



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Новое поколение дисковых ВМГ

(дисковые ВМГ среднего класса)

А.А. Зименков, А.В. Ивановский, В.Б. Куделькин, В.И. Мамышев,
К.С. Торопов, Е.В. Шаповалов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188, Саров, Россия

Введение

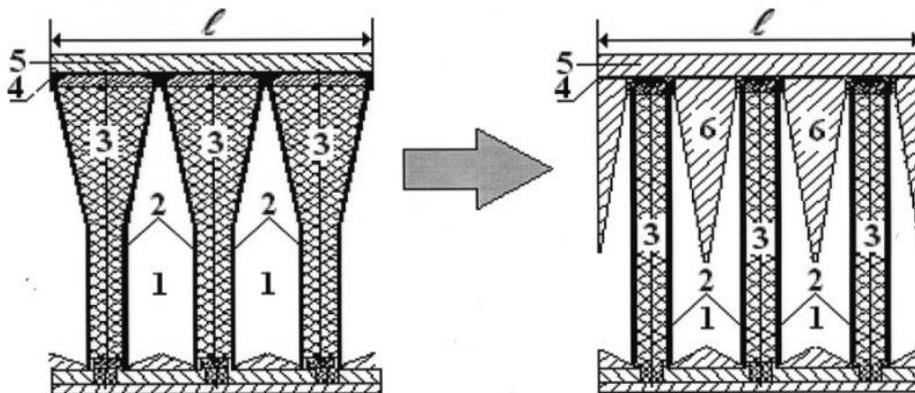


ДВМГ предложены В.К. Чернышевым в 1961 году. Исследования 1970-1980-х годов завершились созданием ДВМГ семейства «ПОТОК» с зарядами ВВ диаметром 250, 400 и 1000 мм¹.

Опыт двадцатилетней эксплуатации позволил В.К. Чернышеву и В.В. Вахрушеву сформулировать дальнейшие пути развития конструкции ДВМГ².

Для упрощения конструкции и увеличения доли энергии ВВ, передаваемой в магнитное поле, предложено перейти от профилированных к плоским дисковым элементам.

Близкий к экспоненциальному закону вывод индуктивности при этом обеспечивается размещением в полостях сжатия металлических вставок.



- 1.- полости сжатия;
- 2.- медные диски;
- 3.- заряды ВВ;
- 4.- волновая линия;
- 5.- обратный токопровод;
- 6.- металлические вставки.

¹ Чернышев В.К., Протасов М.С., Шевцов В.А. и др. //ВАНТ. Серия Математическое моделирование физических процессов. 1992.№4. С.33-41.

² Чернышев В.К., Вахрушев В.В., Мамышев В.И. Труды международной семинара. Гидродинамика высоких плотностей энергии/Под редакцией Г.А. Швецова. Новосибирск. 2004. С.224-228.

Активные работы по реализации предложенной концепции были начаты во втором десятилетии нынешнего столетия с создания ДВМГ малого класса (диаметром 250 мм).

В результате к 2020 году был создан ДВМГ малого класса³:

- с долей энергии ВВ, передаваемой в магнитное поле $\approx 18\%$, более чем в два раза превышающей ранее реализуемую в ДВМГ с профилированными дисками ($\approx 8\%$);
- простота и технологичность конструкции позволила удешевить и сократить время подготовки экспериментов в 2-3 раза.

Последние 4 года генератор успешно применяется для получения прецизионных данных (погрешность $\leq 1\%$) по сжимаемости материалов. Опыт эксплуатации показал возможности:

- имплозии цилиндрического Al лайнера-ударника током ~ 40 МА до скорости в месте размещения мишеней ($r = 1$ см) ~ 9 км/с, ударное давление в тяжелых материалах до ~ 3 Мбар;
- динамического изэнтропического сжатия двухслойного Al-Cu лайнера с диагностируемыми данными по сжатию меди давлением до ~ 3 Мбар.

