



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Исследования динамического изэнтропического сжатия материалов с применением дисковых взрывомагнитных генераторов малого класса

В.К. Баранов, А.М. Буйко, С.Ф. Гаранин, А.М. Глыбин, А.Г. Голубинский,
П.Н. Гуськов, А.А. Зименков, А.В. Ивановский, Д.А. Ириничев, В.А. Карепов,
К.Н. Климушкин, В.Б. Куделькин, С.Д. Кузнецов, В.И. Мамышев,
С.М. Полюшко, З.С. Цибилов, Е.В. Шаповалов

Содержание

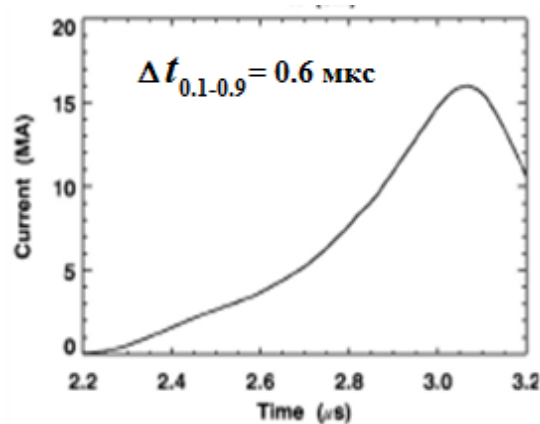
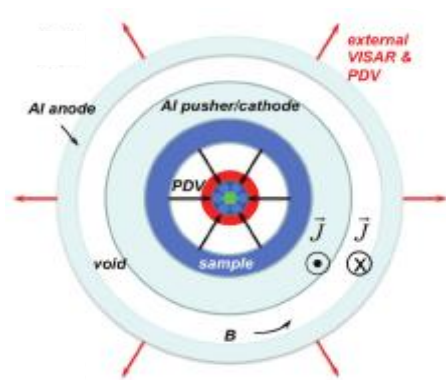


РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

1	Схема экспериментов	3
2	Анализ результатов экспериментов на Z	4
3	Диагностика	5
4	Первый эксперимент	6
5	Второй эксперимент	9
6	Перспективы ДВМГ малого класса	12
	Заключение	14

1. Схема экспериментов

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 119, 015904 (2016).



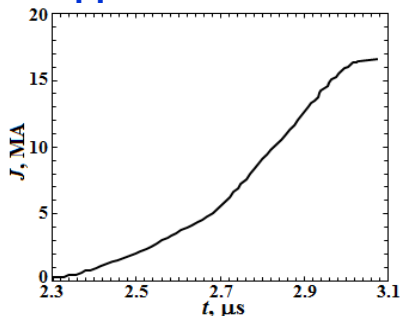
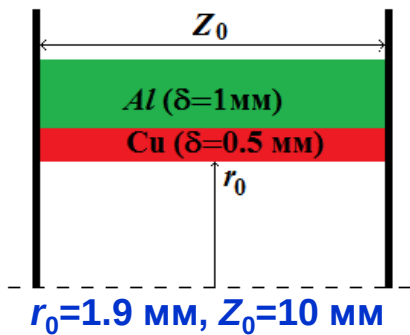
Радиус Al толкателя – 3.43 мм, толщина – 1 мм. Толщина Cu образца – 0.53 мм, высота – 10 мм. Радиусы поверхностей составного лайнера имеют точность ± 5 мкм, шероховатости поверхностей ~ 300 нм.

Внешний радиус ЦИБ – 0.35 мм. Диаметр датчиков PDV – 0.125 мм. Коммерчески доступными являются коллиматоры с $\varnothing 0,5$ мм.

Достижимые $P \sim 10$ Мбар, $V \sim 17$ км/с. Максимальная неопределенность в давлении (плотности) - 5,7% (1,8%) при погрешности определения скорости 0.1%.

