

ОБ УСКОРЕНИИ ОБОЛОЧЕК С ПОМОЩЬЮ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И СИСТЕМ КАСКАДОВ

Б. Е. Гриневич, А. В. Ивановский, К. Н. Климушкин, В. И. Мамышев, Н. И. Ситникова, Е. В. Шаповалов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Применение дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) для ускорения цилиндрических конденсированных лайнеров позволяет сообщить им скорости большие тех, которые можно достичь при непосредственном ускорении лайнеров продуктами взрыва конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Одним из путей дальнейшего повышения скоростей лайнеров является построение каскадных систем. Представлены результаты расчётов условий, необходимых для разгона массивных лайнеров до скоростей 20–50 км/с магнитным полем.

Введение

Одним из применений ДВМГ является ускорение цилиндрических конденсированных лайнеров до скоростей от нескольких километров в секунду и более. В работах [1–3] описаны результаты опыта, в котором алюминиевому лайнеру массой 1 кг была сообщена скорость ~8,4 км/с, что практически недостижимо при разгоне лайнеров продуктами детонации современных ВВ. Для достижения ещё больших скоростей требуется принятие специальных мер. Одним из путей придания металлическим лайнерам высоких скоростей является построение каскадных систем. Каждый каскад состоит из двух слоёв: внешнего – лёгкого и внутреннего – тяжёлого. Лёгкий слой затягивает импульс давления при ударе и служит для более полной передачи импульса от каскада к каскаду. Тяжёлый слой несёт основную энергию.

В работе [4], посвящённой проблеме ГДТС указано, что «физическая схема заряда, которая была выбрана и расчётно обоснована Е.И. Забабахиним и Н. А. Поповым, представляла собой так называемую многокаскадную систему, состоящую из набора сравнительно тонких каскадов, скреплённых в одно целое с помощью спиц. Каждый каскад состоял из оболочек, изготовленных из материала большой плотности (Fe, U и т. п.), лёгких смягчающих прокладок (например, из органического стекла) над ними и воздушных промежутков между каскадами».

В докладе приведены результаты расчётов работы ДВМГ на индуктивную нагрузку переменной величины, включающую в себя массивный медный лайнер, а также представлены результаты

двумерных расчетов по определению скорости лайнеров в системе каскадов. Расчёты проведены для ДВМГ Ø400 мм и ДВМГ Ø1000 мм. Выполнены оценки условий достижения высоких скоростей лайнеров подобного рода системах.

ДВМГ Ø400 мм и двухкаскадная система

Ниже приведены результаты расчета по разгону медного лайнера толщиной 0,4 см, расположенного на радиусе 7,9 см, током 15-элементного генератора диаметром 400 мм. Методика расчётов изложена в работе [5]. Основные процессы, которые учитываются в расчетах:

- двумерный газодинамический расчет параметров ВВ и продуктов взрыва;
- расчет смещения дисков под действием давления продуктов взрыва с учетом противодействия магнитного поля;
- расчет потерь магнитного потока в токовом контуре;
- расширение передающих линий и нагрузки под действием давления магнитного поля.

Расчет полета лайнера проводился в одномерном магнитогидродинамическом приближении с учетом диффузии магнитного поля в лайнер и его нагрева из-за протекающего тока. Уравнение состояния и проводимость медного лайнера взяты из работы [6]. Расчет разгона лайнера проведен в согласованном режиме с расчетом ДВМГ. Ток, полученный при расчете ДВМГ, определяет граничные условия для расчета лайнера, а смещение лайнера и напряжение на границе лайнера учитываются при расчете ДВМГ как изменение индук-

тивности нагрузки и дополнительные потери магнитного потока.

Общая схема устройства приведена на рис. 1. Суммарная индуктивность 15-элементного ДВМГ составила 180 нГн, из них 176 нГн в полостях ВМГ.

