения соленоида малого объема в сверхсильном магнитном поле / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, А.И. Кручинин и др. // Мегагауссные поля и мощные импульсные системы: Труды V Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Нью-Йорк, 1990. – С. 65-77.
17. Динамика разрушения соленоида в мегагауссном магнитном поле / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, В.В. Титков и др. // Труды международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Нью Мехико, США, 1992 – С. 167
18. Бельков Е.П., Бочаров Ю.Н. Высоковольтные импульсные коммутирующие приборы: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993. – 102 с.
19. Малоиндуктивный генератор импульсных токов с объемной ошиновкой / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, Н.Г. Лапин и др./ Приборы и техника эксперимента. 1993. № 2. С. 92-95.
20. Динамика разрушения соленоида в мегагауссном поле / Ю.Н. Бочаров, Д.В. Доев, Г.Н. Капорская и др. // Труды VI конференции "Мегагауссные магнитные поля и родственные эксперименты". Нью-Йорк, Нова-Шива, 1994. – С. 41-51.
21. Стенд для создания сильных импульсных магнитных полей / Ю.Э. Адамьян, А.Н. Березкин, Ю.Н. Бочаров и др. – Приборы и техника эксперимента. 1994. № 5. С. 134-139.
22. Дробление порошков при электрическом разряде в жидкости / Ю.Н. Бочаров, С.И. Кривошеев, Г.А. Шнеерсон Труды Российской научно-

- технической конференции "Перспективные технологические процессы обработки материалов". СПб, 24-26.10.1995 г. – С. 36.
23. Бочаров Ю.Н., Шнеерсон Г.А. Фундаментальные проблемы и технологические применения высоковольтной импульсной техники / Труды Российской научно-технической конференции "Инновационные наукоемкие технологии для России". СПб, 25-27.04.1995. – С. 86-87.
24. A Ferromagnetic Opening Switch / G. A. Shneerson, Y. N. Bocharov, I.P. Efimov et al. – International Pulsed Power Conference. Baltimore, Maryland. 1997. URL: <http://ppc97-www.nrl.navy.mil/ps01.html>, PI-95
25. Богатенков И.М., Бочаров Ю.Н., Кузнецов В.Е. Использование электрического взрыва фольги для соединения варисторов на основе оксида цинка / Труды Международной научно-технической конференции "Электрофизические и электрохимические технологии". Санкт-Петербург, 9-11.06. 1997 С. 86-87.
26. Рабочие испытания защитных аппаратов. Электротехника и электроэнергетика / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, В.Е. Кузнецов и др.– Труды СПбГТУ, 1998. – С. 69-75.
27. Использование ферромагнитного размыкателя тока в силовых цепях накопителей энергии / Г.А. Шнеерсон, Ю.Н. Бочаров, И.П. Ефимов и др. // Материалы научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в технических университетах». Санкт-Петербург, 25-26.06.1998. - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – С. 239-240.
28. The use of the ferromagnetic switch with orthogonal control field for diverting of current in an inductance-capacitance storage / Y.N. Bocharov, I.P. Efimov, S.I. Krivosheev et al. // 12th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS'98). Haifa, Israel. 1998. – P. 102
29. The use of the ferromagnetic switch with orthogonal control field for diverting of current in an Inductance-capacitance storage / Y.N. Bocharov, I.P. Efimov, S.I. Krivosheev et al. / 11th International Conference On High-Power Electromagnetics (EUROEM'98). Tel Aviv, Israel. 1998.
30. Current pulses sharpening by ferromagnetic opening switch / G.A. Shneerson, I.P. Efimov, Y. N. Botcharov et al. // VIIIth International Conference on Megagauss

- Magnetic Field Generation and Related Topics. Tallahassee, Florida, USA. 1998. – P. 128.
31. Генератор импульсных токов: Учебное пособие / Е.П. Бельков, Ю.Н. Бочаров, Г.А. Шнеерсон и др. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – 99 с.
 32. Электрический ток большой плотности и сильные магнитные поля – технологический инструмент для металлургии легких сплавов / К.Б. Абрамова, С.Д. Самуйлов, Ю.Н. Бочаров, Г.А. Шнеерсон – Технология легких сплавов. 1999. № 1. С. 195-198.
 33. Технология и оборудование для брикетирования металлической стружки / К.Б. Абрамова, С.Д. Самуйлов, В.В. Антипов, Н.И. Русаков Ю.Н. Бочаров. Доклады Четвертой Всероссийской научнопрактической конференции с международным участием "Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности" // Под ред. Н.И. Иванова, СПб, 1999, т.2 – С.57-64.
 34. Способ размыкания сверхсильного тока / Ю.Н. Бочаров, И.П. Ефимов, С.И. Кривошеев и др./ Патент на изобретение по заявке 99102494/09(002788) от 29.01.1999 г. Б.И.
 35. Ферромагнитный размыкатель тока / Ю.Н. Бочаров, И.П. Ефимов, С.И. Кривошеев и др. // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25. № 4. С. 35.
 36. Формирование брикетов из отдельных металлических частиц под воздействием коротких импульсов электрического тока большой плотности / К.Б. Абрамова, Ю.Н. Бочаров, С.Д. Самуйлов и др. / Журнал технической физики. 2001. Т. 71. № 4. С. 122-127.
 37. Бочаров Ю.Н. Применение энергии электрического тока в различных отраслях промышленного производства / Металлообработка. 2001. Т. 6. С. 6-8.
 38. Бочаров Ю.Н., Новгородцев А.Б. Экранирующие свойства плоского экрана / Труды международной научно-технической конференции "Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России". СПб, 27-28.06.2002. – С. 222-223.
 39. Техника высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / Н.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова и др. // Под. ред. Г.С. Кучинского – СПб.: Энергоатомиздат, СПб отделение, 2003. – 608 с.