

# ВОЗМОЖНОСТИ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ

*А. А. Базанов, В. К. Баранов, А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, А. Г. Голубинский, П. В. Дудай,  
А. В. Ивановский, В. А. Карепов, С. Д. Кузнецов, В. И. Мамышев, Е. В. Шаповалов*

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

В [1] представлен метод исследования изоэнтропической сжимаемости веществ. Двухслойный лайнер, изготовленный из изучаемого образца, и внешней токонесящей алюминиевой трубки, ускоряется током установки Z. Другой алюминиевый лайнер служит анодом. Итерационный метод требует измерений скоростей внутренней поверхности образца и внешней поверхности анода, что с использованием магнитогидродинамического моделирования и математической оптимизации позволяет получить ток, давление и плотность образца. Достигнуто сжатие меди давлением ~1000 ГПа. Точности определения давления – 5,7 %, плотности – 1,8 %. В работе анализируются возможности дисковых взрывомагнитных генераторов для проведения аналогичных исследований.

## Введение

На мощных электрофизических установках проводится широкий комплекс исследований по изучению свойств материалов при ударном и безударном нагружении. Одним из интересных направлений исследований является получение изоэнтропического сжатия веществ при сверхвысоких давлениях.

Применение магнитного поля для сжатия веществ по сравнению с применением взрывчатки, легкогазовых пушек и др. имеет такие преимущества, как возможности получать в исследуемых веществах изоэнтропические давления мегабарного диапазона, регулировать их величины и время нарастания при практически мгновенном (со скоростью света) выравнивании магнитного поля. Используются цилиндрические или плоские, как правило, двухслойные системы, состоящие из слоя исследуемого вещества и прилегающего к нему слоя металла, на внешнюю поверхность которого действует магнитное поле.

Исследования изоэнтропического сжатия металлов под действием давления магнитного поля проводятся на разных электрофизических установках. Отметим здесь некоторые из них.

Эксперименты ВНИИЭФ на взрывомагнитных генераторах типа МК-1, в которых однородное магнитное поле до 6 МГс (магнитное давление до ~1,4 Мбар) действует на цилиндрическую оболочку, сжимающую исследуемый материал. Основная

диагностика – рентгенография максимально сжатой системы. Первые такие эксперименты [2] по сжатию металлических стержней из алюминия и титана позволили оценить полученные изоэнтропические давления в этих металлах до 5–6 Мбар, что в ~4 раза больше магнитного давления. Впервые была показана эффективность использования магнитного давления для цилиндрического сжатия металлов.

Первые эксперименты [3] на установке Z по сжатию двухслойных тонких (менее 1 мм) пластин токами до 20 МА, нараставшими за 100 нс. Основная диагностика – VISAR-измерение скорости свободной поверхности пластины из исследуемого материала (скорости ~1,5 км/с). Получены данные по изоэнтропическому сжатию железа до 0,3 Мбар (под действием магнитного давления такой же величины).

Аналогичные [3] эксперименты предполагалось провести в Лос-Аламосской национальной лаборатории на установке Atlas, снабдив ее, по предложению и расчетам ВНИИЭФ [4], цилиндрическим фольговым размыкателем тока. Это обеспечивало необходимое сокращение времени нарастания тока в нагрузке до 27 МА до 0,7 мкс. Под действием такого тока (магнитного поля более 5 МГс), можно получать изоэнтропические сжатия железа до давлений 1 Мбар.

В статье [1] представлена новая методика получения изэнтропических давлений в зависимости от плотности в твердых металлах, сжимаемых

лайнером, ускоряемым магнитным полем на установке Z. Лайнер состоит из внутренней и внешней металлической трубок (рис. 1).

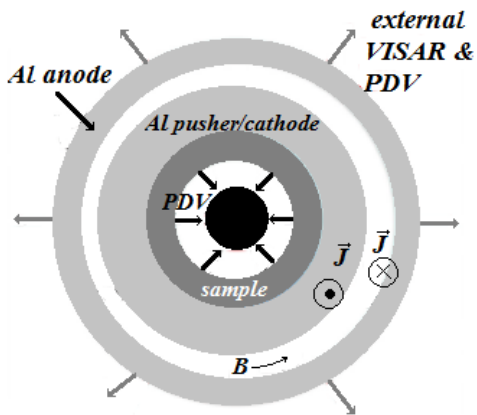


Рис. 1. Схема экспериментов работы [1]

