



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Новое поколение дисковых ВМГ

(дисковые ВМГ малого класса)

**А.А. Зименков, А.В. Ивановский, В.Б. Куделькин,
В.И. Мамышев, С.М. Полюшко, З.С. Цибилов, Е.В. Шаповалов**

ВВЕДЕНИЕ



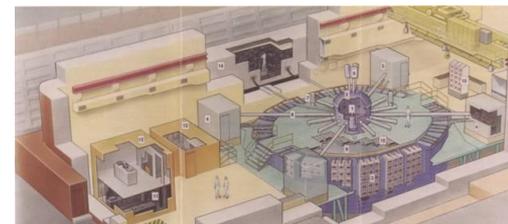
В США получили развитие электрофизические установки на базе ёмкостных накопителей энергии.

В 2001 году на полигоне штата Невада введена в эксплуатацию установка АТЛАС, созданная в ЛАНЛ для проведения гидродинамических исследований. Ток в нагрузке с амплитудой ~ 22 МА реализовывался за ~ 5 мкс.

Эксплуатация показала, что большой интеграл действия тока $\int_0^t I^2(t') \cdot dt'$ деформирует волновые линии и после 4-5 импульсов необратимо разрушает. АТЛАС был выведен из эксплуатации и законсервирован.

В 1996 году в СНЛ на установке Z получен впечатляющий результат – при имплозии Z пинча током 17 МА за время 120 нс энергия в импульсе МРИ составила ~2 МДж при длительности ~ 5 нс.

В 2007 году после увеличения энергии КБ в ~2 раза, тока до ~ 24 МА опыты с генерацией МРИ прекращены. При повторении опыта необратимо разрушалась изоляция волновых линий. В настоящее время исследуются свойства веществ при воздействии длинных (300-500 нс) импульсов тока.



Установка АТЛАС,
полигон штата Невада



Установка Z, СНЛ

За четверть века прогресса в создании многоазовых электрофизических установок на ёмкостных накопителях энергии не наблюдается.

В СССР и России развивались взрывомагнитные генераторы (ВМГ), созданные на основе идеи магнитной кумуляции, высказанной А.Д. Сахаровым в 1951 году.

К 90-м годам было предложено и испытано десяток конструкций ВМГ, отличающихся формой деформируемого контура и условиями работы. Наиболее надёжными, стабильными и простыми в изготовлении оказались спиральные и дисковые ВМГ (СВМГ и ДВМГ).

В 90-х годах началось длительное (25 летнее) взаимовыгодное сотрудничество ВНИИЭФ-ЛАНЛ, основой которого являлись российские ВМГ.

В результате этого сотрудничества сформулированы:

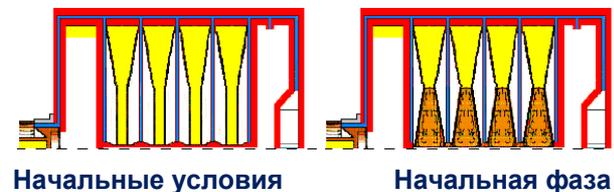
- идеология и направления исследований с применением электрофизических установок;
- Американской стороной, после консервации АТЛАСа, перспективы развития – «ДВМГ в Америке»;
- Российской стороной направления совершенствования ДВМГ – увеличение эффективности преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля, упрощение и удешевление конструкции, режим с коротким импульсом тока вплоть до 100 нс.

Ниже изложены результаты совершенствования ДВМГ за 10 лет, приведшие к созданию нового поколения ДВМГ, а именно:

1. Направления совершенствования ДВМГ;
2. Режимы функционирования ДВМГ малого класса.



Дисковые ВМГ



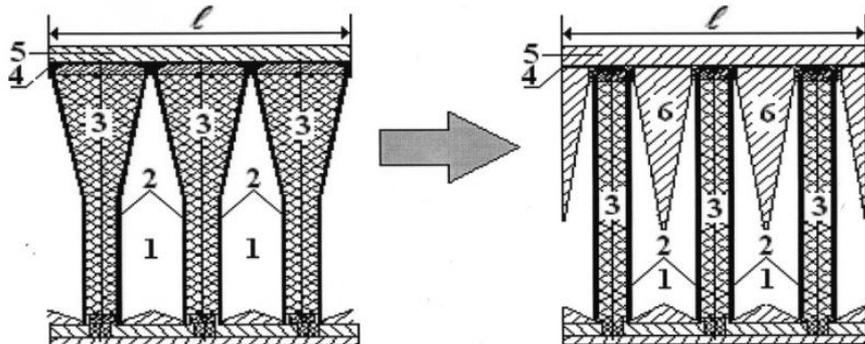
1. Направления совершенствования дисковых ВМГ (ДВМГ)



1.1 Переход от профилированных дисковых элементов к плоским

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

Близкий к экспоненциальному 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.



