

На правах рукописи



Ситникова Наталья Ивановна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛОВ ДИСКОВОГО
ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Саров – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно – исследовательский институт экспериментальной физики» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», г. Саров.

Научные руководитель: **Гриневич Борис Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ГК «Росатом», г. Саров

Официальные оппоненты: **Калинин Николай Валентинович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Кузнецов Андрей Петрович, доктор физико-математических наук, доцент, директор Института лазерных и плазменных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», г. Москва

Защита состоится **«27» декабря 2021 года в 11 часов 30 минут** на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.375.02 д.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы и степень ее разработанности

Немаловажную роль в исследованиях поведения веществ при высоких плотностях энергии выполняют лабораторные эксперименты и расчётные методы. Использование математического моделирования предоставляет исследователям широкие возможности по изучению сложных физических процессов и явлений, позволяя тем самым сократить объемы дорогостоящих натурных испытаний, а также провести детальные исследования работы отдельных элементов устройств. Точность численных методик зависит, как от программ счёта, так и от достоверности результатов исследований, служащих экспериментальной базой верификации широкодиапазонных определяющих соотношений, используемых для развития теоретических подходов к описанию поведения конденсированных сред.

Вплоть до настоящего времени основой для верификации уравнений состояния вещества при высоких давлениях служили результаты опытов с лайнерами – ударниками, ускоряемых с помощью продуктов взрыва ВВ. Одним из альтернативных способов ускорения лайнеров является применение электрофизических установок на базе взрывомагнитных генераторов (ВМГ). ВМГ способны генерировать высокие плотности энергии и являются перспективными устройствами для использования в качестве энергетической базы при моделировании физических процессов, протекающих при высокоскоростном соударении, для получения новой экспериментальной информации и совершенствования расчетно – теоретических моделей описания поведения конденсированных сред. В литературе существует множество работ, посвященных разработкам, созданию ВМГ [1 – 9]. К настоящему времени достигнут большой прогресс в создании сверхмощных взрывомагнитных генераторов.

Одной из главных задач при разработке взрывомагнитных генераторов является повышение энергоёмкости при одновременном упрощении конструкции. Данная работа посвящена вопросу модернизации отдельных узлов систем импульсной мощности на основе дискового взрывомагнитного генератора, а также исследованию с помощью математического моделирования ряда факторов, влияющих на его работу.

Цели работы

Диссертационная работа направлена на исследование особенностей работы и поиск способов модернизации отдельных элементов систем импульсной мощности, на основе дисковых взрывомагнитных генераторов, путем проведения численного моделирования и экспериментальной отработки.

Научная новизна

1. Предложен, расчетно обоснован и реализован вариант устройства отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального взрывомагнитного генератора, не содержащий электродетонаторов, с обеспечением синхронизации работы СВМГ и узла отключения посредством взаимного расположения взрывных конструктивных элементов.

2. Предложен вариант инициирования основных зарядов дисковых элементов ДВМГ от одного электродетонатора, отличающийся тем, что подрыв дисковых элементов ДВМГ производится не с помощью электродетонаторов равных по количеству дисковым элементам ДВМГ, а с использованием детонационной разводки, начальное инициирование которой осуществляется от одного электродетонатора в момент подрыва СВМГ.

3. Предложен и обоснован способ ускорения цилиндрических лайнеров для тестирования физических моделей состояния вещества, заключающийся в том, что увеличение концентрации энергии происходит путем установки под лайнер, разгоняемый магнитным полем ДВМГ, системы каскадов, состоящей из пар оболочек, изготовленных из легкого и тяжелого материалов. Разгон лайнера магнитным полем позволяет получить приблизительно двукратный выигрыш в скорости по сравнению с разгоном лайнера продуктами взрыва.

Практическая и теоретическая значимость

Практическая значимость работы определяется предложенными способами модернизации отдельных узлов дисковых взрывомагнитных генераторов с целью уменьшения количества электродетонаторов (ЭД) и подрывных установок в экспериментах, для увеличения эффективности работы ДВМГ – повышения надёжности и помехоустойчивости.

Применение современных средств численного моделирования для исследования механизмов работы узлов ДВМГ позволяет сократить объем дорогостоящих взрывных экспериментов.

Численное моделирование работы дисковых элементов ДВМГ при различных входных параметрах позволило определить степень влияния на характер работы ДВМГ ряда факторов: воздействие давления магнитного поля на дисковые элементы ДВМГ, изменение объема зарядов ВВ дисковых элементов, смещение инертной вставки от номинального положения, неодновременное срабатывание шашек ВВ узла инициирования.

Предложен (совместно с соавторами [С1]) и экспериментально отработан вариант устройства отключения ДВМГ от СВМГ, не содержащий электродетонаторов, свободный от воздействия электромагнитных полей.

Предложен вариант устройства инициирования многоэлементного ДВМГ, содержащий детонационную разводку и один электродетонатор для синхронного подрыва зарядов дисковых элементов, повышающий стойкость устройства к механическим воздействиям, нечувствительность к электрическим и электромагнитным воздействиям и не нуждающийся в дополнительной подрывной установке.

Представлены результаты оптимизации многокаскадных систем ускорения цилиндрических лайнеров, приводимых в действие импульсом тока дискового взрывомагнитного генератора.

Положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальными и расчетными методами показано, что в номинальном режиме работы ДВМГ-250 коэффициент превращения кинетической энергии тарелей в энергию магнитного поля доходит до $\sim 80\%$ при общем КПД преобразования энергии взрывчатого вещества в энергию магнитного поля $\sim 20\%$.

2. Показано, что использование газодинамических методов синхронного подрыва повышает надежность срабатывания узла отключения и системы инициирования ДВМГ за счет уменьшения количества точек инициирования (до 1) и снижения влияния электромагнитных полей на работу устройств.

3. Расчетно обосновано, что применение дисковых взрывомагнитных генераторов для ускорения цилиндрических лайнеров методом каскадирования позволяет сообщить им скорости, в ~ 2 раза превышающие скорости лайнеров при непосредственном их ускорении продуктами взрыва конденсированных взрывчатых веществ в габаритах пондеромоторного узла ДВМГ.

Личный вклад автора состоит в участии в исследованиях и создании экспериментальных устройств, представленных в данной работе:

– устройства отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального взрывомагнитного генератора, не содержащего электродетонаторов;

– инициатора с детонационной разводкой и одной точкой инициирования, предназначенного для передачи детонации одновременно всем зарядам ВВ дисковых элементов ДВМГ;

– устройства для ускорения цилиндрических лайнеров с применением каскадных систем до скоростей порядка десятков километров в секунду, с помощью импульса тока дискового взрывомагнитного генератора.

Автор непосредственно участвовал в проведении численного моделирования работы отдельных конструктивных узлов устройств, определении редакции экспериментов, анализе

результатов экспериментов, представленных в данной работе, а также в подготовке отчетной документации и публикаций в печати.

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность результатов численных расчетов, полученных с помощью корректного применения апробированных известных методик численного моделирования, обеспечивается согласованием рассчитанных характеристик исследуемых процессов с данными натурных экспериментальных исследований.

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, семинарах: XIV Научно технической конференции «Молодежь в науке» (Саров. 2015), XV Научно технической конференции «Молодежь в науке» (Саров. 2017), Международной конференции XX Харитоновские тематические научные чтения «Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии» (Саров. 2018), XVII Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам (г. Касива, Япония. 2018), на семинаре «Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами», ИПФ РАН г. Нижний Новгород. 2018 г., Международной конференции XXI Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров.2019).