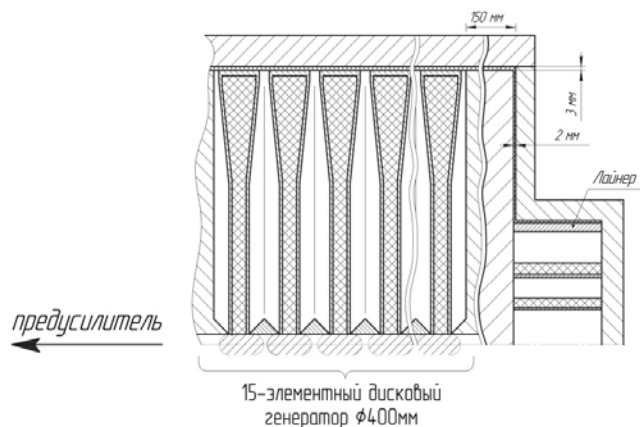


Рис. 1. Схема устройства для ускорения лайнера давлением магнитного поля при работе 15-элементного ДВМГ Ø400 мм

Ток запитки составил 7 МА. В результате расчета получена зависимость давления от времени и от наружного радиуса лайнера, которая в дальнейшем была использована в качестве граничного условия в расчетах системы каскадов.

На рис. 2 приведены ток и производная тока, полученные в расчете, а на рис. 3 радиусы и скорости границ лайнера в зависимости от времени.

По горизонтали отложено время с момента начала работы ДВМГ, по вертикали слева – ток, справа – производная тока.

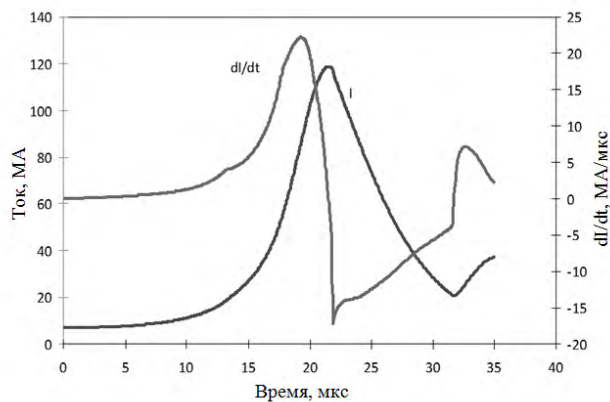


Рис. 2. Ток и производная тока в расчете для 15-элементного ДВМГ

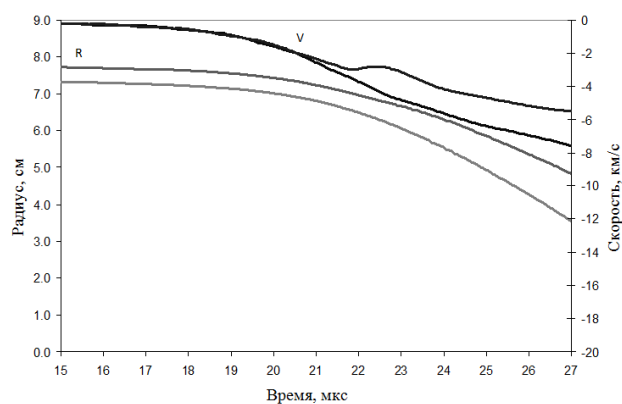


Рис. 3. Радиусы и скорости границ лайнера в расчете для 15-элементного ДВМГ

На рис. 3 по горизонтали отложено время, по вертикали слева радиусы расположения лайнера, справа – скорости внешней и внутренней границ лайнера.