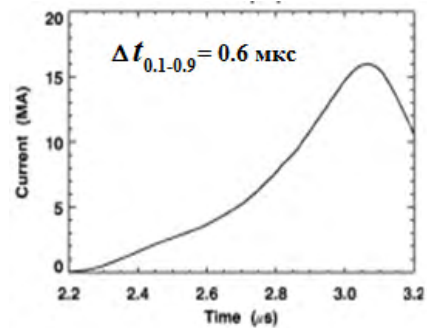
Во внутренней трубке находится образец из исследуемого материала. Внешняя трубка из алюминия служит токонесущим катодом. Другой алюминиевый лайнер на значительно большем радиусе служит анодом. Токковый импульс изоэнтропически сжимает образец. Итерационный метод, применяемый для определения соотношения между давлением и плотностью, требует двух измерений скорости. Датчики PDV регистрируют скорость имплозии свободной (внутренней) поверхности материала образца и скорость разлета свободной (внешней) поверхности анода. Эти скорости в сочетании с магнитогиродинамическим моделированием и математической оптимизацией используются для получения тока и для выводов о давлении и плотности в образце. Представлены результаты экспериментов с лайнерами из Al/Ta, Al/Cu, и Al. Во всех случаях достигается симметричное схлопывание лайнера с изоэнтропическим сжатием до давления в  $\sim 10$  Мбар.

В настоящем докладе рассматриваются перспективы реализации исследования изоэнтропического сжатия методом работы [1] с применением дисковых взрывомангнитных генераторов (ДВМГ) ВНИИЭФ.

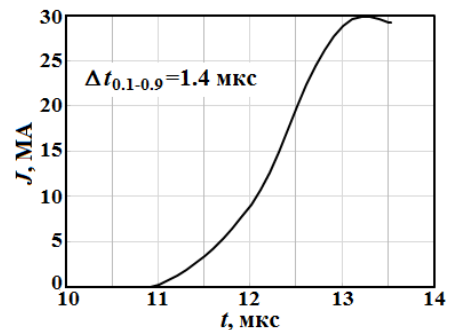
### Параметры масштабирования

На рис. 2 представлены зависимости токов от времени для установки Z [1], 30 – элементного ДВМГ малого класса (ДВМГ  $\varnothing 250$  мм) с фольговым размыкателем тока и 30 – элементного ДВМГ среднего класса (ДВМГ  $\varnothing 400$  мм) с фольговым размыкателем тока. Видно, что амплитуды импульсов тока для ДВМГ малого класса примерно

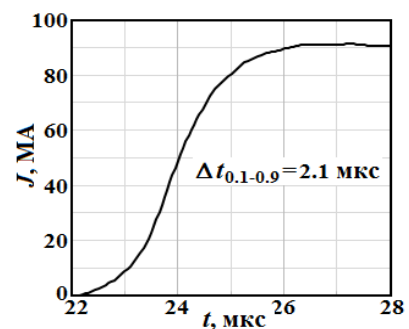
в 2 раза, а для ДВМГ среднего класса – в 6 раз превышают реализованные в опытах на установке Z. При этом времена нарастания тока соответственно в  $\sim 2,5$  раза и в  $\sim 3,5$  раза выше, чем на установке Z. В соответствии с этим, для сохранения масштабных параметров при работе с ДВМГ необходимо увеличить линейные размеры лайнеров (как толщину, так и высоту).



а



б



в

Рис. 2. Зависимости токов от времени: установка Z – а); ДВМГ малого класса – б); ДВМГ среднего класса – в)

Выбранные для проведения расчетов линейные размеры лайнера приведены в табл. 1. Для сравнения там же представлены масштабы лайнерной системы, использованной в экспериментах на установке Z.

Таблица 1  
Линейные размеры двухслойных лайнеров  
для экспериментов с ДВМГ

Al - толкатель			
	Установка Z	ДВМГ малого класса	ДВМГ среднего класса
Внешний радиус	3,43 мм	10,29 мм	18,15 мм
Толщина	1,0 мм	3,0 мм	6,0 мм
Cu - образец			
Толщина	0,53 мм	1,59 мм	2,65 мм
Высота	10,0 мм	27,5 мм	40 мм

В настоящее время наши технические возможности позволяют изготавливать коллиматоры методики PDV с внешним диаметром  $\varnothing 0,5$  мм (в опытах на установке Z –  $\varnothing 0,125$  мм). Это обеспечивает регистрацию схождения цилиндрической оболочки вплоть до радиуса 1 мм (на установке Z – до радиуса 0,35 мм). Возможности аппаратуры позволяют напрямую регистрировать движение исследуемых объектов со скоростью до  $\sim 20$  км/с с точность не хуже 0,3 % (в опытах на установке Z погрешность регистрации скорости составляет  $\sim 0,1$  %). При этом большие линейные размеры исследуемых образцов позволяют надеяться на точность определения зависимости сжимаемости от давления не хуже достигаемой на установке Z: по сжатию 1,8 %; по давлению 5,7 %.

### Расчетная модель

Схема экспериментального устройства представлена на рис. 3 [5–8]. Оно состоит из ДВМГ и гофрированного фольгового размыкателя тока (ГФРТ). Начальный магнитный поток (ток) в контуре ДВМГ – ГФРТ создается спиральным ВМГ. В момент времени достижения максимума тока (6,5 МА как для ДВМГ малого, так и среднего класса) срабатывает взрывной узел отключения тока. Одновременно происходит осевое иници-

рование зарядов ВВ дисковых элементов. В результате распространения вверх волны детонации происходит схлопывание соседних дисков и вытеснение магнитного потока в волновую линию. Возрастание тока приводит к разогреву фольги ГФРТ. В результате электровзрыва фольги ее сопротивление возрастает (примерно на порядок) и магнитный поток перебрасывается к нагрузке через радиальную волновую линию.

Начальная индуктивность полостей сжатия ДВМГ малого класса составляет  $\sim 180$  нГн, ДВМГ среднего класса – 360 нГн. Параметры медной фольги ГФРТ подбирались в расчетах из условия оптимального согласования электрического контура ДВМГ с нагрузкой. Они составили: для ДВМГ малого класса – толщина 110 мкм, длина 0,4 м, ширина 1,26 м; для ДВМГ среднего класса – толщина 200 мкм, длина 0.6 м, ширина 204 м.

Основные процессы, которые учитывались в расчетах:

- двумерный газодинамический расчет параметров ВВ и продуктов взрыва;
- расчет смещения дисков под действием давления продуктов взрыва и магнитного поля;
- расчет потерь магнитного потока в токовом контуре;
- расширение передающей линии под действием давления магнитного поля.

Расчеты гофрированного размыкателя тока, разгона лайнера и смещение обратного токопровода проведены в одномерном магнитогидродинамическом приближении, без учета теплопроводности.

### Результаты расчетов

На рис. 4 представлены полученные в расчетах профили плотности  $\rho(r)$ , давлений – гидродинамического  $P(r)$  и магнитного поля  $H^2/8\pi(r)$  для ДВМГ малого и среднего класса на момент максимального схождения лайнерных систем к оси. Отметим, что на этот момент времени величины

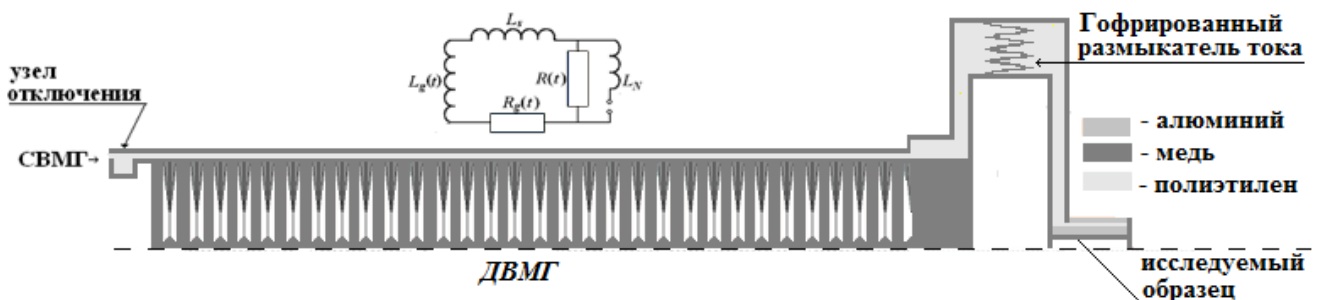


Рис. 3. Схема экспериментального устройства на базе ДВМГ

плотности и гидродинамического давления достигают максимальных значений. При этом величины скорости внутренних поверхностей исследуемых образцов (Cu) составляют: для ДВМГ малого класса 13 км/с; для ДВМГ среднего класса 29 км/с.

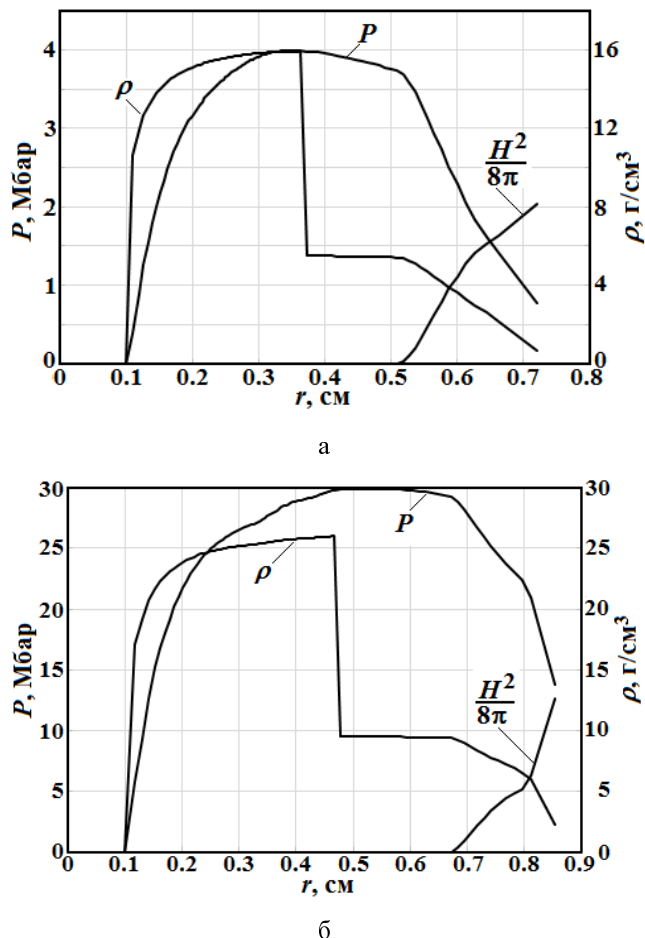


Рис. 4. Расчетные профили плотности  $\rho$  и давлений – гидродинамического  $P$  и магнитного поля  $H^2/8\pi$ : для ДВМГ малого класса – а); для ДВМГ среднего класса – б)

Достижимые гидродинамические давления:

– для ДВМГ малого класса – 4 Мбар, вдвое превышают давление магнитного поля на момент схлопывания;

– для ДВМГ среднего класса – 30 Мбар, в  $\sim 2,5$  раз превышают давление магнитного поля на момент схлопывания.

### Заключение

Рассмотрены возможности ДВМГ для прецизионных исследований уравнений состояния при изоэнтропическом сжатии цилиндрической оболочки, ускоряемой магнитным полем с диагностической скорости поверхностей методикой PDV. На

радиусе внутренней поверхности исследуемых образцов 1 мм удается достичь с применением ДВМГ малого класса давлений  $\sim 4$  Мбар, с применением ДВМГ среднего класса давлений  $\sim 30$  Мбар. Дальнейшее расширение диапазона исследуемых давлений возможно с применением сверхмощных ДВМГ диаметром 1 м.

### Список литературы

1. Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G. et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // Journal of Applied Physics, 2016. 119, 015904.

2. Павловский А. И., Быков А. И., Долотенко М. И., Егоров Н. И. и Спиринов Г. М. Исследование уравнения состояния веществ методом изэнтропического сжатия давлением магнитного поля // Труды международной конференции MG-V. Новосибирск, 1989. С. 155–161.

3. Asay J. R. Isentropic compression experiments on the Z accelerator // Proc. CAPS-SCCM. Snowbird, Utah. 1999. P. 261–266.

4. Buyko A. M., Ivanova G. G., Morozova I. V., Sofronov V. N., Yakubov V. B. On feasibility to use electrically exploded opening switch on capacitor bank ATLAS // Proc. IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich, Ed. Sarov, VNIIEF, 2004. P. 414–419.

5. Чернышев В. К., Вахрушев В. В., Гриневич Б. Е., Егорычев Б. Т., Демидов В. А. Быстродействующий дисковый взрывомагнитный генератор с плоскими дисками // МЕГАГАУСС-6, 1992. г. Альбукерк, США.

6. Chernyshev V. K., Vakhrushev V. V., Spagin V. I., Kudelkin V. B. Small Class ( $\varnothing 250$  mm) Disk EMG Testing Results / The 28<sup>th</sup> IEEE International Conference on Plasma Science and The 13<sup>th</sup> IEEE International Pulse Power Conference // Las Vegas, USA, 2001. P. 971–973.

7. Ивановский А. В., Чернышев В. К., Вахрушев В. В. и др. 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 / VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии, Саров, 2006. С. 563–566.

8. Chernyshev V. K., Kucherov A. I., Mezhevov A. I., Vakhrushev V. V. Electroexplosive Foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research / 11<sup>th</sup> IEEE Int. Pulsed Power Conf. // Baltimore, Maryland, USA, 1997. P. 1208–1212.