Публикации автора по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы 2 статьи в периодических научно – технических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ [A1], RSCI [A2], 6 работ в сборниках материалов международных научных конференций [B1 – B6]. В соавторстве получен патент RU2700694C1 на изобретение «Способ и узел отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального взрывомагнитного генератора» [C1].

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 155 страницах, содержит 86 рисунков, 8 таблиц. Список литературы включает 186 библиографических наименований.

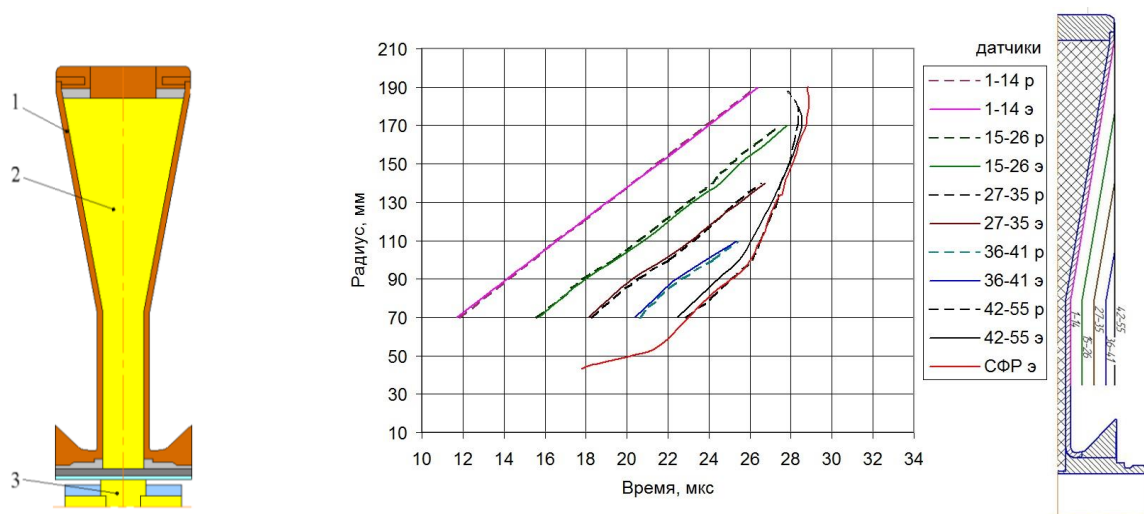
Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены цели исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

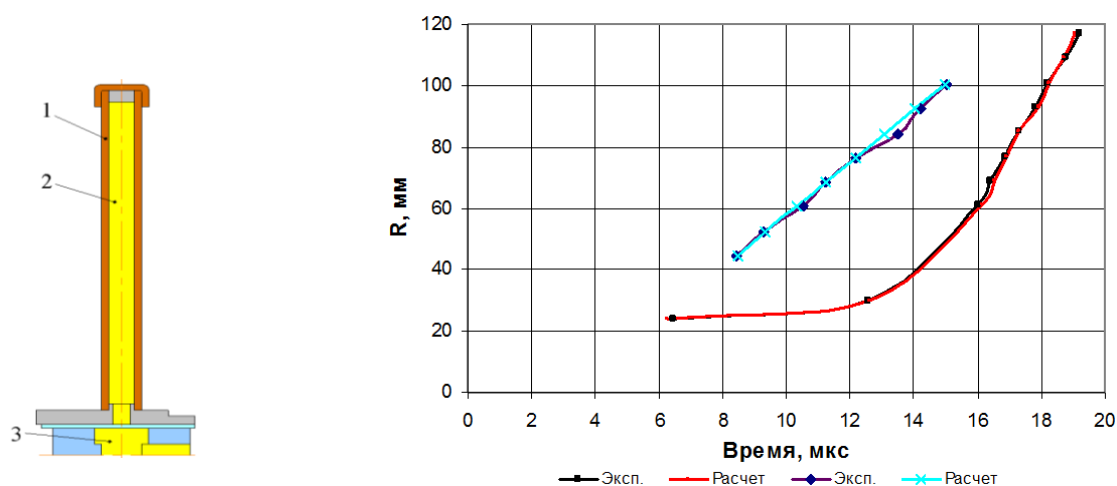
Первая глава посвящена описанию устройства дискового взрывомагнитного генератора, основных физических процессов, определяющих его работу. Приведен ряд важных научных и прикладных задач в области физики высоких плотностей энергии, решаемых с применением ДВМГ [7, 8, 10].

Представлено описание конечно – элементного программного комплекса ANSYS AUTODYN использованного в работе, предназначенного для моделирования высокоскоростных нелинейных динамических процессов в твердых телах, жидкостях и газах [11]. Проведена верификация используемых расчетных моделей, применительно к результатам экспериментов по исследованию движения тарелок дисковых элементов ДВМГ диаметром 250 мм (ДВМГ-250) с плоскими дисками и инертной вставкой в полости сжатия магнитного потока, а также дисковых элементов ДВМГ диаметром 400 мм (ДВМГ-400) с профилированными дисками. Эксперименты проводились с целью исследования процесса движения токнесущего элемента ДВМГ – тарелки дискового элемента под воздействием продуктов взрыва заряда ВВ диска [10, B1, B3]. Регистрация экспериментальных данных осуществлялась с помощью

электроконтактной методики и методики скоростной фоторегистрации (СФР). По аналогии с натурным экспериментом, с целью получения данных о процессе движения тарели дисков ДВМГ-250, 400 под действием продуктов взрыва, были построены расчетные модели и проведены двумерные газодинамические расчеты. По результатам экспериментов проведен сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных.



а)



б)

1 – тарель дискового элемента, 2 – заряд ВВ дискового элемента, 3 – узел инициирования ДВМГ

Рисунок 1 – Конструктивные схемы дисковых элементов, графики зависимости положения отдельных точек тарели от времени экспериментальных и расчетных данных для: а) ДВМГ-400; б) ДВМГ-250

Анализ полученных результатов для дискового элемента ДВМГ-400 (рис. 1 а) показал, что данные полученные с СФР (кривая СФРэ) близки к данным об изменении положения тарели во времени для группы датчиков 42-55 (кривая 42-55э). Расчетная зависимость (кривая 42-55р) радиального расположения отдельных точек тарели от времени практически совпадает с зависимостью, полученной экспериментально с СФР. Расхождение в графиках (кривые 42-55р, э, СФРэ) экспериментальных и расчетных данных не превышает 8% на интервале с 23 по 27 мкс и 10% на интервале с 28 по 29 мкс.

Анализ графиков движения тарели дискового элемента ДВМГ-250 (рис. 1 б) показал, что расхождение в значениях экспериментальных (э) данных и данных численного моделирования (р) наблюдаемые наблюдается в области радиуса 60,5 мм (датчик 13, погрешность монтажа – 0,30 мм) и радиуса 84,35 мм (датчик 16, погрешность монтажа – 0,40 мм).

По времени срабатывания датчиков, расположенных на одном радиусе и на разной высоте от поверхности тарели дискового элемента ДВМГ-400 расчетно (р) и экспериментально (э) определена зависимость скорости движения тарели дискового элемента от времени (рис.2).