Внешний вид 30-модульного ДВМГ

В результате:

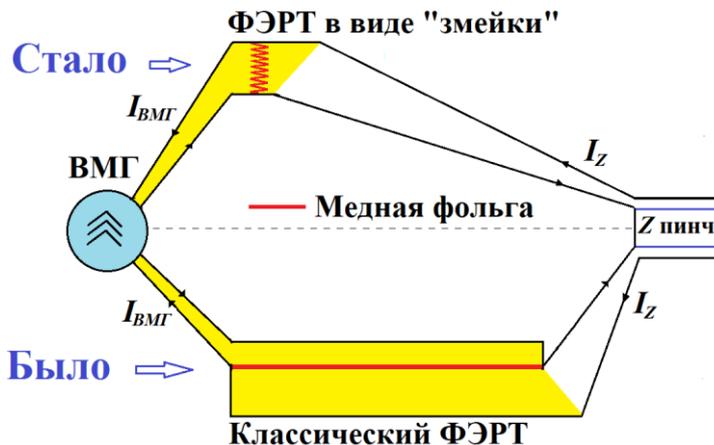
- доля энергии ВВ, передаваемая в магнитное поле $\approx 18\%$, более чем в два раза превышает ранее реализуемую в ДВМГ ($\approx 8\%$);
- простота и технологичность конструкции позволила удешевить и сократить время подготовки экспериментов в 2-3 раза.

1.2 Низкоиндуктивная система формирования импульсов тока



Реализована схема формирования тока ДВМГ на базе фольгового электровзрывного размыкателя тока (ФЭРТ) в виде «змейки», обеспечивающая рост напряжения без существенного увеличения индуктивности подвода энергии к нагрузке ¹.

Это достигается компактным укладыванием фольги с сохранением ее общей длины, необходимой для генерации высокого напряжения ².



При количестве звеньев «змейки» n индуктивность ФЭРТ уменьшается в $\sim 2n$ раз при той же толщине изолятора

1. 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

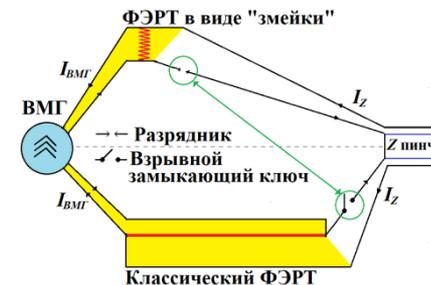
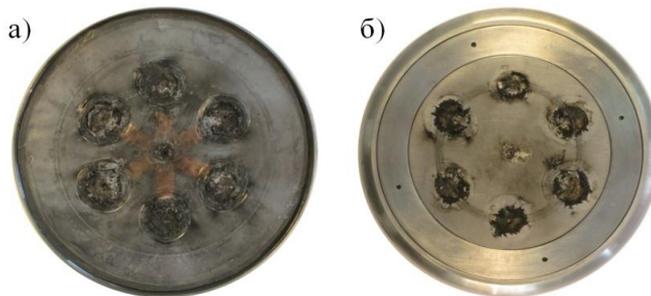
2. V.K. Chernyshev, A.I. Kucherov, A.I. Mezhevov, V.V. Vakhrushev. Electroexplosive Foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research, In: Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, 1997. P.1208-1212.

1.3 Создание многоканальной системы коммутации тока



Применение ФЭРТ в виде «змейки» совместно с создаваемым многоканальным неуправляемым разрядником позволяет сократить время подвода импульса тока к нагрузке вплоть до 100 нс.

Фотографии высоковольтной части разрядника (а) и заземляемого электрода (б) после эксперимента³



Так в опыте со спиральным ВМГ в нагрузке с индуктивностью $L_n \sim 10$ нГн зарегистрирован ток ~ 5 МА за время ~ 110 нс⁴. На рисунках представлены:



Внешний вид экспериментального устройства



Зависимости от времени токов в цепи источника и нагрузки.