Дальнейшее расширение диапазона давлений проводимых исследований при ударном и изэнтропическом сжатии веществ потребовало разработки ДВМГ среднего класса ($\varnothing 400$ мм)

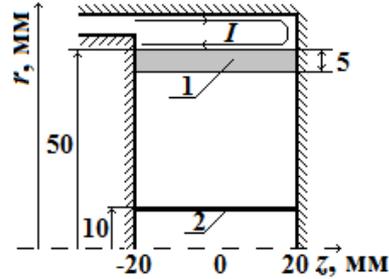
³ П.В.Дудай, А.А.Зименков, А.В.Ивановский и др. «Дисковые взрывомагнитные генераторы нового поколения», Доклады РАН, Физика. Технические науки. 2021. Т.498. С.7-10

2. Перспективы экспериментов по исследованию сжатия веществ

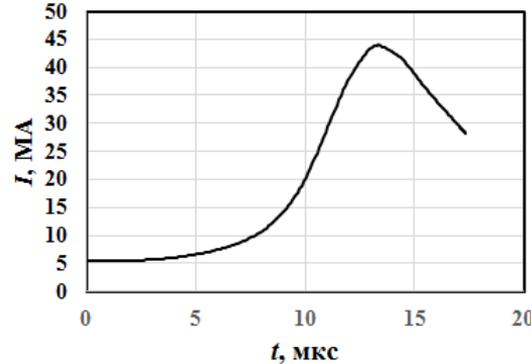
2.1 Ударное сжатие

Схема опытов

ДВМГ
Ø250мм



Зависимости тока от времени



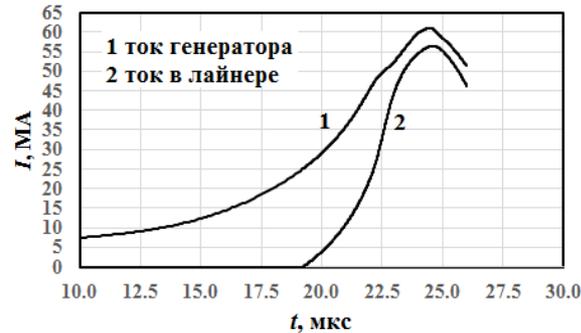
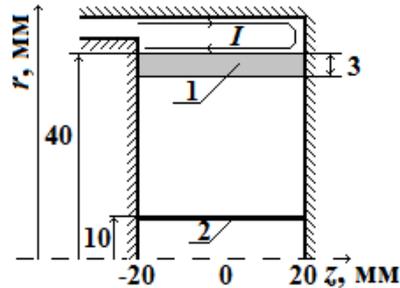
Ток запитки $I_0=5.5$ МА.

Индуктивность подвода энергии $L_0=10$ нГн.

Скорость в момент удара по МИБ $V=9.7$ км/с.

Ударное давление в тяжелом материале ~ 3 Мбар.

ДВМГ
Ø400мм



Ток запитки $I_0=6$ МА.

Используется ДВМГ с ФЭРТ и разрядником на $V_{br}=40$ кВ.

Индуктивность до ФЭРТ - 15 нГн, после ФЭРТ - 10 нГн.

Скорость в момент удара по МИБ $V=18$ км/с.

Ударное давление в тяжелом материале ~ 10 Мбар.

Перспектива - диапазон исследований ударной сжимаемости при переходе от ДВМГØ250мм к ДВМГØ400мм расширится с 3 Мбар до 10 Мбар, а скорости с 9 км/с до 18 км/с.



2.2 Динамическое изэнтропическое сжатие

Лайнер, состоящий из токонесущего Al и исследуемого Cu слоев, разгоняется током ДВМГ- $I(t)$. Толщина Al слоя подбирается такой, чтобы магнитное поле не проникало в медный образец.