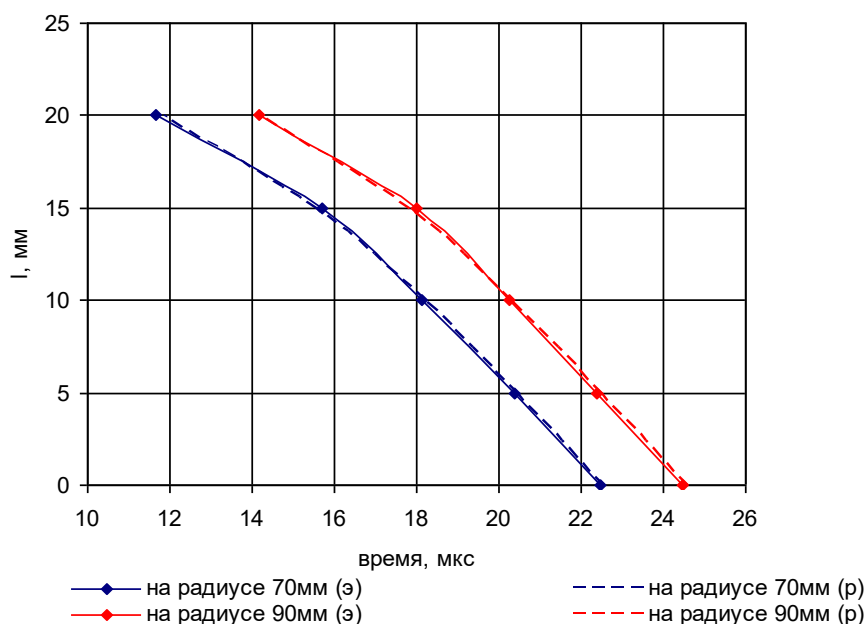


Рисунок 2 – График зависимости движения тарели ДВМГ-400 от времени

Анализ результатов показал, что скорость тарели составила $\sim 2,20$ км/с [В1].

Согласие результатов численного моделирования с экспериментальными данными свидетельствует об эффективности использования программы вычислительной гидродинамики ANSYS AUTODYN для моделирования работы конструктивных элементов систем импульсной мощности на основе ДВМГ.

Толщина скин-слоя в токопроводящих элементах ДВМГ достаточно мала, а напряжение в генераторе поддерживается постоянным на максимально допустимом уровне – это позволяет проводить моделирование работы дисковых элементов в гидродинамическом приближении.

На примере дисковых элементов ДВМГ-250, был рассмотрен ряд факторов способных повлиять на работу ДВМГ: воздействие давления магнитного поля на стадии запитки током от предусилителя (спирального ВМГ), изменение объема зарядов взрывчатого вещества (ВВ) дисковых элементов, смещение инертной вставки, размещенной между дисковыми элементами относительно ее номинального положения, асинхронность срабатывания шашек ВВ узла иницирования ДВМГ. Рассчитан коэффициент преобразования кинетической энергии тарелей в энергию магнитного поля в зависимости от скорости разлета тарелей во время работы ДВМГ по сжатию магнитного потока.

В первой главе представлены результаты численного моделирования, проводимого с целью прогнозирования поведения отдельных элементов конструкции ДВМГ под воздействием тех или иных факторов. Погрешность измерения токовых параметров в экспериментах не превышает 4%, расчетное значение давления 8%.

С помощью двумерного численного моделирования исследовано воздействие давления магнитного поля в процессе запитки ДВМГ-250 током спирального ВМГ на деформацию тарелей дисковых элементов [12, 13]. Определено, что в номинальном режиме запитки ДВМГ током – 6,50 МА (рис.3 а) максимальная величина прогиба тарели дискового элемента относительно ее начального положения составила приблизительно 1 мм. Давление в области максимального прогиба – 0,79 ГПа (рис. 3б), погрешность расчета не превышает 8%.

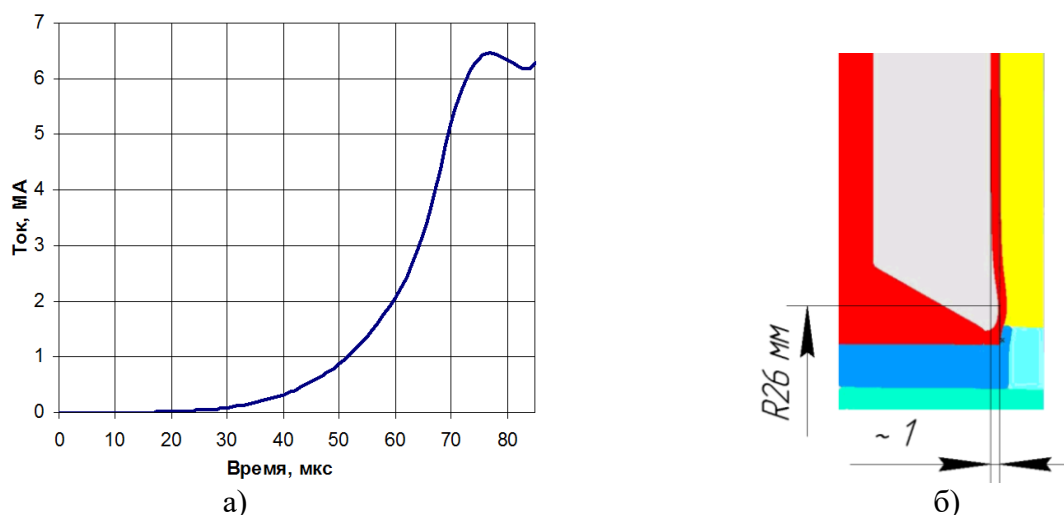


Рисунок 3– а) Ток запитки ДВМГ-250; б) Деформация тарели ДВМГ-250 на стадии запитки.

Влияние на величину конечного тока ДВМГ оказывают потери магнитного потока в скин-слое и возможные потери (отсекания) части потока в полостях, образующихся при деформациях токового контура под действием давления магнитного поля. В процессе работы дисковых элементов по сжатию магнитного потока возможна ситуация, когда из-за сильного градиента магнитного поля вдоль поверхности дисковых элементов тарели соседних дисковых элементов сталкиваются и электрически замыкаются на большем радиусе раньше, чем на меньшем. При этом индуктивность ДВМГ скачком уменьшается, что соответствует отсеканию части магнитного потока. Возникновение ситуации с отсеканием части потока служит указанием на то, что необходимо либо снизить начальный ток ДВМГ, либо изменить форму дисковых элементов в области вероятного отсекания, например, увеличить количество ВВ.

Исследовано влияние толщины тарелей дисковых элементов и количества ВВ в дисковых элементах на процесс работы ДВМГ по сжатию магнитного потока. Анализ результатов численного моделирования показал, что с увеличением толщины заряда ВВ дисковых элементов до 12, 15 мм (при стандартной 10 мм), увеличивается скорость движения тарелей, влияние магнитного поля ослабевает.

При реализуемом в ДВМГ токе – 61 МА скорость тарелей при столкновении на различных радиусах разная из-за градиента давления магнитного поля вдоль тарели и разницы в длине участков (рис.4). При толщине ВВ – 10 мм скорость тарелей в точке динамического контакта лежит в диапазоне от 0,35 до 1,37 км/с. При толщине ВВ – 12 мм в диапазоне от 0,96 до 1,65 км/с. При отсутствии магнитного поля скорость тарелей в момент столкновения повсюду одинакова и равна 2,2 км/с при толщине ВВ – 10мм и 2,4 км/с при толщине ВВ – 12 мм. Чем меньше подлётная скорость, тем больше коэффициент отбора энергии магнитным полем от ВВ. Но скорость разлета тарелей от 0,5 км/с и меньше может привести к возникновению отсеканий магнитного потока из-за отсутствия контакта между тарелями и даже к отказу в работе дисковых элементов по сжатию магнитного потока. Так при уменьшении толщины ВВ дисковых элементов до 9,5 мм в процессе схождения тарелей дисковых элементов (при запитке ДВМГ–250 током 6 МА) наблюдались отсекания части магнитного потока в полости сжатия.