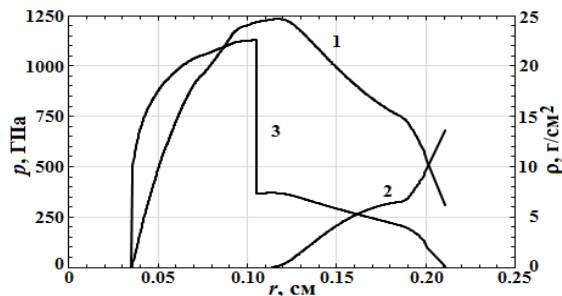
2. Анализ результатов экспериментов на Z

Исходные данные



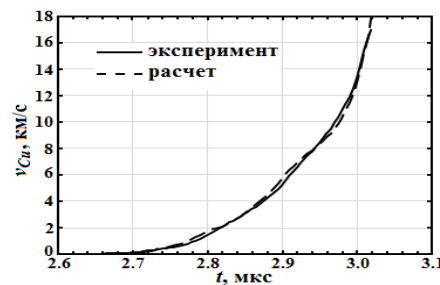
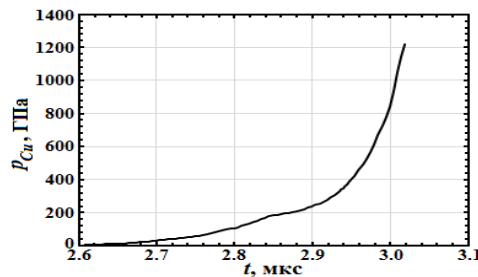
Зависимость тока
от времени

Расчеты



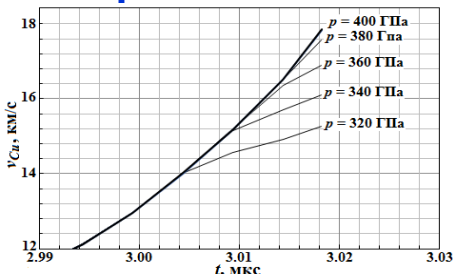
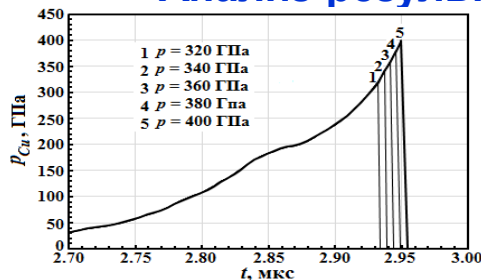
1. Гидродинамическое давление
2. Давление магнитного поля
3. Плотность

Профили давления, плотности



Зависимости давления на образце и скорости внутренней поверхности от времени

Анализ результатов расчетов



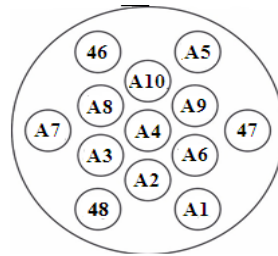
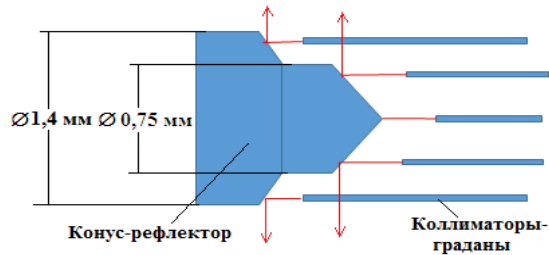
➤ Максимальное давление на границе раздела Cu-Al 1250 ГПа, однако скорость свободной границы чувствительна к давлению ≤ 380 ГПа.

Авторами работы отмечено более мягкое, чем ожидалось, поведение меди при давлениях ≥ 500 ГПа.

3. Диагностика

(Внешний радиус ЦИБ – 0.35 мм. Диаметр датчиков PDV – 0.125 мм. Коммерчески доступны коллиматоры с $\varnothing$ 0,5 мм)

Многоканальный оптоволоконный приемник (МОП) разработан на базе коллиматоров-граданов диаметром 0,125 мм, изготавливаемых собственными силами в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ.



Эскиз и фотография многоканального (по 6 каналов в двух плоскостях) оптоволоконного измерителя скорости движения

Сборка МОП производится в специальной оснастке.

Оптические волокна, на концах которых находятся коллиматоры-граданы и конический рефлектор, подводятся к определенной точке пространства с помощью трех координатного механического стола. Цена деления его механических подвижек составляет 10 мкм.

Наблюдение за сборкой осуществляется через цифровую камеру с трансфокатором.

4. Первый эксперимент



Цель опыта – исследование изэнтропической сжимаемости эталона - меди.