Расчетные зависимости

Схема опытов

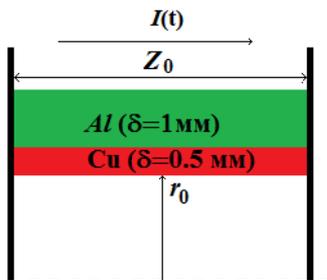
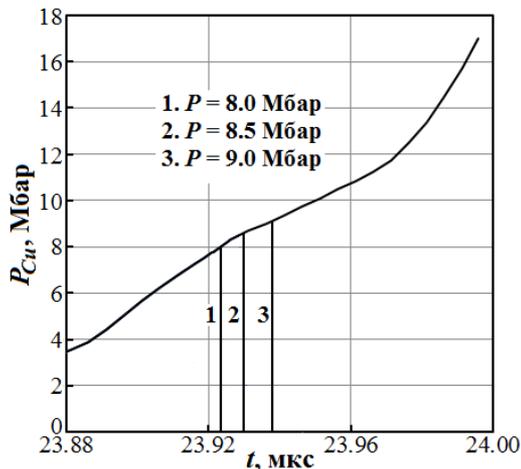
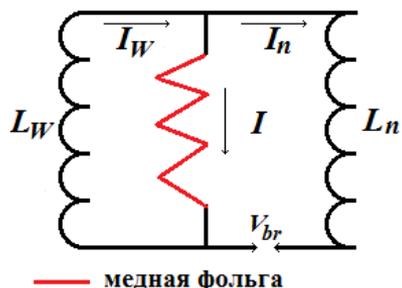
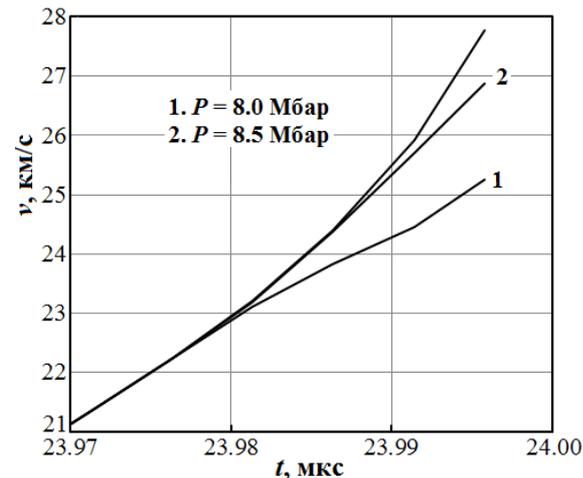


Схема подвода тока от ДВМГ



Зависимости тестовых давлений от времени

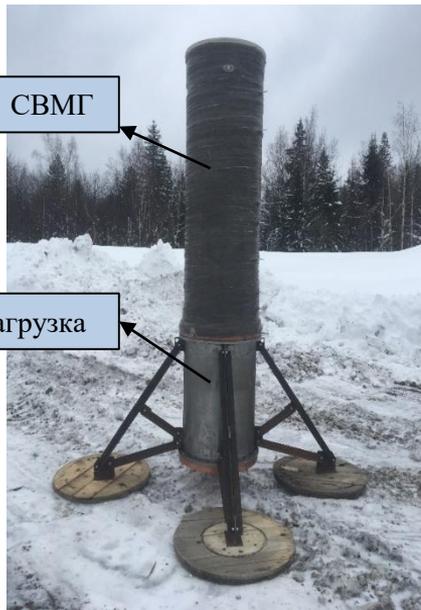


Соответствующие скорости свободной поверхности

Перспектива - ДВМГ $\varnothing 400$ мм расширит диапазон исследований при изэнтропическом сжатии: - в случае меди с 3 до 8.5 Мбар; - в случае тяжелых материалов до 11 Мбар.