В первом приближении процесс преобразования энергии в ДВМГ можно представить, как ускорение тарелей дисковых элементов детонацией ВВ, замедление тарелей под действием магнитного поля и вытеснение магнитного потока в нагрузку. Если рассчитывать отдельно к.п.д. этих процессов, то общий коэффициент полезного действия (часть энергии взрыва ВВ в ВМГ преобразуемая в энергию электромагнитного поля и переданная в нагрузку) будет равен произведению отдельных к.п.д.

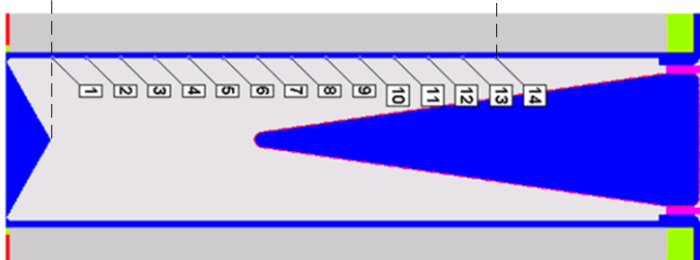
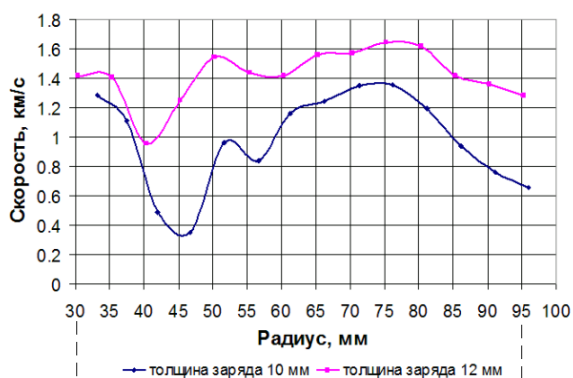


Рисунок 4 – Зависимости скорости от радиуса различных участков тарелки при столкновении (толщина ВВ дисковых элементов 10, 12 мм, ток ДВМГ - 61 МА)

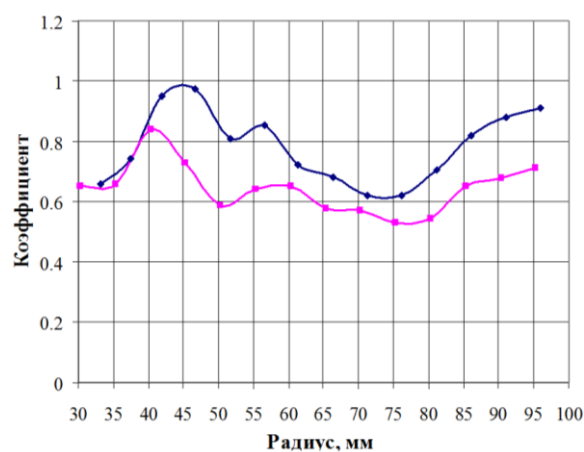


Рисунок 5 – Коэффициент передачи кинетической энергии тарелки магнитному полю

$K.п.д. = k_{ВВ} \cdot k_{МП} \cdot \eta^2$, где $k_{ВВ}$ – часть энергии ВВ, перешедшая в кинетическую энергию тарелок, $k_{МП}$ – часть кинетической энергии тарелок, переданная магнитному полю, η – коэффициент сохранения потока в ДВМГ.

Проведём оценку возможности получения максимального к.п.д. Как показано в [14] максимальный коэффициент отбора энергии пластин от ВВ при свободном разлёте составляет приблизительно 0,35. Для обеих пластин, расположенных по обеим сторонам плоского заряда ВВ, это значение составит приблизительно 0,7 (0,35·2). Наличие магнитного поля способствует увеличению к.п.д., однако это влияние незначительно, так как на начальном этапе разгона тарелки давление магнитного поля незначительно.

Зная начальную скорость тарелки и её скорость на разных участках в точке динамического контакта, можно вычислить какая часть кинетической энергии движущейся тарелки передается магнитному полю (рис.5). Разница в кинетической энергии и составит энергию магнитного поля: $1 - (V_k/V_0)^2$, где V_k – скорость тарелки в точке динамического контакта; V_0 – начальная скорость тарелки. Из анализа графика, представленного на рисунке 5, следует, что для ДВМГ-250 мм коэффициент передачи довольно высок и может составлять 0,8.

Коэффициент сохранения потока для генераторов различного диаметра может отличаться довольно значительно. От 0,60 для ДВМГ диаметром 250 мм до 0,87 для ДВМГ диаметром 1000 мм.

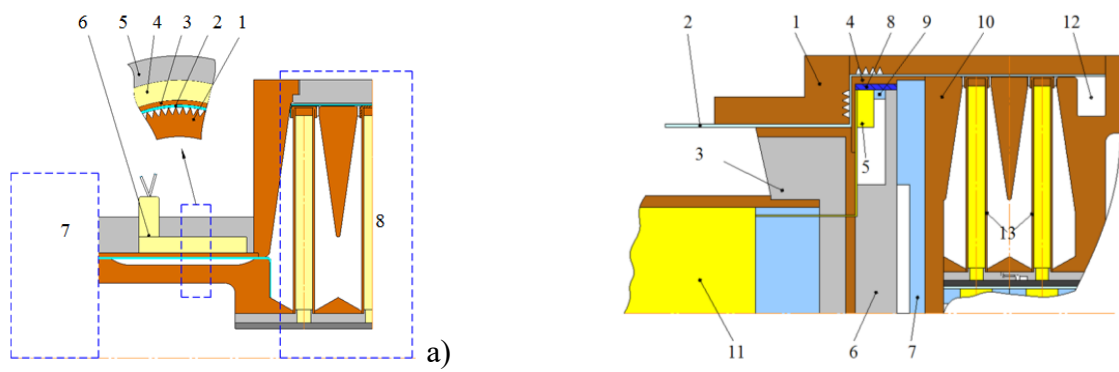
Из приведенных данных следует, что сильнее всего на к.п.д. влияет коэффициент сохранения потока, который зависит от диаметра генератора. Это связано с уменьшением сопротивления генератора при увеличении диаметра дисковых элементов и сокращении числа дисков. Максимальная величина к.п.д. для ДВМГ-250: $K.п.д. = k_{ВВ} \cdot k_{МП} \cdot \eta^2 = 0,70 \cdot 0,80 \cdot 0,36 = 0,2$. Это значение совпадает со значением, полученным экспериментально [15].

Смещенная относительно номинального положения инертная вставка, расположенная между соседними дисковыми элементами – в полости сжатия магнитного потока, приводит к образованию полостей с отсекаемым магнитным потоком в процессе работы ДВМГ. Расчетно определено: при симметричном расположении вставки остаточная индуктивность междисковой полости составляет 0,07 нГн, при смещении инертной вставки на 1 мм полость расположена с одной стороны, ее индуктивность составляет – 0,09 нГн.

Разновременности срабатывания соседних дисковых элементов ДВМГ выше 0,5 мкс также приводит к появлению полостей с отсекаемым магнитным потоком в полостях сжатия. Это связано с тем, что дисковому элементу, сработавшему с задержкой, приходится работать против более сильного магнитного поля. При разновременности срабатывания соседних дисковых элементов – 0,5 мкс и толщине заряда ВВ – 10 мм, в момент выхода ударной волны в передающую линию ДВМГ в верхней области инертной вставки остаются полости с не выведенным магнитным потоком. Остаточная индуктивность междисковой полости – 0,12 нГн. Увеличение толщины заряда ВВ дискового элемента позволяет снизить или устранить вероятность возникновения полостей с отсекаемым магнитным потоком.