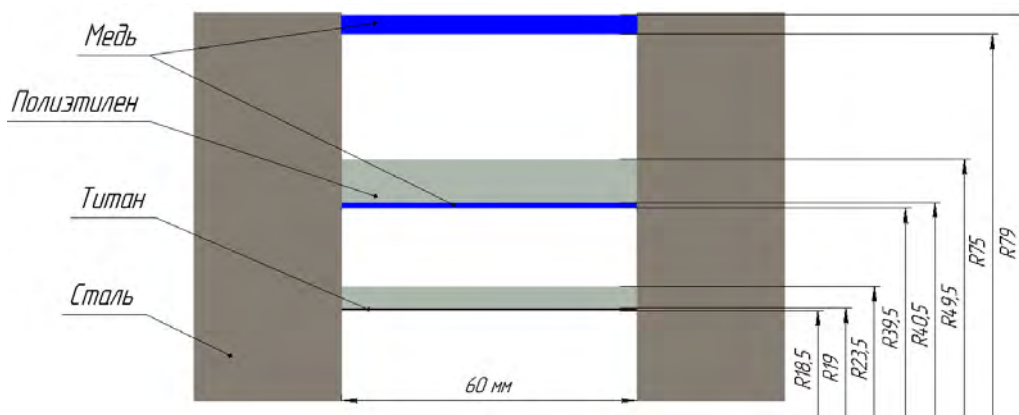


Рис. 4. Вид и параметры расчетной модели каскадной системы

Результаты расчётов движения лайнера (величина давления в зависимости от радиуса) были использованы при расчёте каскадной системы. Целью численного моделирования являлось определение симметрии полета и максимальных скоростей, приобретаемых тяжелыми оболочками каскадной системы, в результате ударного воздействия на систему каскадов цилиндрического медного лайнера, разгоняемого давлением магнитного поля ДВМГ.

На рис. 4 показаны параметры каскадной системы, использованные в одномерных расчётах. Подобранные параметры каскадной системы исключают возможность развития откольных явлений в тяжелой оболочке исследуемого титанового каскада. Результаты одномерных расчётов были использованы в двумерных, целью которых было определение области, не подверженной влиянию боковой разгрузки со сторон, ограниченных стальными стенками толщиной ~ 30 мм.

На рис. 5 показана форма лайнера при подлёте к системе каскадов. Лайнер разгонялся между двумя стальными стенками.

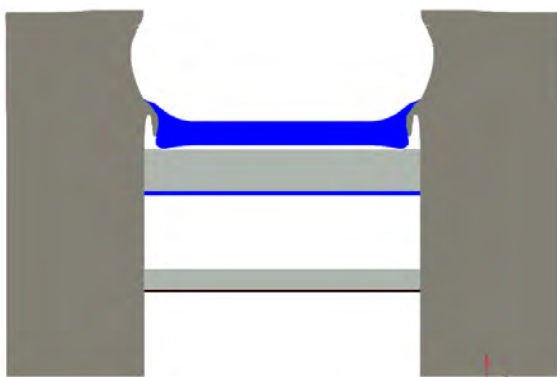


Рис. 5. Геометрия медного лайнера при подлёте к системе каскадов, 2D расчет для 15-элементного ДВМГ

Результаты двумерного расчёта скоростей тяжелых оболочек каскадной системы приведены в таблице.

Таблица

Максимальные скорости тяжёлых оболочек каскадной системы в 2D геометрии для 15-элементного ДВМГ

Каскад	Время, мкс	Скорость (max), км/с
Медный лайнер	25,3	6,3
Медный каскад	28	11
Титановый каскад при подлёте к R-1 см	28,9	17,8

На рис. 6 изображено положение оболочек каскадов в момент подлета к радиусу 10 мм. Из проведенного расчета определено, что область не подверженная влиянию боковой разгрузки составляет ~ 14 мм, в момент подлета к радиусу 10 мм толщина титановой оболочки составила 1 мм.

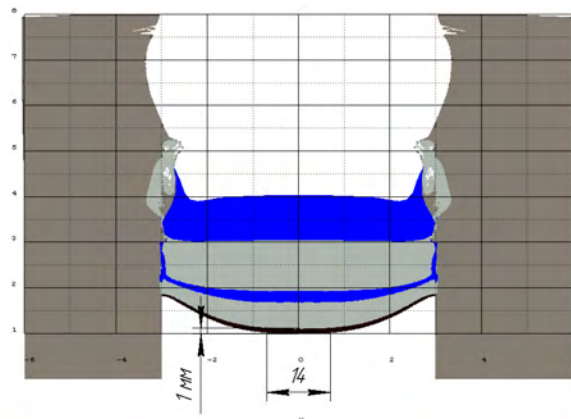


Рис. 6. Вид расчетной модели в момент $t = 28,88$ мкс, $r = 10$ мм

Результаты расчётов показали, что применение двухкаскадной системы с ДВМГ $\varnothing 400$ мм позволяет титановому лайнеру толщиной 1 мм на радиусе приёмника (10 мм) сообщить скорость ~ 18 км/с. Давление, производимое таким лайнером в мишени из титана – 600 ГПа примерно равно давлению, производимому лайнером из алюминия, имеющим скорость 20 км/с.