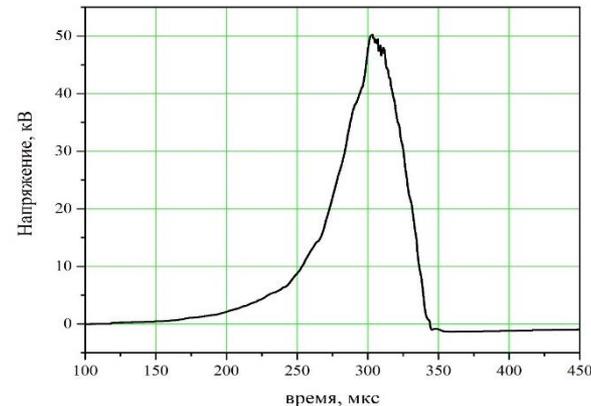
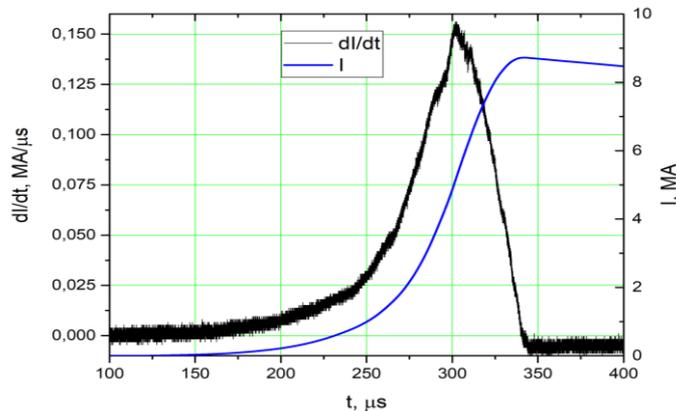
3. Экспериментальная проверка ключевых элементов

3.1 Проверка работоспособности предусилителя энергии на базе спирального ВМГ Ø 600мм



Экспериментальное устройство состояло из СВМГ Ø 600мм и «жесткой» эквивалентной нагрузки индуктивностью - 340 нГн.

Экспериментальные результаты измерений



Внешний вид экспериментального устройства на рабочем поле

Экспериментальные кривые – производная тока (черная) и ток (синяя)

Напряжение на выходе СВМГ

Выводы: Результаты эксперимента подтвердили работоспособность предусилителя на базе СВМГ Ø 600мм. Предусилитель обеспечил в индуктивной нагрузке $L=340$ нГн импульс тока амплитудой 8,7 МА с интегралом действия тока (при достижении 6,0 МА) $0,59e^9 A^2c$.

3.2 Экспериментальная проверка динамики тарелей дискового элемента

Для тестирования методики расчетов и выбора параметров ВВ разработан измерительный блок, позволяющий фиксировать положения отдельных точек тарели дискового элемента в процессе движения

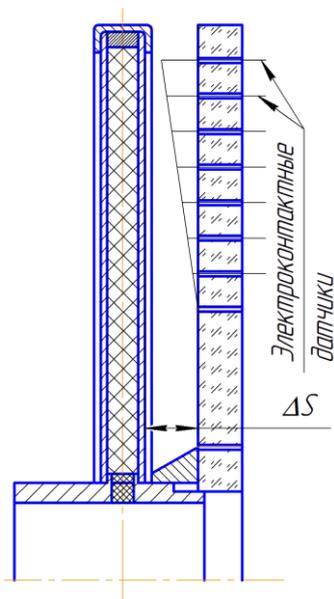
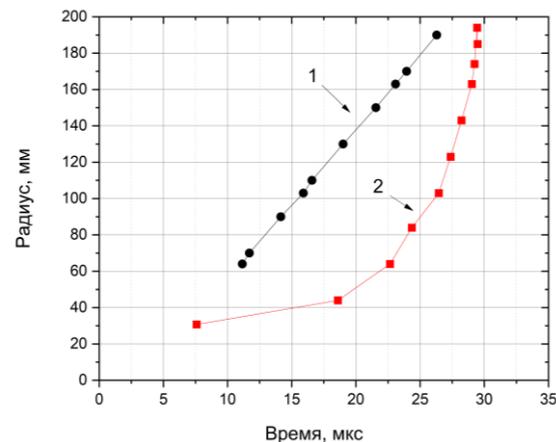


Схема установки измерительного блока

Экспериментальные результаты измерений



- 1 – Экспериментальная зависимость радиуса детонационной волны от времени
- 2 – Экспериментальная зависимость радиуса точки контакта тарели от времени

1. На основании экспериментальных данных (кривая 1) определена фактическая скорость детонации ВВ ($V=8,34\text{км/с}$) и проведено тестирование двумерного газодинамического расчета.
2. Экспериментальная зависимость радиуса точки контакта от времени (кривая 2) позволила подобрать параметры УРС ВВ и продуктов взрыва для получения в расчетах экспериментального результата и моделирования работы ДВМГ при ненулевых токах.

3.3 Результаты испытания масштабной модели (5 элементов) ДВМГ \varnothing 400 мм

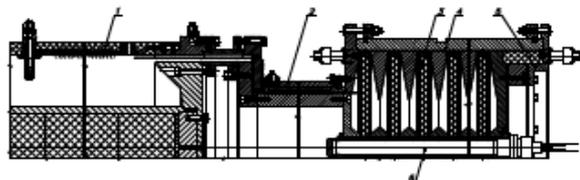
Источник тока на базе
ДВМГ \varnothing 400 мм (5 элементов)



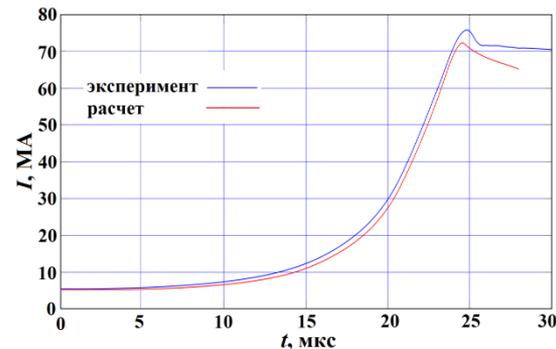
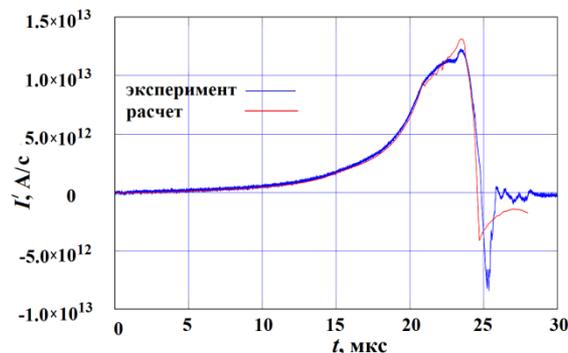
В эксперименте:

- СВМГ обеспечил ток запитки 5.3 МА в контуре ДВМГ (63.3 нГн);
- в нагрузке 3.3 нГн зарегистрирован ток 76 МА;
- усиление тока составило - 14.3 раза;
- коэффициент сохранения потока - 0.75;
- Эффективность преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля – 0.58 МДж/кг.

Экспериментальные данные согласуются с расчетным моделированием работы модельного образца ДВМГ – 400.

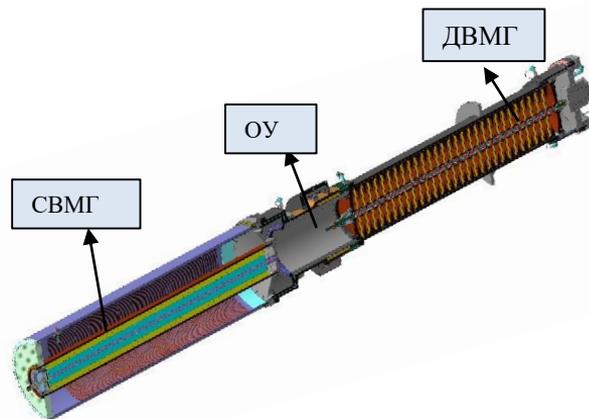
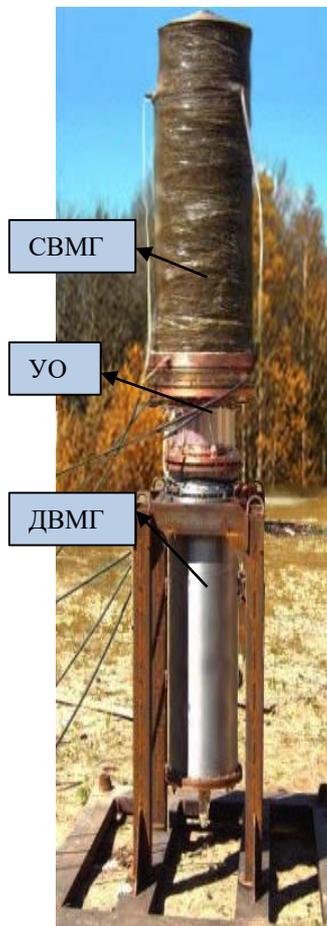