Во второй главе приведено описание устройства отключения дискового взрывомагнитного генератора от предусилителя – спирального ВМГ. Узел отключения (УО) предназначен для замыкания электрической цепи между СВМГ и ДВМГ в момент достижения в дисковом ВМГ магнитного потока заданной величины. Использование типовой схемы УО сопряжено с использованием значительного количества (более 20) электродетонаторов (ЭД) в системе инициирования УО. С необходимостью использования сложных громоздких высоковольтных подрывных установок. Во время работы конденсаторной батареи (источника начального магнитного потока в СВМГ) и СВМГ в цепи подрыва УО возникают большие напряжения (> 15 кВ), это может привести к нештатной работе узла отключения, например, к перегоранию мостиков ЭД вследствие посторонних электрических импульсов.

Предложен альтернативный вариант устройства отключения, не содержащий электродетонаторов. Срабатывание устройства отключения синхронизировано с окончанием работы спирального генератора посредством взаимного расположения деталей СВМГ и ДВМГ. Описан принцип действия и конструктивная схема альтернативного устройства отключения. Представлены результаты предварительных газодинамических расчетов, а также результаты экспериментов с альтернативным устройством отключения. Приведен сравнительный анализ экспериментальных данных работы ДВМГ с типовым УО и с альтернативным УО (рис. 6).



1 – медный цилиндр, 2 – лавсановый изолятор, 3 – медный цилиндр-лайнер, 4 – цилиндрический заряд ВВ, 5 – стальной электрод, 6 – фланец, 7 – вставка, 8 – ДВМГ, 9 – кольцо, 10 – входной фланец, 11 – ВВ СВМГ, 12 – нагрузка, 13 – тарель

Рисунок 6 – Конструктивная схема узла отключения ДВМГ от СВМГ: а) типового, б) альтернативного

Альтернативная конструкция УО удовлетворяет предъявленным к ней требованиям:

- не содержит электродетонаторов;
- согласованность в работе СВМГ и УО обеспечивается взаимным расположением конструктивных элементов;
- свободна от воздействия электромагнитных полей;

– наличие надежного контакта рабочих поверхностей узла отключения сохраняется от момента передачи магнитного потока СВМГ в ДВМГ и до вытеснения потока дисковыми элементами в передающую линию.

Результаты второй главы опубликованы в работах [А1, В2, С1].

Третья глава посвящена системе инициирования ДВМГ.

Приведены результаты 3D численного моделирования по определению влияния ударных волн возникающих при срабатывании электродетонаторов и прутков детонационной разводки на работу элементов распределителя, предназначенного для использования в экспериментах с ДВМГ [16].

Представлено описание типового узла инициирования, предназначенного для синхронного инициирования зарядов дисковых элементов ДВМГ. Использование типовой системы инициирования сопряжено:

– с использованием электродетонаторов по количеству дисковых элементов (может достигать до 30), применение которых приводит к необходимости использования сложных высоковольтных подрывных установок;

– с наличием электрической разводки для подрыва цепочки ЭД, чувствительной к внешнему электромагнитному полю. При работе СВМГ, в подрывных цепях ДВМГ (в условиях большого внешнего электромагнитного поля) возникают посторонние электрические импульсы, которые могут вызвать перегорание мостиков ЭД и отказ в работе ДВМГ, а т.ж. существует вероятность самопроизвольного подрыва ВВ дисковых элементов при запитке током выше номинального.

В качестве альтернативы используемой в ДВМГ инициирующей системы, с целью создания помехоустойчивого ДВМГ предложено выполнять передачу детонации зарядам ВВ дисковых элементов не посредством электродетонаторов, а с помощью детонационной разводки размещаемой в системе инициирования. Начальное инициирование детонационной разводки, производится одновременно с подрывом предусилителя (СВМГ) при помощи удалённого ЭД размещенного в полости между СВМГ и ДВМГ, тем самым, полностью исключается влияние посторонних электрических импульсов на конструктивные элементы инициатора.

Новизна описываемой в данной работе системы инициирования состоит в том, что детонационная разводка проложена непосредственно через материал шашки ВВ инициатора.

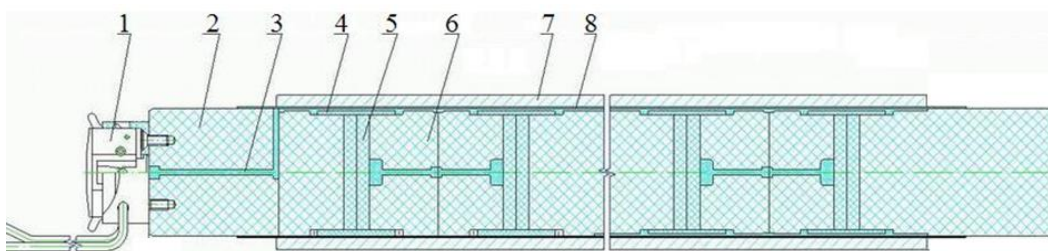
При разработке конструкции особое внимание было уделено исследованию влияния параметров элементов инициатора с детонационной разводкой на работу системы инициирования:

– влияние ударных волн на прутки детонационной разводки, лежащие на границе двух сред;

– влияние выбора материала трубы системы инициирования на передачу детонации основному заряду ВВ дискового элемента;

– воздействие опосредованного давления магнитного поля при запитке ДВМГ на элементы конструкции инициатора;

Конструкция инициатора с детонационной разводкой рассмотрена на примере системы инициирования для 12 элементного ДВМГ диаметром 400 мм и 16 элементного ДВМГ диаметром 550 мм. На рисунках 7, 8 для примера представлена схема инициатора и схема – развёртки детонационной разводки ДВМГ-400. Диаметр инициаторов был увеличен (например, для ДВМГ-550 с 35 мм до 52 мм). Это дало возможность разместить в инициаторе детонационную разводку. Соответственно, увеличен был и минимальный радиус протекания тока (например, для ДВМГ-550 с 26 мм до 39 мм), что позволило уменьшить величину воздействия давления магнитного поля на стадии запитки генератора.



1. Электродетонатор, 2. Основание, 3. Детонационная разводка, 4. Короб, 5. Шашка ВВ, 6. Прокладки, 7. Стальная (титановая) труба, 8. Гильза

Рисунок 7 – Образец конструктивного исполнения инициатора ДВМГ-400

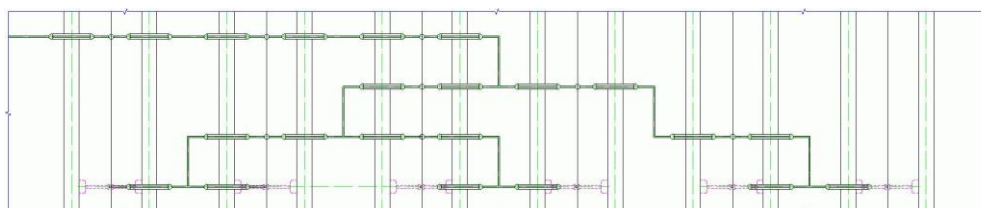


Рисунок 8 – Образец схемы – развёртки детонационной разводки инициатора ДВМГ-400

Детонационная разводка рассчитана таким образом, чтобы одновременно вызвать детонацию во всех шашках ВВ стержневого инициатора. Вся разводка, кроме конечной её части, выполнена на наружной поверхности шашек и прокладок. Детонация, распространяясь по пруткам из пластикового ВВ (плотность – $1,51 \text{ г/см}^3$, скорость детонации – $7,8 \text{ км/с}$ возбуждает детонацию одновременно в центральной области каждой шашки ВВ (плотность – $1,6 \text{ г/см}^3$, скорость детонации – $7,9 \text{ км/с}$). Ударные волны, вызванные подрывом шашек ВВ, проходят через металлическую трубу и инициируют одновременно все заряды ВВ дисковых элементов.