ДВМГ $\varnothing 1000$ мм и трёхкаскадная система

В настоящее время самым мощным и энергоёмким ДВМГ является ДВМГ $\varnothing 1000$ мм, который способен генерировать токи ~ 300 МА. Наибольший поток, который без проведения дополнительных исследований можно ввести в ДВМГ с помощью преусилителей составляет ~ 3 Вб. Индуктивность одной полости ДВМГ $\varnothing 1000$ мм равна 24 нГн. Для десятиэлементного ДВМГ с узлом отключения индуктивность составит 240–250 нГн, что позволяет запитать его током 12 МА.

Расчёты работы 10-элементного ДВМГ проведены с медным лайнером толщиной 6мм, расположенным на радиусе 139 мм в качестве нагрузки. Радиус расположения лайнера и его толщина выбраны путём проведения предварительных расчётов исходя из условий сохранения целостности лайнера и достижения максимальной скорости при подлёте к системе каскадов. Расчётная схема ДВМГ приведена на рис. 7.

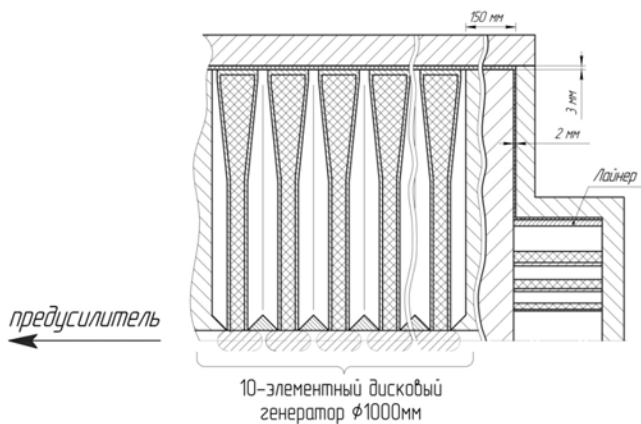


Рис. 7. Схема устройства для ускорения лайнера давлением магнитного поля при работе 10-элементного ДВМГ $\varnothing 1000$ мм

Конечный ток предварительной запитки ДВМГ – 12 МА. Расчет проведен в модели, аналогичной модели расчета разгона лайнера током ДВМГ-400.

На рис. 8 приведены ток и производная тока, полученные в расчете, а на рис. 9 – скорость внутренней границы лайнера с начальным радиусом 139мм в зависимости от радиуса.

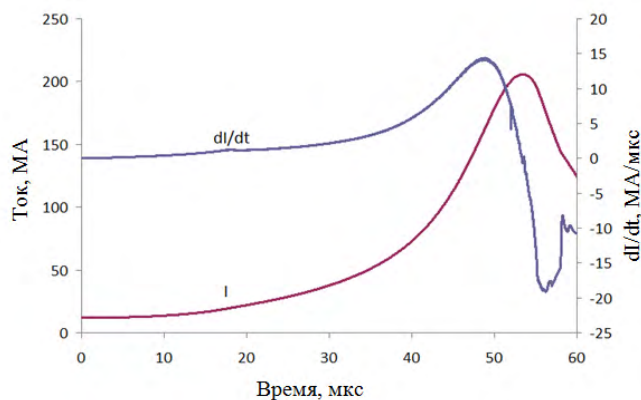


Рис. 8. Ток и производная тока в расчете для 10-элементного ДВМГ диаметром 1000

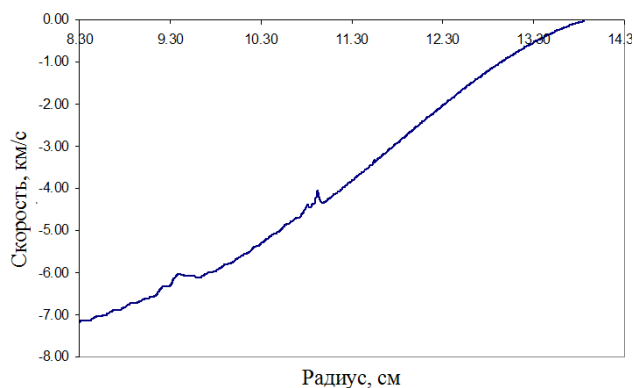


Рис. 9. Зависимость скорости внутренней границы лайнера от радиуса (для R 139 мм)

Схема системы каскадов приведена на рис. 10.