1. - СВМГ диаметром 400 мм, 2. - узел отключения,
3. - ДВМГ, 4.- система изоляторов, 5. - нагрузка с индуктивными датчиками, 6. - узел инициирования
Схема экспериментального устройства



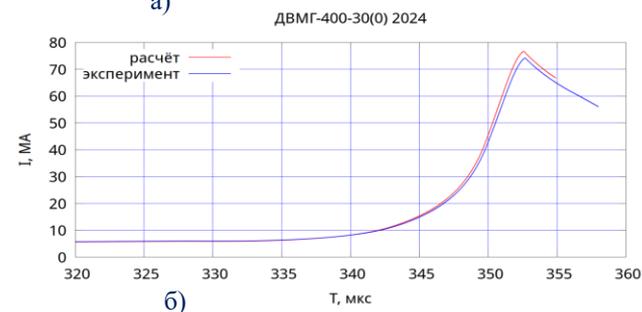
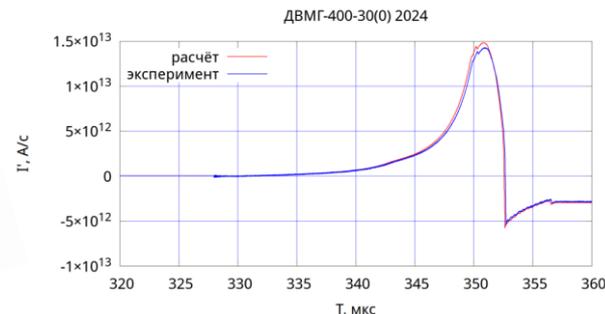
Зависимости от времени: а) производная тока; б) ток

3.4 Результаты испытания опытного образца ДВМГ Ø 400 мм (30 дисковых элементов)



Конструктивная схема экспериментального устройства

Результаты эксперимента



Экспериментальные и расчетные зависимости от времени: а) производная тока; б) ток

Выводы: При начальном токе запитки ДВМГ 5,6 МА в индуктивной нагрузке 10 нГн дисковый генератор сформировал импульс тока амплитудой 75 МА с характерным фронтом нарастания 7,0 мкс. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетным моделированием.

Заключение

При одинаковом начальном токе ДВМГ среднего класса эффективно работает на индуктивную нагрузку в 1.6 раз большую, чем ДВМГ малого класса. Он создает:

- в 2.5 раз больший поток магнитного поля;
- в 4 раза большую энергию магнитного поля;
- в 1.6 раз больший ток.

При работе с ФЭРТ на одинаковую индуктивную нагрузку ДВМГ среднего класса при незначительном увеличении тока обеспечивает вдвое большую, чем ДВМГ малого класса, скорость его нарастания.

Создание ДВМГ среднего класса позволит расширить по давлению диапазон проводимых исследований как ударного, так и изэнтропического сжатия веществ с ~ 3 Мбар до ~ 11 Мбар.

Проведены успешные испытания СВМГ диаметром 600 мм для создания начального потока в 30 элементном генераторе, масштабной модели ДВМГ среднего класса в составе 5 дисковых элементов, а также опытного образца 30-ти элементного ДВМГ \varnothing 400 мм .



Благодарность

Авторы выражают огромную благодарность всем сотрудникам, внесшим вклад в подготовку и проведение экспериментов, результаты которых представлены в докладе.

Спасибо за внимание