Для предупреждения деформации прутков, лежащих на границе двух сред (прокладка – шашка ВВ), а также для защиты от преждевременной детонации шашек инициатора, использовались коробка из оргстекла проложенные через материал шашки ВВ, в коробках размещались прутки разводки.

В результате серии предварительных 3D расчетов и последующих модельных экспериментов были определены параметры элементов инициатора с детонационной разводкой для работы устройства в штатном режиме. Установлено, что:

- при минимальном расстоянии между соседними каналами (не менее 5 мм) ударные волны, распространяющиеся от сработавшего прутка ВВ детонационной разводки сечением $1,2 \times 1,0 \text{ мм}^2$ не оказывают влияния на соседние прутки, лежащие на границе двух сред (рис. 9). В модельном эксперименте разновременность в работе шести элементного инициатора составила 0,28 мкс. Полное время работы инициатора в опыте составляло – 121,80 мкс, расчетное – 122 мкс.

- при размещении прутков ВВ детонационной разводки сечением $1,2 \times 1 \text{ мм}^2$ и сечением $1,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$ в коробках из оргстекла сечением $3 \times 3 \text{ мм}^2$, проложенных через материал шашек ВВ, ударные волны, возникающие при распространении детонации по пруткам ВВ гарантированно не вызывают преждевременное инициирование детонации в шашках ВВ инициатора (рис. 10);

- титан, по сравнению со сталью, является более перспективным материалом для изготовления труб систем инициирования, поскольку скорость распространения ударных волн в титане выше (рис. 11).

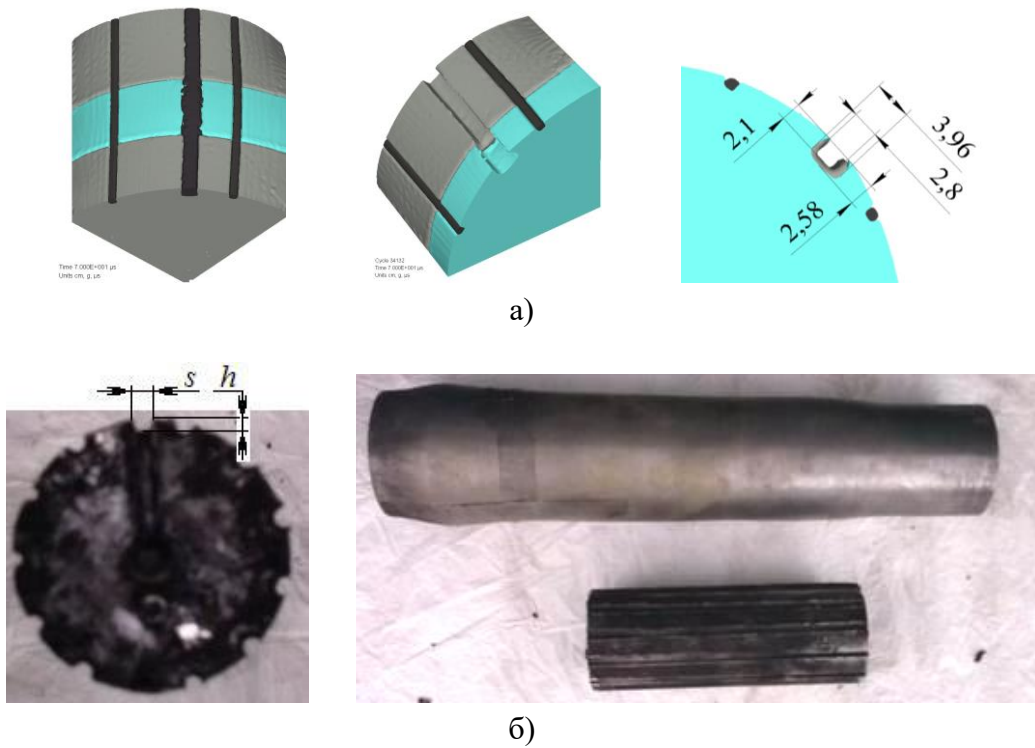
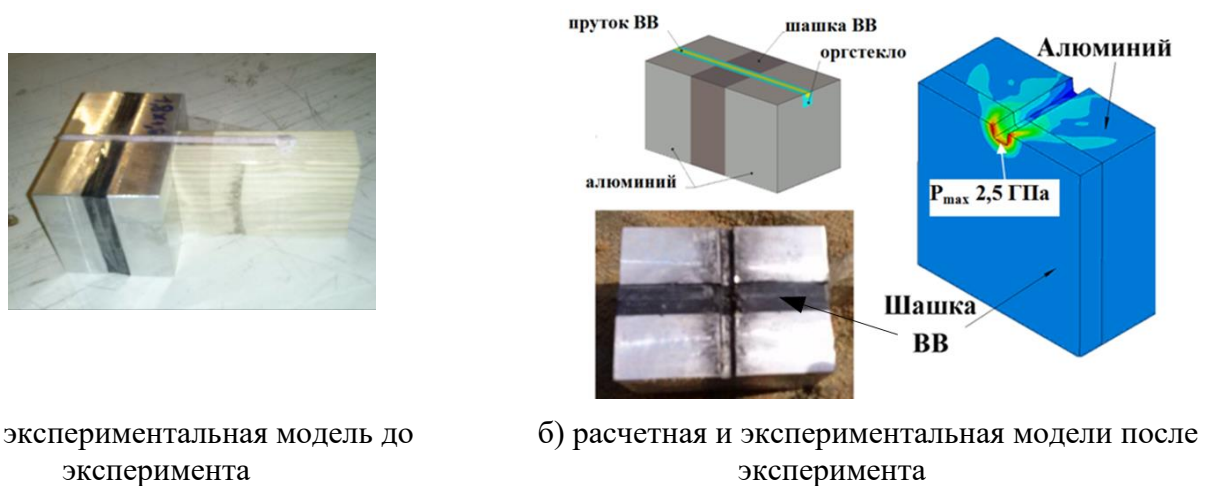


Рисунок 9 – а) Результаты численного моделирования воздействия детонации центрального прутка разводки сечением $1,2 \times 1,0 \text{ мм}^2$ на соседние прутки разводки и элементы инициатора ДВМГ-400; б) Вид элементов инициатора после эксперимента



а) экспериментальная модель до эксперимента

б) расчетная и экспериментальная модели после эксперимента

Рисунок 10– Внешний вид деталей макета до и после эксперимента

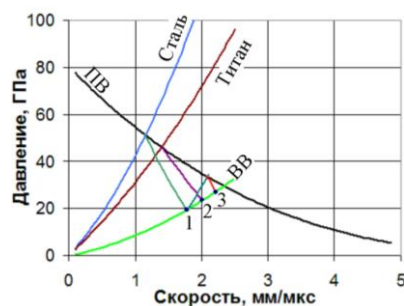


Рисунок 11 – График зависимости давления от массовой скорости вещества

– при запитке ДВМГ-550 током 8 МА выбранные параметры конструктивных элементов инициатора: титановая труба толщиной 3 мм с внутренним диаметром 52 мм, прутки детонационной разводки сечением $1,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$, размещенные в коробах из оргстекла сечением $3 \times 3 \text{ мм}^2$, проложенных через материал шашек ВВ сохраняют работоспособность в течение всего времени работы преусилителя – 250 мкс.