Результаты расчётов показали, что медная оболочка первого каскада в начале движения имеет скорость 13 км/с, а при подлёте ко второму приобретает скорость 20,3 км/с. Скорость тяжёлой медной оболочки второго каскада на радиусе приёма (20 мм) составляет 32,6 км/с, а скорость титановой оболочки третьего – внутреннего каскада на радиусе 10мм составляет 54,45 км/с при толщине ~1 мм. Давление в мишени из титана при её постановке на радиус 10мм при ударе составит ~4,95 ТПа.

Заключение

Для изучения уравнений состояния предложена модель, состоящая из ДВМГ, системы каскадов и мишени. Приведены результаты расчётов работы ДВМГ на индуктивную нагрузку переменной величины, включающую в себя массивный медный лайнер, а также представлены результаты двумерных расчетов по определению скорости лайнеров в системе каскадов. Расчёты проведены для разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ ДВМГ $\varnothing 400$ мм и ДВМГ $\varnothing 1000$ мм. Проведены расчёты

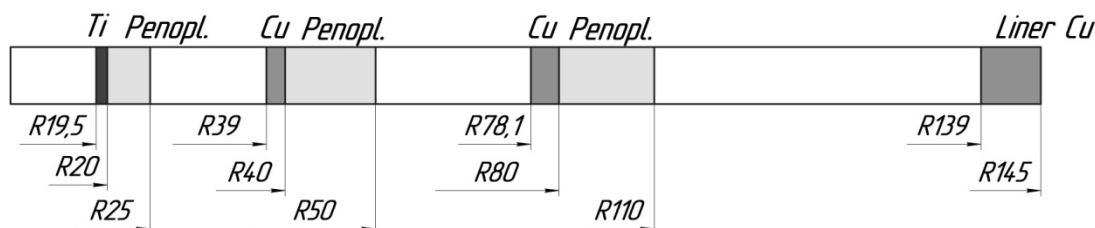


Рис. 10. Параметры модели четырехкаскадной системы

двухкаскадной системы для работы с ДВМГ $\varnothing 400$ мм и трёхкаскадной для работы с ДВМГ $\varnothing 1000$ мм. При подлёте к радиусу 10 мм расчётная скорость титанового лайнера толщиной 1 мм в двухкаскадной системе составляла ~ 18 км/с, а в трёхкаскадной – 54,45 км/с, что соответствует давлениям 600 ГПа и 4,95 ТПа.

Список литературы

1. Reinovsky R. E., Anderson B. G., Clark D. A. et al. HEL-1: a demg based demonstration of solid liner implosion at 100 MA / 11th IEEE international pulsed power conference // Baltimore, Maryland, USA, 1997.
2. Chernyshev V. K., Mokhov V. N., Buzin V. N. et al. Study of high – energy liner compression in HEL-1 experiment / 11th IEEE international pulsed power conference // Baltimore, Maryland, USA, 1997.
3. Clark D. A., Anderson B. G., Ekhdahl C. A. et al. High energy imploding liner experiment HEL-1: experimental results / 11th IEEE international pulsed power conference // Baltimore, Maryland, USA, 1997.
4. Попов Н. А., Щербаков В. А., Минеев В. Н., Зайдель Р. М., Фунтиков А. И. О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда (проблема газодинамического термоядерного синтеза), УФН. Т. 178, № 10. С. 1087–1094.
5. Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И., Якубов В. Б. Методика численного расчета дисковых взрывамагнитных генераторов / Тр. 7-ой Международной конф. По генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Саров, 5–10 августа 1996.
6. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчёт взрывающихся проводников // ЖТФ. Т. 46, №. 9. 1976. С. 1963–1969.