- Лайнер, состоящий из токонесущего AL и исследуемого Cu слоев, разгоняется током ДВМГ.
- 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. Уникальный центральный измерительный блок (ЦИБ) регистрирует скорость вплоть до радиуса $\sim 0,35$ мм.

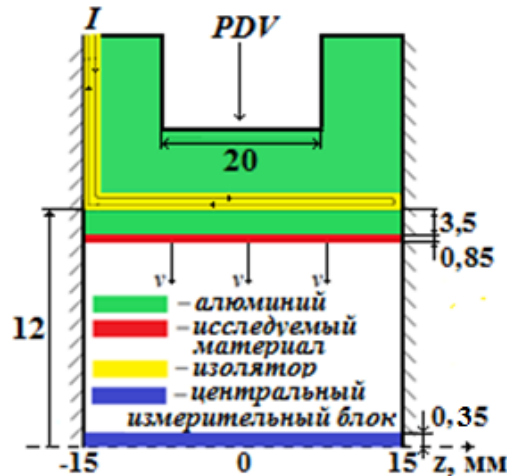


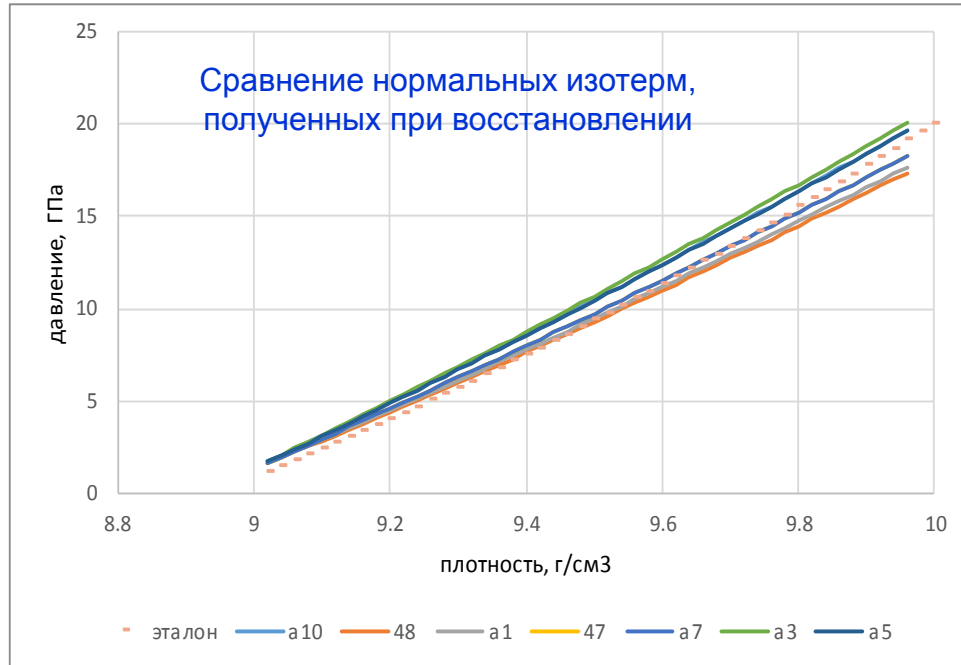
Схема опыта



ДВМГ малого класса ($\varnothing$ 250 мм)

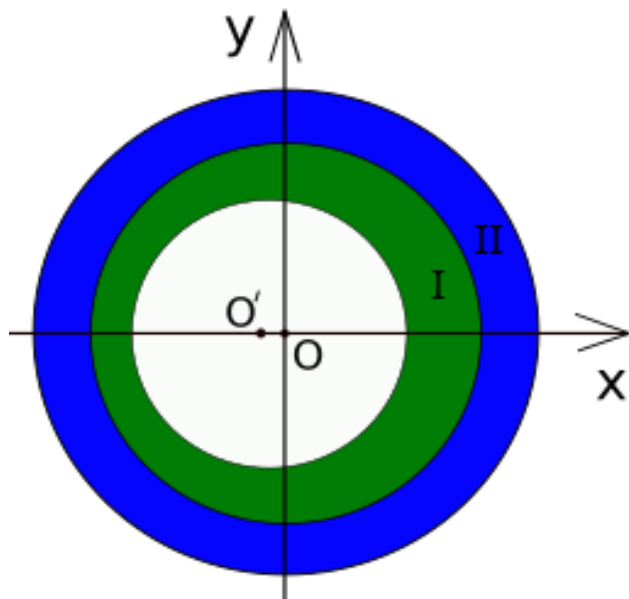
Результаты опыта

- В опыте зарегистрировано снижение тока в 3.5 раз (24 МА → 6.5 МА), давления на порядок.
- При этом все методики сработали штатно – зарегистрированы скорости поверхности меди по всем каналам вплоть до радиуса 0,35 мм. Это позволило восстановить кривые сжатия.



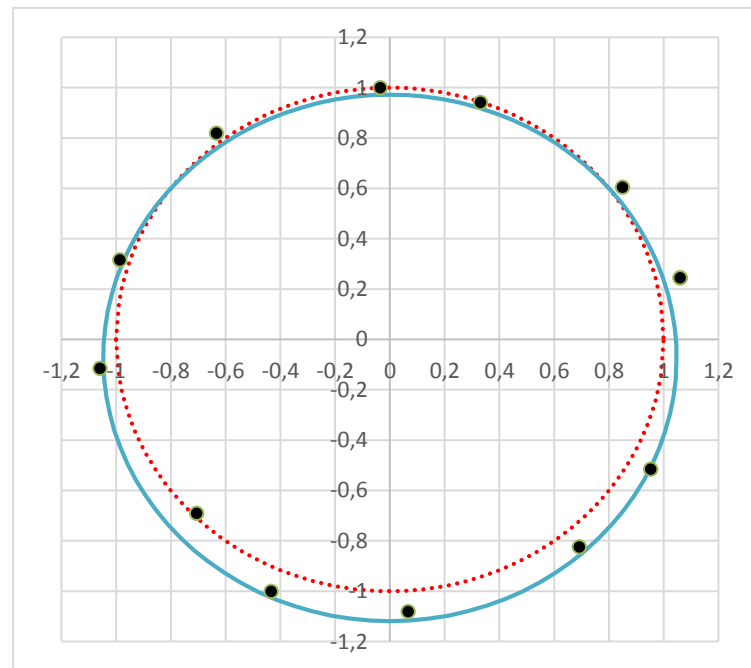
- ✓ Одно измерение скорости обеспечивает статистическую оценку дисперсии давления на «холодной» кривой от 1 до 2%.
- ✓ Наличие семи независимых измерений позволило получить оценку дисперсии ~ 20%.
- ✓ При усреднении это дает ошибку 8% ($20/\sqrt{7}$).
- ✓ Отличие от эталона оказалось менее 1%.
- ✓ Расчеты показывают, что большая ошибка (8%), предположительно, обусловлена низким качеством изготовления лайнера (разнотолщинность ~ 13 мкм).

Схема задания разнотолщинности



(медная -I и алюминиевая -II оболочки)

Сравнение экспериментальной и расчетной формы лайнера



Разброс в смещениях лайнера в расчете составил до 83 мкм, в эксперименте до 100 мкм.

5. Второй эксперимент

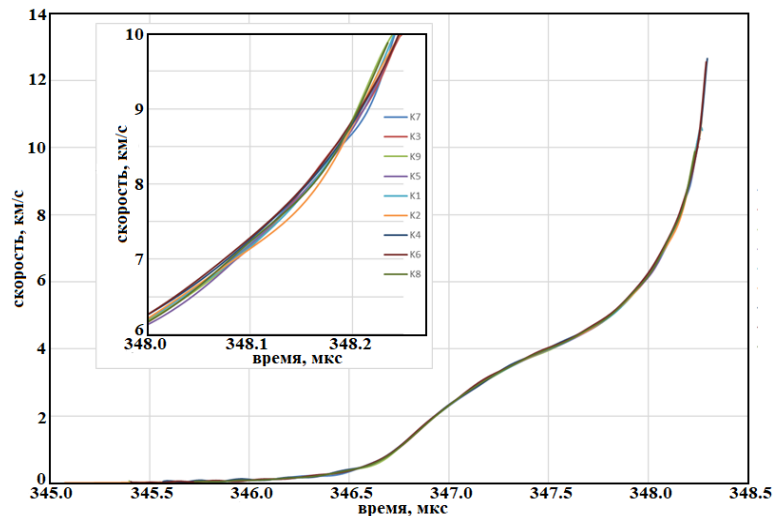
Внесенные изменения:

1. Предприятие «Асферика» изготовило прецизионный цилиндрический лайнер с разнотолщиной $\Delta \sim 1$ мкм (в 2021 году - $\Delta \sim 13$ мкм) ;
2. Был доработан оптоволоконный измеритель скорости, что позволяло регистрировать скорость поверхности медной оболочки вплоть до 0.2 мм (ранее до 0.35 мм);
3. Была изменена конструкция соединения ДВМГ с передающей линией.

В опыте зарегистрирован ток ~ 19.6 МА, что меньше ожидаемого значения ~ 22 МА.

Это связано со снижением тока запитки СВМГ до 4.3 МА, вместо расчетных 5.4 МА.

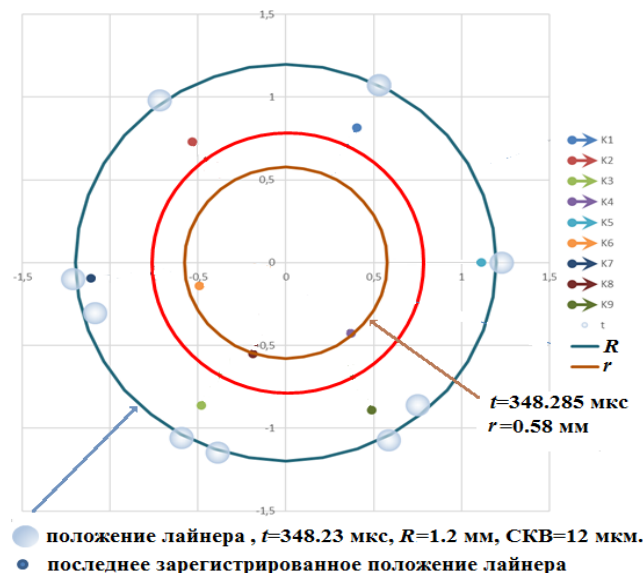
Причина закупка некондиционных медных заготовок для изготовления центральной трубы СВМГ.



Зарегистрированные зависимости скорости внутренней поверхности от времени (9 кривых).

Среднеквадратичное отклонение положения внутренней поверхности лайнера от $R=1.2$ мм на момент времени 348.23 мкс равно 12 мкм.

В опыте 2021 года примерно на том же радиусе (1 мм) оно составляло ~ 100 мкм.



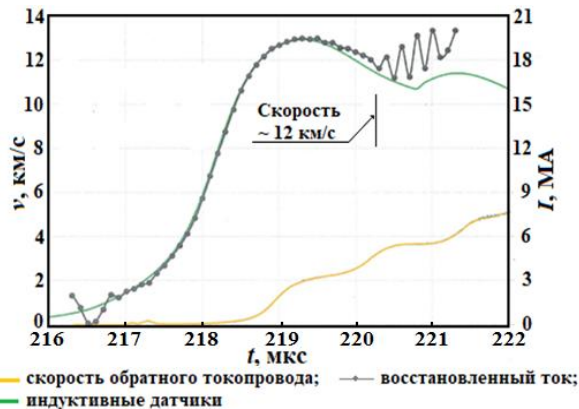
Координаты лайнера.

Измеренные в опыте

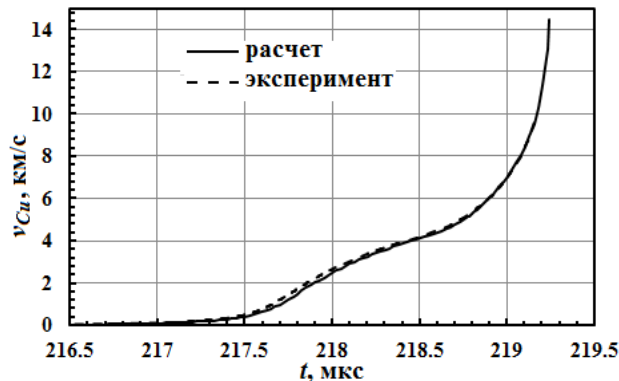


РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ

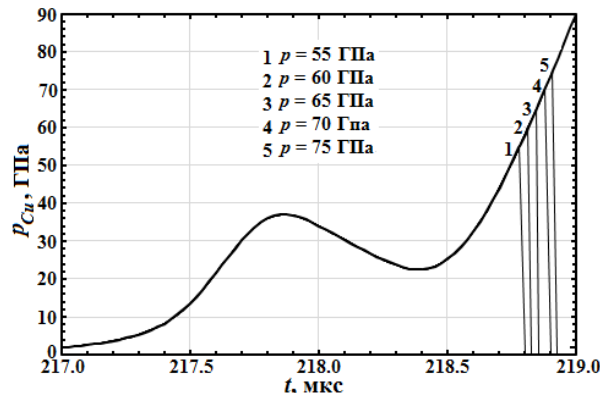
Зависимость тока от времени



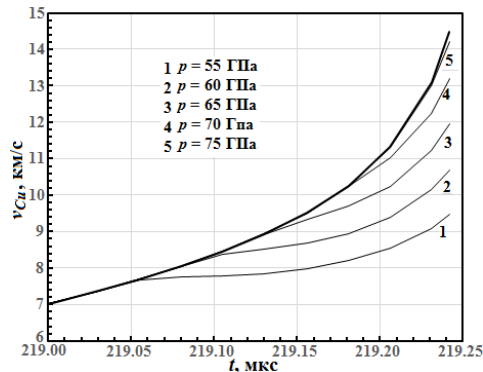
Зависимость скорости внутренней поверхности лайнера от времени



Анализ информативности опыта



Зависимости давления от времени
на границе раздела Al-Cu



Зависимости скорости свободной
поверхности лайнера от времени

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

Возможные причины:

воздействие акустической волны на световоды – устраняется техническими методами;

разрушение внутренней поверхности лайнера – желательно уменьшить базу пролета с ~ 9 первоначальных толщин до 3-4 (как на установке Z)

По зарегистрированной в опыте скорости ≤ 12 км/с удалось восстановить кривую сжатия Cu при давлениях ≤ 70 ГПа с погрешностью 1-2%.

6. Перспективы ДВМГ малого класса

Для увеличения исследуемых давлений были выбраны:

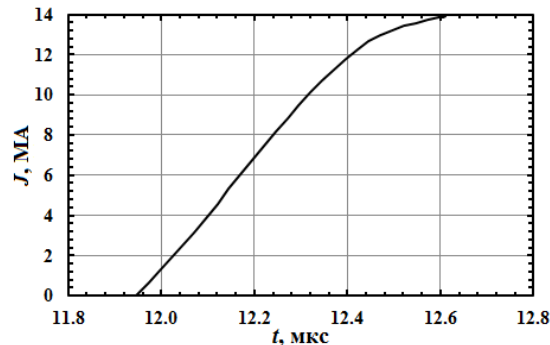
параметры лайнера – высота $z_0=13$ мм, внутренний радиус поверхности медного образца $r_0=2.4$ мм, толщина слоя Cu $\delta_{Cu} = 0.55$ мм, толщина слоя Al $\delta_{Al} -1.0$ мм;

системы формирования тока ДВМГ – длина фольги увеличена с 30 см до 60 см, между фольгой и нагрузкой установлен разрядник с напряжением пробоя 160 кВ, индуктивность подвода энергии к фольге составила 9.6 нГн, от фольги до лайнера – 7 нГн.

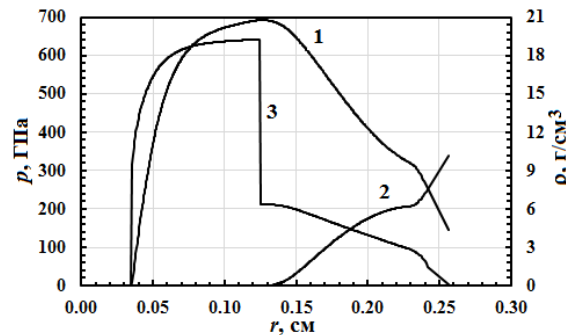
Напряжение на фольге при токе запитки 5 МА составило 250 кВ.

Лайнер близок к используемому в опытах на установке Z - база пролета до измерительного блока ($r=0.35$ мм) ~ 4 первоначальных толщин исследуемого медного образца.

Расчетные зависимости



Ток от времени



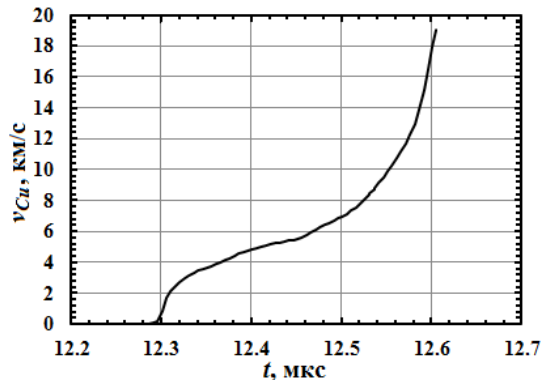
1 – гидродинамическое давление,
2 – давление магнитного поля,
3 – плотность

Распределения давлений и плотности по радиусу

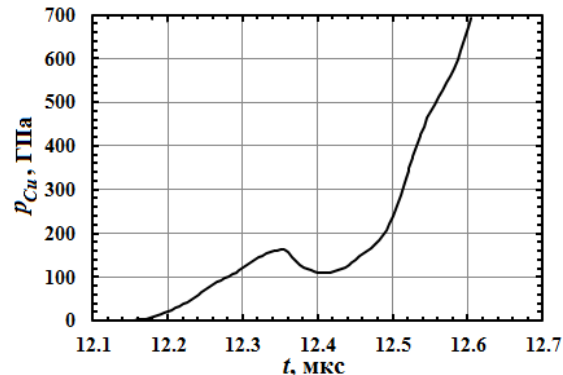
Расчетные зависимости



РФЯЦ
ВНИИЭФ
РОСАТОМ



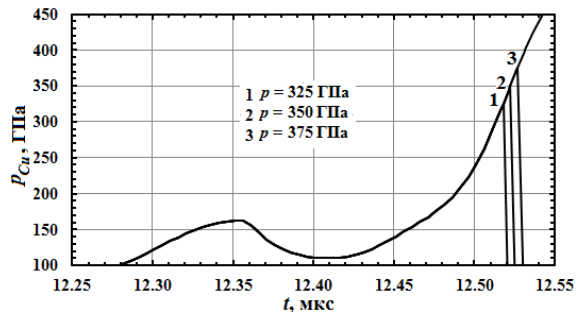
Скорость свободной поверхности
лайнера от времени



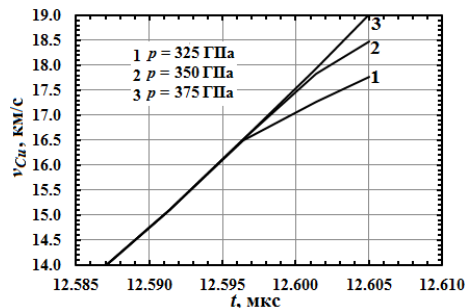
Давление от времени на
границе раздела Cu – Al

В случае успешного проведения опыта мы ожидаем восстановления кривой «холодного» сжатия меди до давлений 3.5 Мбар с точностью по давлению 1-2%.

Анализ информативности опыта



Зависимости давления от времени
на границе раздела Cu – Al



Соответствующие зависимости
скорости свободной
поверхности лайнера

По возможностям исследования изэнтропического сжатия материалов ДВМГ малого класса не уступает установке Z !!!

Заключение

Для проведения экспериментов по динамическому изэнтропическому сжатию веществ создан уникальный многоканальный оптоволоконный измеритель скорости на базе коллиматоров-градианов, изготавливаемых собственными силами РФЯЦ-ВНИИЭФ, позволяющий регистрировать скорость внутренней поверхности сходящегося лайнера до радиуса 0,2 мм по шести каналам в двух плоскостях.

В первых экспериментах с ДВМГ малого класса:

- показано, что восстановление кривой сжатия с процентной погрешностью по давлению возможно при микронной точности изготовлении лайнерной системы;
- освоена технология изготовления лайнеров с указанными параметрами;
- получена кривая сжатия меди при давлениях $\leq 0,7$ Мбар.

ДВМГ малого класса позволяет исследовать динамическое изэнтропическое сжатие веществ при давлениях до 3,5 Мбар (по меди) не уступающих по диапазону исследований на установке Z.

Спасибо
за
внимание