Система иницирования с детонационной разводкой повышает помехоустойчивость ДВМГ и не нуждается в использовании дополнительной подрывной установки.

В четвертой главе приведен сравнительный анализ методов получения максимальных скоростей в лайнерных системах. Одним из широко распространенных способов разгона лайнерных оболочек в цилиндрической геометрии является ускорение магнитным полем. Использование источников импульсной мощности на основе ВМГ, позволяет проводить работы по исследованию особенностей разгона лайнерных оболочек быстронарастающим магнитным полем [17, 18, В5]. Ускорение лайнера происходит под действием силы Лоренца, возникающей при взаимодействии протекающего по лайнеру тока с генерируемым магнитным полем. Использование каскадных лайнерных систем позволяет достичь еще больших скоростей.

Для экспериментального устройства с СВМГ с относительно небольшой запасаемой энергией $\sim 3 \text{ МДж}$ с нагрузкой в виде лайнерного пондеромоторного узла с 1 каскадом, проводилось предварительное численное моделирование по определению скорости лайнера в момент подлета к каскаду и определения максимальной скорости ударника. Расчетный ток в лайнерной нагрузке составлял $\sim 24 \text{ МА}$.

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами предварительного численного моделирования (рис. 12).

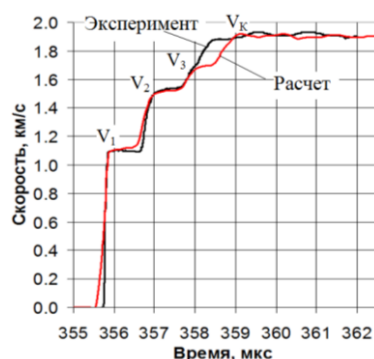


Рисунок – 12 Расчётная и экспериментальная зависимости скорости тяжелой оболочки каскада от времени

Расчетная скорость лайнера толщиной 8 мм, установленного на радиусе 120 мм, при подлете к каскаду составила – 1,12 км/с. Разгон ударника (тяжелой оболочки каскада) происходил скачкообразно: $V_1 \sim 1,10 \text{ км/с}$, $V_2 \sim 1,50 \text{ км/с}$, $V_3 \sim 1,68 \text{ км/с}$, $V_k \sim 1,90 \pm 0,03 \text{ км/с}$. Скорость ударника в 1,7 раз превысила скорость, сообщенную лайнеру магнитным полем. Результаты эксперимента подтвердили, что зная любую из скоростей V_1 , V_2 или V_k , можно определить скорость лайнера (считая, что уравнения состояния известны с достаточной точностью). Расчетная и экспериментальная кривые совпадают во всем временном диапазоне, кроме отрезка с 358 по 358,5 мкс. Результаты опубликованы в работе [А2].

В настоящее время дисковый ВМГ диаметром 1000 мм является самым мощным и энергоёмким ДВМГ, способным генерировать токи до 300 МА. Для исследований уравнений состояния вещества использование ДВМГ1000 (рис. 13) с многокаскадной лайнерной системой является одним из способов реализации давлений до 5 ТПа [В4, В6].

В результате 2D численного моделирования определено: при подлете к системе каскадов скорость медного лайнера, ускоряемого током 10 элементного ДВМГ-1000 (рис. 14, 15) составила 13 км/с (энергия $\sim 250 \text{ МДж}$). Исследуемая титановая оболочка при подлете к радиусу 10 мм приобрела скорость 54,45 км/с при толщине оболочки $\sim 1 \text{ мм}$. Давление в мишени из

титана при её постановке на радиус 10 мм при ударе составит $\sim 4,95$ ТПа. (10Мбар=1ТПа). Приведенные расчеты носят оценочный характер и могут быть оптимизированы.

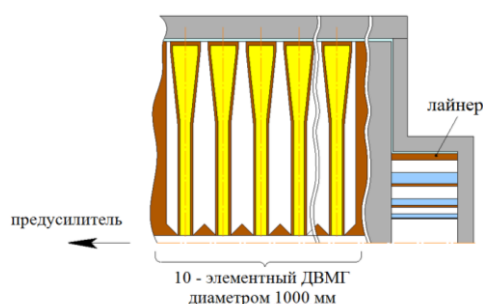


Рисунок 13 – Схема ДВМГ-1000 с лайнерным пондеромоторным узлом с системой каскадов

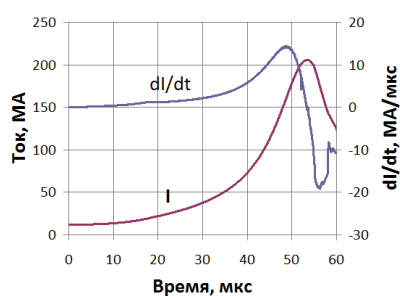


Рисунок 14 – Расчетные ток, производная тока 10-элементного ДВМГ-1000

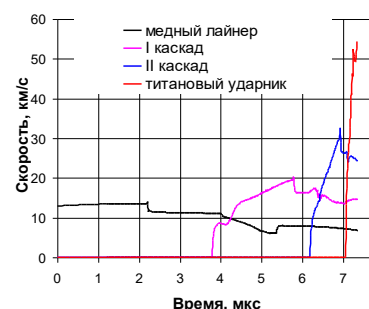


Рисунок 15 – Расчетные скорости тяжелых оболочек каскадов

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. На примере ДВМГ-250 с плоскими дисками исследованы ряд факторов, влияющих на работу дисковых элементов генератора: воздействие давления магнитного поля на дисковые элементы, смещение инертной вставки от номинального положения, неодновременное срабатывание шашек ВВ узла инициирования, толщина заряда ВВ дисковых элементов. Определено, что для ДВМГ-250 коэффициент передачи кинетической энергии тарели магнитному полю может достигать до 0,8.

2. Экспериментально реализовано устройство отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального взрывомагнитного генератора, не содержащее электродетонаторов. Синхронизация работы СВМГ и УО обеспечивается посредством взаимного расположения конструктивных элементов. Устройство запатентовано, Пат. RU2700694C1.

3. Представлена модель инициатора, работающего от одного ЭД для одновременного инициирования зарядов ВВ дисковых элементов ДВМГ. Детонационная разводка инициатора проложена непосредственно через материал шашки ВВ.

4. Представленная в работе сравнительная характеристика и приведенные результаты оптимизации систем разгона цилиндрических лайнеров методом каскадирования, демонстрируют преимущества использования электродинамического метода разгона основного лайнера перед газодинамическим.

Результаты численного моделирования согласуются с результатами эксперимента (разница менее 1%) по проверке эффективности каскадного метода ускорения ударника с начальным импульсом от лайнера, ускоряемого магнитным полем от спирального ВМГ с лайнерным узлом с одним каскадом. Данные о промежуточной или конечной скорости тяжелой оболочки каскада позволяют определить скорость лайнера (считая, что уравнения состояния известны с достаточной точностью), а по скорости и значению тока, протекающего по лайнеру.

Результаты численного моделирования по ускорению лайнера током, генерируемым ДВМГ с применением многокаскадных систем, демонстрируют перспективность работ по ускорению конденсированных оболочек, в подобного рода системах, до скоростей порядка десятков километров в секунду и выше.