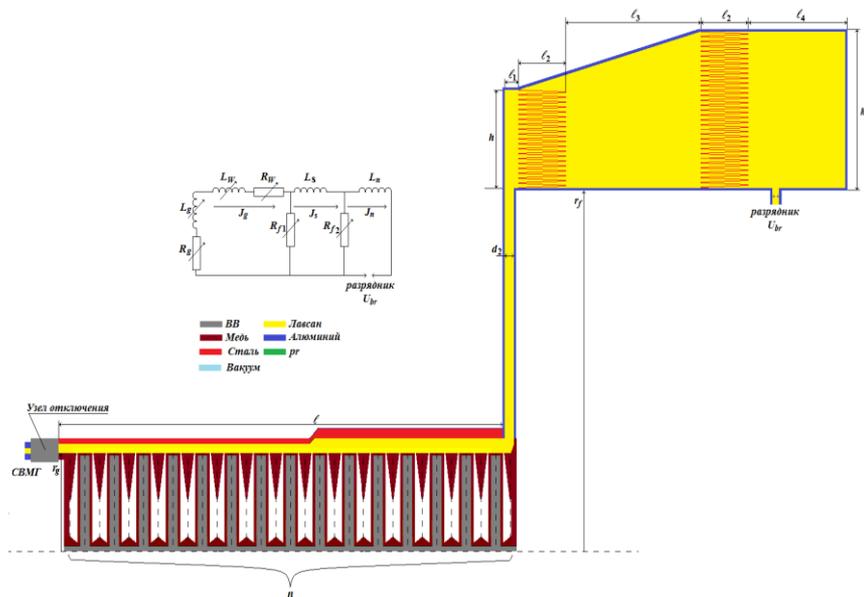
3. Е.А. Галанова, Ю.Н. Долин, А.В. Ивановский, А.Е. Калинычев, Г.В. Карпов, С.С. Ломтев, А.Г. Мерзлов, В.Н. Нудиков, Д.С. Прохоров, Е.А. Салатов, А.Н. Туров, А.А. Шаталин «Многоканальный неуправляемый разрядник нового типа для наносекундной коммутации мегаамперных токов» Доклады РАН. Физика, Технические науки, 2022, Т. 506, С. 41-46.

4. А.А. Базанов, С.Г. Гаранин, А.В. Ивановский и др., «Источник мегаамперного тока с временем нарастания ~ 100 нс на базе взрывомагнитных генераторов» ДАН. 2019. Т.489. № 4. С. 355–357

2. Режимы функционирования ДВМГ малого класса

На рисунках представлены:

Общая схема эксперимента



Внешний вид экспериментального стенда:

а) – до опыта; б) – после опыта.



Параметры экспериментального устройства:

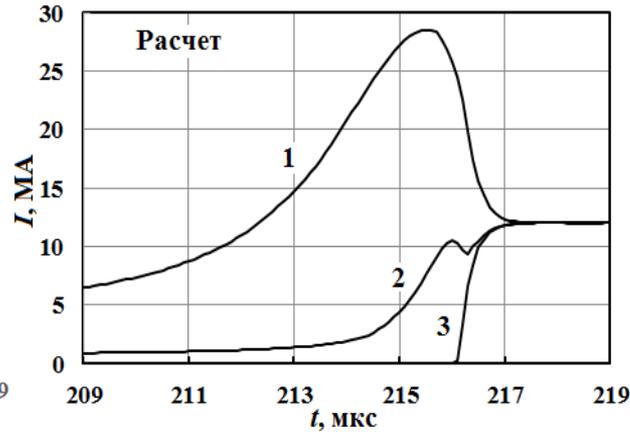
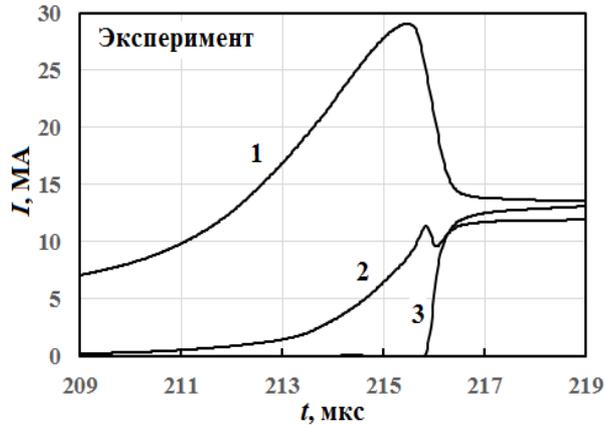
Индуктивность контуров: ДВМГ – 16,2 нГн, накопительного – 15 нГн; нагрузки – 12,2 нГн.

Параметры фольг: первый каскад – длина 1250 мм, толщина 30 мкм, ширина 3400 мм;

второй каскад – длина 1600 мм, толщина 10 мкм, ширина 3400 мм.

Нагрузка подключалась через разрядник с пробойным напряжением 300 кВ.

Результаты эксперимента и соответствующие расчеты представлены на рисунках



Кривая 1 – ток в контуре ДВМГ,

Кривая 2 – ток в контуре накопления,

Кривая 3 – ток в нагрузке

Ток 10 МА реализован за время 350 нс.

В опыте потеряно ~ 20 % магнитного потока вследствие пробоя в контуре ДВМГ.

В дальнейшем за счет упрочнения изоляции контура ДВМГ, увеличения напряжения пробоя разрядника до 600 кВ и уменьшения индуктивности нагрузки до 10 нГн будет реализован ток в 10 МА за время ~ 100 нс (аналог установки *Julong*, Китай).

При работе ДВМГ возможно реализовать:

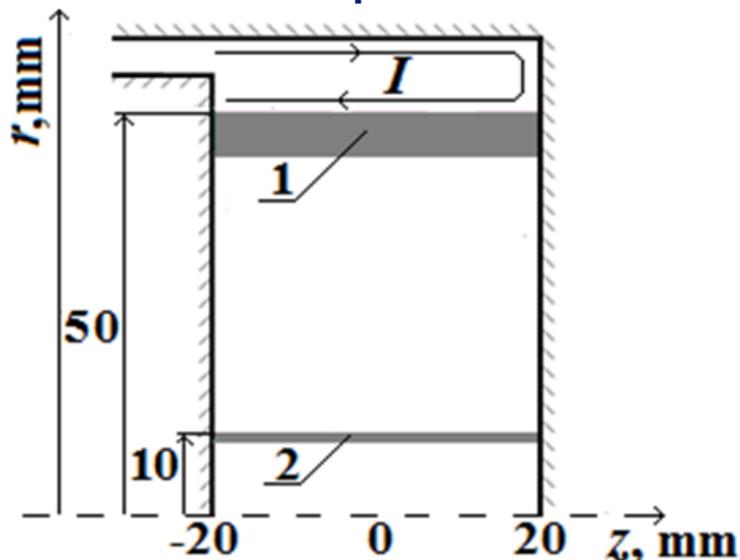
- без ФЭРТ (кривая 1) - лайнер для получения прецизионных данных по ударному сжатию вещества (аналог легкогазовых пушек);
- при одном каскаде обострения (кривая 2) - динамическое изэнтропическое сжатие вещества;
- с двумя каскадами обострения (кривая 3) – Z-пинч с генерацией мягкого рентгеновского излучения.

2.1 Ударная сжимаемость веществ

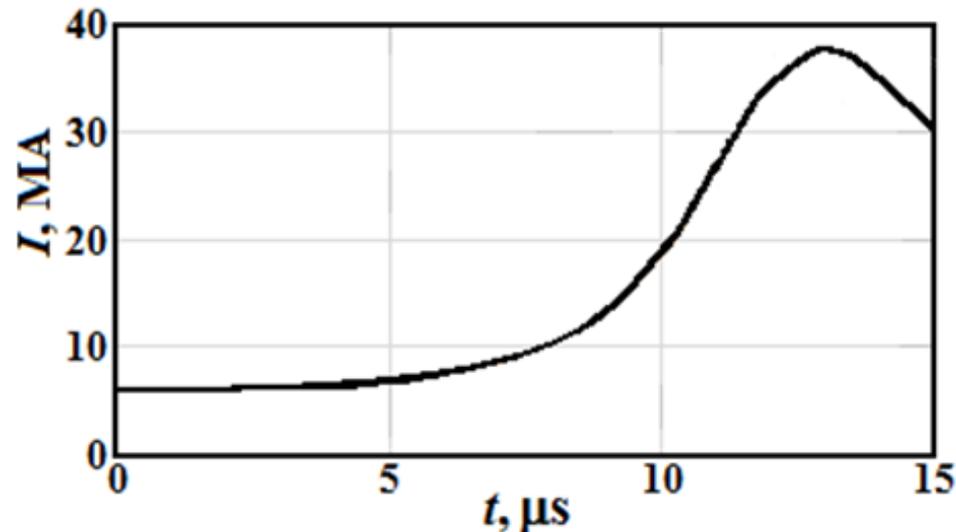
Исследование качества лайнера-ударника

На рисунках представлены:

Схема эксперимента



Зависимость тока в лайнере от времени



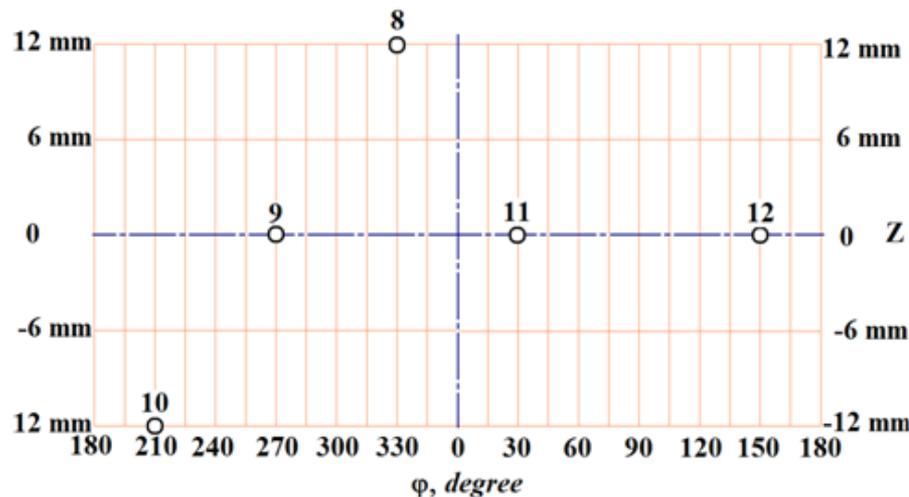
- 1-лайнер-ударник из Al толщиной 5 мм;
- 2-мишенный измерительный блок (МИБ)

Скорости движения лайнера в момент удара по корпусу МИБ измерялась методикой PDV с относительной погрешностью $\leq \pm 0,4 \%$.



На рисунке представлена развертка на плоскости положений датчиков методики PDV.

В Таблице приведены зарегистрированные скорости лайнера в момент удара по корпусу МИБ



Из Таблицы видно, что скорости движения концов лайнера (точки 8 и 10) в момент удара по внешней поверхности колец на ~ 100 м/с больше, чем в средней части.

Средняя скорость по $n = 5$ точкам составила **7.97 км/с.**

Среднеквадратичное отклонение составило ± 0.06 км/с.

Относительное среднеквадратичное отклонение составило $\pm 0.7\%$.

№ точки регистрации	8	9	10	11	12
Скорость, км/с	8.02	7.93	8.05	7.93	7.93

Создан прецизионный ударник с отклонением по скорости $\leq 1\%$ на площади ~ 15 см² для одновременного нагружения образцов в опытах по исследованию ударного сжатия веществ.

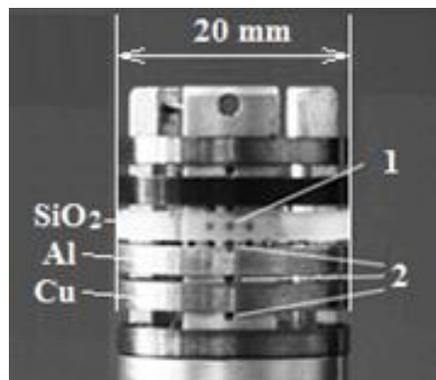
Исследование ударной сжимаемости материалов

Исследовался УРС кварцевого стекла. Образец и эталоны из Al и Cu выполнены в виде колец с внешним радиусом 10 мм, толщиной 0.5 мм и шириной 2.4 мм. При токе 32.5 МА скорость лайнера в момент удара по образцам составила 6.87 км/с ($\pm 0.5\%$).

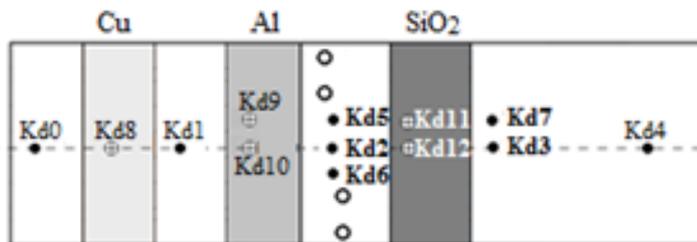
На рисунках представлены:

Внешний вид мишенного блока

Развертка на плоскости положения контактных датчиков (КД)



1- КД на внутренней поверхности кольца из кварцевого стекла, 2- КД для определения момента удара лайнера.



- - внешние КД,
- ⊕ - внутренние КД,
- - отверстия для зондирующих лучей

Точность определения времен прихода лайнера на внешнюю и УВ на тыльную поверхности образцов ~ 0.1 нс позволила измерить скорость УВ в кварцевом стекле - $D=8.00$ км/с ($\pm 0.3\%$) при массовой скорости $u=4.02$ км/с ($\pm 0.5\%$).

При давлении $P = 0,723$ Мбар ($\pm 0,8 \%$) сжатие кварцевого стекла составило $\delta = 2.01 \pm 0.6 \%$. Оцененная точность подтверждается измерениями сжатия эталонов из Al и Cu.

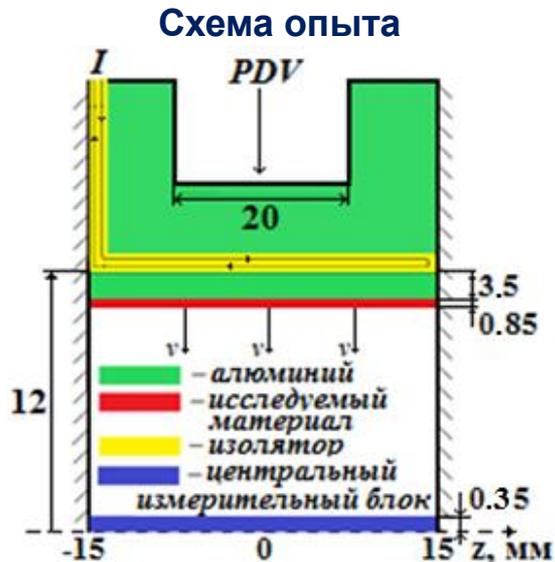
При достижимой скорости лайнера ~ 10 км/с тяжелые материалы сжимаются давлением ~ 3 Мбар.

2.2 Динамическая изэнтропическая сжимаемость веществ

- Лайнер, состоящий из токонесущего AL и исследуемого Cu слоев, разгоняется током ДВМГ. Разнотолщинность лайнера составляет ≤ 1 мкм. Магнитное поле не проникает в слой Cu.
- Зависимость тока от времени измеряется индуктивными датчиками, Фарадеевской методикой и восстанавливается по измерениям методикой PDV скорости обратного токопровода.
- Сжатие Cu от давления восстанавливается по скорости внутренней поверхности лайнера. Центральный измерительный блок (ЦИБ) регистрирует скорость вплоть до радиуса ~ 0.35 мм.

На рисунках представлены:

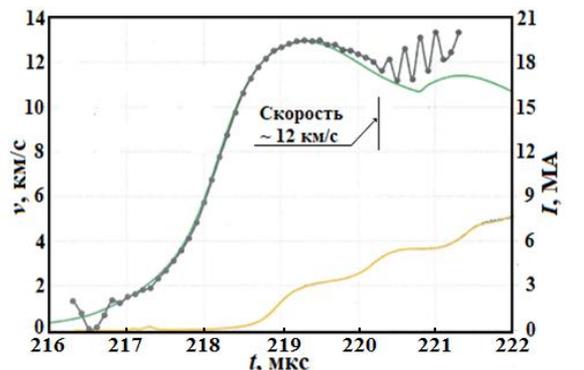
Фотография многоканального (по 6 каналов в двух плоскостях) оптоволоконного измерителя скорости движения



На рисунках представлены измеренные в опыте:

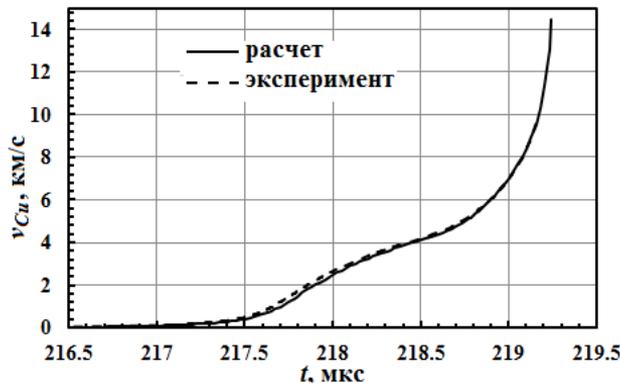


Зависимость тока от времени



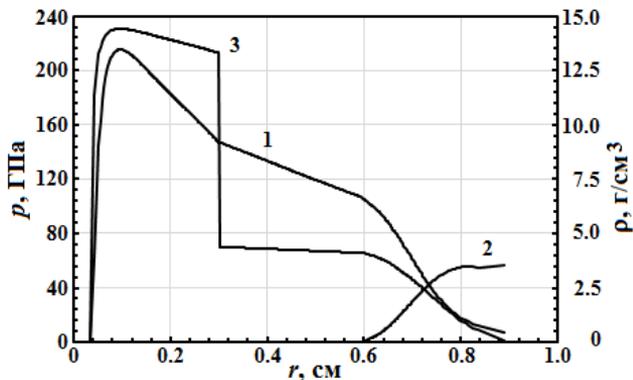
— скорость обратного токопровода; — восстановленный ток; — индуктивные датчики

Зависимости скорости внутренней поверхности лайнера от времени (расчет и эксперимент)

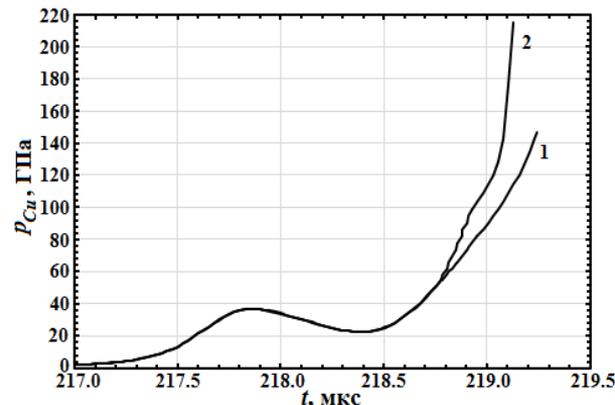


Измерения скорости при $r < 0.58$ мм (> 12 км/с) были потеряны.

Расчетные зависимости



Гидродинамического – 1 и магнитного - 2 давлений, плотности - 3 от радиуса при максимальном сжатии.



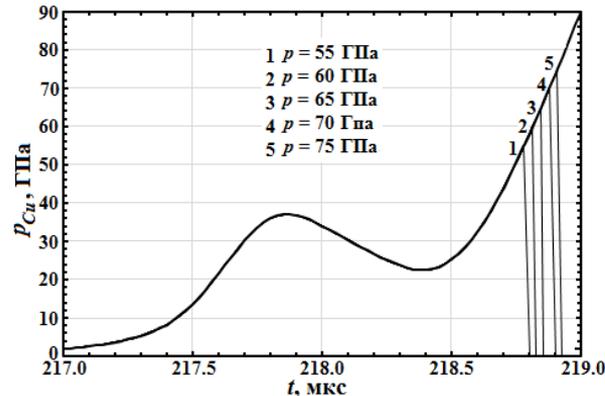
Давлений от времени на границе раздела Cu – Al - 1 и максимального в меди – 2.

Предельное давление в исследуемом образце, к которому чувствительна скорость поверхности. Измеряемая скорость внутренней поверхности оценивается следующим образом.

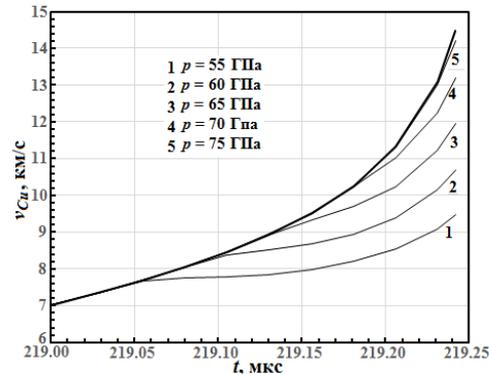
Решая уравнения магнитной гидродинамики с известными из эксперимента током ищем давление $p_{Cu}(t)$ на границе «AL - Cu» и скорость внутренней поверхности лайнера $v_{Cu}(t)$.

Далее, решая уравнения гидродинамики в области Cu с давлением на границе, получаемым обнулением $p_{Cu}(t)$ при некотором значении p . Из сравнения расчетной скорости границы с $v_{Cu}(t)$ определяется чувствительность скорости к давлению в образце.

Из сравнения приведенных рисунков видно, что скорость чувствительна к давлению ≤ 70 ГПа (кривые 4).



Зависимости давления от времени на границе раздела Al-Cu



Зависимости скорости свободной поверхности лайнера от времени

По зарегистрированной в опыте скорости ≤ 12 км/с удалось восстановить кривую сжатия Cu при давлениях ≤ 70 ГПа.

2.3 Генерация мягкого рентгеновского излучения

Для термоядерного зажигания путем сжатия непрямым облучением мягким рентгеновским излучением (РИ) Z-пинча необходим подвод к мишени энергии при высокой температуре излучения. Двухпинчевый вакуумный хольраум в оптимальных условиях обеспечивает подвод $\eta \approx 15\%$ генерируемой каждым пинчем энергии при температуре излучения⁵

$$T_r \approx A \cdot E^{1/4},$$

где E – энергия РИ за время ≤ 5 нс, $A = 22 \cdot \text{эВ/кДж}^{1/4}$.

Генерация РИ за время ≤ 5 нс достигается при времени имплозии (длительности тока) ≤ 100 нс.

Создаваемая каждым Z-пинчем высотой 1 см энергия РИ определяется величиной тока I^5

$$E [\text{кДж}] \approx 1.5 \cdot I^2 [\text{МА}].$$

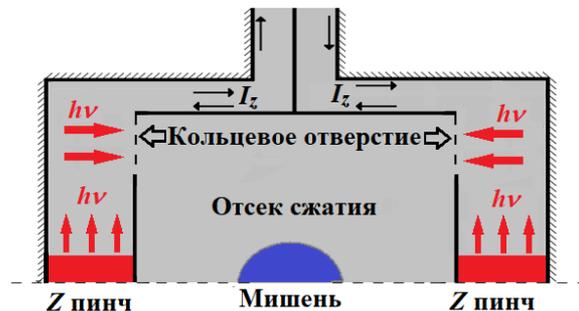


Схема передачи излучения
Z-пинча к мишени

ДВМГ малого класса при токе $I = 10$ МА за время 100 нс обеспечивает $E \approx 0.15$ МДж, температуру $T_r \approx 90$ эВ.

Для термоядерного зажигания необходимы:
ток $I \approx 65$ МА; энергия $E \approx 10$ МДж; температура $T_r \approx 240$ эВ.

⁵ Garanin S.G., Ivanovsky A.V., Mkhitarayan L.S. «An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator», Nuclear Fusion. 2011. V.51. N.10. P.103010-103024

Заключение

Создан ДВМГ малого класса нового поколения, в котором:

- профилированные дисковые элементы заменены на плоские;
- классический ФРТ заменен на ФРТ в виде «змейки»;
- взрывной узел подключения к нагрузке заменен на неуправляемый разрядник.

Модернизация позволила:

- более, чем в два раза, увеличить эффективность преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля;
- увеличить напряжение подвода энергии к нагрузке без существенного увеличения ее индуктивности;
- сократить время подвода импульса тока к нагрузке вплоть до 100 нс.

Созданный генератор работает в трех режимах. Он не уступает:

- лучшим образцам легкогазовых пушек при работе без ФРТ в экспериментах по прецизионному исследованию ударного сжатия веществ (скорость 8-10 км/с, давление до 3 Мбар);
- установке Z (США) в экспериментах по прецизионным исследованиям динамического изэнтронического сжатия веществ (давление до 3 Мбар);
- установке JULONG (Китай) при имплозии многопроволочныхборок с генерацией рентгеновского излучения (ток ~ 10 МА, температура излучения до 90 эВ).

Реализация ДВМГ среднего класса (2027 г.) позволит проводить прецизионные исследования сжимаемости веществ при давлениях до 10 Мбар и температурах излучения до 120 эВ.

Хотелось бы выразить благодарность сотрудникам РФЯЦ-ВНИИЭФ:

института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) А.Г. Голубинскому, В.К. Баранову, Д.А. Иреничеву, И.А. Чугрову и др. за создание прецизионных измерителей скорости на основе лазерной методики PDV;

института теоретической и математической физики (ИТМФ) В.А. Карепову, А.М. Буйко, С.Ф. Гаранину, С.Д. Кузнецову и др. за создание численных методик восстановления сжимаемости веществ по зарегистрированным скоростям.

Без этих работ оценка возможностей созданных ДВМГ была бы невозможна.

Спасибо
за
ВНИМАНИЕ