Использование источников импульсной мощности на основе ДВМГ для разгона цилиндрических конденсированных лайнеров методом каскадирования позволяет проводить исследования динамических свойств конструкционных материалов в условиях ударно – волнового нагружения.

Список используемой литературы

1. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. Фортова В. Е.. М.: Наука. – 2002. – С. 398.
2. Борисков Г.В., Быков А.И., Долотенко М.И., Кудасов Н.И., Платонов В.В., Селемир В.Д., Таценко О.М. Физические исследования в сверхсильных магнитных полях // УФН. – 2011.– Т 181. № 4. – С. 441–447..
3. Биченков Е.И., Гилев С.Д., Трубачев А.С. Ударноволновые МК-генераторы // Сверхсильные магнитные поля / под ред. Титова В.М. и Швецова Г.А.. – М.: Наука. – 1984. – С. 88 – 93.
4. Nagayama K. New method of magnetic flux compression by means of the propagation of shock induced metallic transition in semiconductor // Appl. Phys. Lett. – 1981. – V. 38, № 2. – P. 109–116.
5. Kudel'kin V.B., Babich L.P., Grinevich B.E. et al. Super-power disk explosive magnetic generators of electromagnetic energy for high-energy densities research // IEEE Transactions on Plasma Science – 2018 – V. 46. issue 1 – P. 148-155.
6. Чернышев В.К., Протасов М.С., Шевцов В.А., Жаринов Е.И., Волков Г.И., Иванов В.А., Демидов В.А., Пак С.В., Гриневич Б.Е. и др. Взрывомагнитные генераторы семейства «ПОТОК» // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 1992. – Вып.4. – С. 33 – 41.
7. Мохов В.Н., Чернышев В. К., Якубов В. Б., Протасов М. С., Данов В. М., Жаринов Е. И. О возможности решения проблемы управляемого термоядерного синтеза на основе магнитогазодинамической кумуляции энергии // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 247, № 1.– С. 83 – 86.
8. Чернышев В.К. Сверхмощные взрывомагнитные источники для термоядерных и физических исследований // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение/ под ред. Чернышева В.К., Селемира В.Д., Пляшкевича Л.Н. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 1997. – С. 41 – 58.
9. Чернышев В.К., Мохов В.Н., Буйко А.М. и др. Основные типы взрывомагнитных генераторов и их применения. // В кн.: Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения / под ред. Чернышева В. К., Селемира В. Д., Пляшкевича Л. Н. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 1997. – С. 242–247.
10. Гриневич Б.Е., Демидов В А, Ивановский А В, Селемир В Д Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // УФН. – 2011. – Т. 181, № 4.– С. 422 – 427.
11. Ansys – student – Free Software Download [Electronic resource]. – URL: <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student>. (дата обращения: 15.07.2019).
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Методы генерации и физ. эффекты, связ. с созданием импульсных полей мегаэрстедного диапазона / перевод с англ. Ф. А. Николаева и Ю. П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – С. 391.
13. Ландау Л Д, Лифшиц Е М Электродинамика сплошных сред – М.: Наука, – 1957; Landau L D, Lifshitz E M Electrodynamics of Continuous Media // London: Pergamon Press. – 1984. Кучеренко В В Изв. АН СССР Сер. матем.– 1974. – 38 – С.625.
14. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. – 1997. – С. 110.
15. Ivanovsky A.V. Explosive PW-power current source – myth or reality? // Megagauss XIII. Suzhou. China. – 2010. – P.32 – 43.
16. Волков Г. И., Дудай П. В., Иванов В. А. и др. Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики. – 2010. – С. 384 –395

17. Баранов В.К., Голубинский А.Г., Глыбин А.М., Дудай П.В., Ивановский А.В., Иреничев Д.А., Зименков А.А., Краев А.И., Костюков С.А., Надежин С.С., Тагиров Р.М., Тюпанова О.А. Применение взрывомагнитных генераторов для исследований динамических свойств материалов в условиях ударно-волнового нагружения// Доклад на совещании «Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами». ИПФ РАН, Нижний Новгород. – 2018 г.

18. Гриневич Б. Е., Ивановский А. В., Чернышев В. К., Вахрушев В. В., Куделькин В. Б., Краев А. И., Шпагин В. И. Источник импульсной мощности со скоростью нарастания тока до 10^{14} А/с для разгона легких лайнеров до высоких скоростей на базе дискового ВМГ второго поколения // Труды Международной конференции VIII Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2006. – С. 563 – 566.

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. Гриневич Б.Е., Климушкин К.Н., Ситникова Н.И., Торопов К.С. Узел отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального генератора // Прикладная физика– 2019, № 6. – С. 102.

A2. Баранов В.К., Глыбин А.М., Голубинский А.Г., Гриневич Б.Е., Дудай П.В., Зименков А.А., Ивановский А.В., Краев А.И., Мамышев В.И., Ситникова Н.И. О применении взрывомагнитных генераторов для ускорения конденсированных оболочек методом каскадирования // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 4. – С. 59 – 66.

Материалы конференций, семинаров

[B1] Ерофеев А. Н., Климушкин К. Н., Ситникова Н. И., Торопов К. С. Газодинамическая отработка модуля дискового ВМГ среднего класса// Молодежь в науке: Сборник докладов 15-й научно-технической конференции. г. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2017. – С. 180 – 185.

[B2] Торопов К. С., Арюткин М. Ю., Климушкин К. Н., Ситникова Н. И. Экспериментальное исследование узла отключения дискового ВМГ малого класса// Труды XIV Научно технической конференции «Молодежь в науке». Саров. – 2015. – С. 245–251.

[B3] Гриневич Б.Е., Климушкин К.Н., Ситникова Н.И., Торопов К.С. Узел отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального // Доклад на Международной конференции XXI Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2019.

[B4] Гриневич Б.Е., Ивановский А.В., Климушкин К.Н., Мамышев В.И., Ситникова Н.И., Шаповалов Е.В. Об ускорении оболочек с помощью взрывомагнитных генераторов и систем каскадов// Доклад на семинаре «Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами». ИПФ РАН. г. Нижний Новгород. – 2018 г.

[B5] Вахмистров Р.С., Гирич В.А., Гриневич Б.Е., Егорычев Б.Т., Ивановский А.В., Козлов В.И., Леушев Д.В., Мамышев В.И., Панов А.И., Самодолов А.В., Семенова Т.В., Ситникова Н.И., Шаповалов Е.В. Исследования турбулентного перемешивания при торможении тяжелой оболочки, летящей со скоростью ~ 10 км/с, на лёгком материале// Доклад на семинаре «Исследования в области физики высоких плотностей энергии лазерными и электрофизическими методами», ИПФ РАН. г. Нижний Новгород. – 2018 г.

[B6] Grinevich B.E., Ivanovsky A.V., Klimushkin K.N., Mamyshev V.I., Sitnikova N.I., Shapovalov E.V. On Acceleration of Shells by Explosive Magnetic Generators and Cascade Systems // The 16th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics (MEGAGAUSS), Kashiwa, Japan. – 2018. – P. 1 – 4.

Патент

[C1] Способ и узел отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального взрывомагнитного генератора: Патент RU2700694C1 Рос. Федерация. МПК H02N11/00/ Гриневич Б.Е., Климушкин К.Н., Ерофеев А.Н., Ситникова Н.И., Торопов К.С. № 2018139897, заявл. 11.12.2018; опубл. 19.09.2019, Бюл. № 26 – С.9.

Ситникова Наталья Ивановна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УЗЛОВ ДИСКОВОГО
ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук