



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВМГ

А.В. Ивановский

Факс/тел.: (831-30) 43738

E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

Институт лазерно-физических
исследований (ИЛФИ),

Электрофизическое отделение

Одним из методов создания высокой плотности энергии при моделировании физических процессов и исследований свойств веществ является конверсия кинетической энергии высокоскоростной оболочки или лайнера.

Традиционно, разгон оболочек осуществляется:

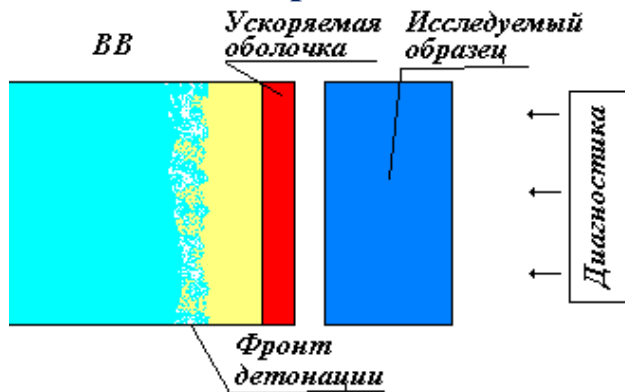
- взрывчатым веществом (ВВ) на газодинамических комплексах;**
- токовым импульсом на электрофизических установках;**
- излучением на лазерных установках.**

Согласно решению, полученному Е.И. Забабахиным, максимальная скорость движения несжимаемой жидкой оболочки W_k связана со скоростью волны детонации D следующим соотношением

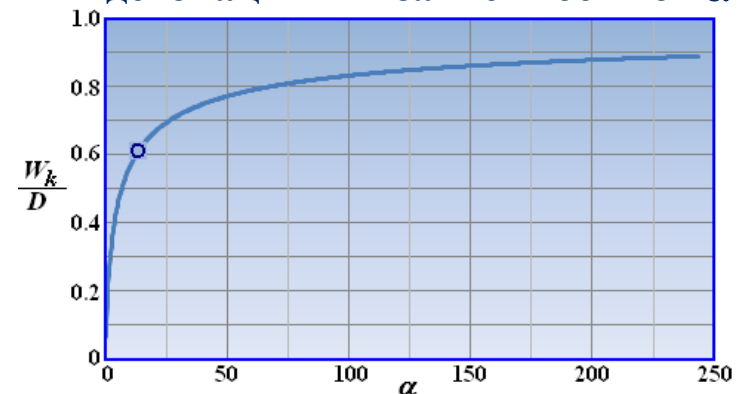
$$\frac{W_k}{D} = 1 + \beta - \sqrt{(1 + \beta)^2 - 1}, \quad \beta = \frac{27}{16\alpha}$$

где α - отношение масс единицы площади взрывчатого вещества и оболочки.

Схема экспериментов



Отношение скорости оболочки W_k к скорости детонации D в зависимости от α



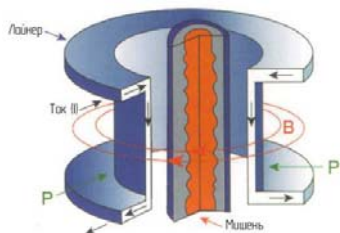
При $\alpha=12.5$ - $W_k/D=0.6$. Считая скорость детонации равной $D=9$ км/с, получаем $W_k \approx 5.4$ км/с.

Сильная ударная волна
($v_0=0, p_0=0, \varepsilon_0=0$)

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\delta}{\delta - 1} \cdot \rho_0 v_1^2, \\ \varepsilon_1 = \frac{v_1^2}{2}, \quad \delta = \frac{\rho_1}{\rho_0} - \text{сжатие.} \end{cases}$$

При одинаковых материалах ударника и мишени массовая скорость в ударной волне $v_1 = W_k/2 = 2.7$ км/с, удельная энергия $\varepsilon_1 = 0.004$ МДж/г. Давление: для оболочки из алюминия $p_1 = 0.2$ Мбар; для оболочки из железа $p_1 = 0.6$ Мбар.

Схема нагружения



Уравнения движения лайнера

$$\begin{cases} m \frac{d\mathcal{G}}{dt} = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r} \\ \mathcal{G} = \frac{dr}{dt} \end{cases}$$

Здесь t – время, r – координата, \mathcal{G} – скорость, I – ток, $m = 2\pi\rho_0 r_0 h$ – погонная масса (ρ_0 , h и r_0 – плотность вещества, толщина и начальное положение лайнера).

В безразмерном виде

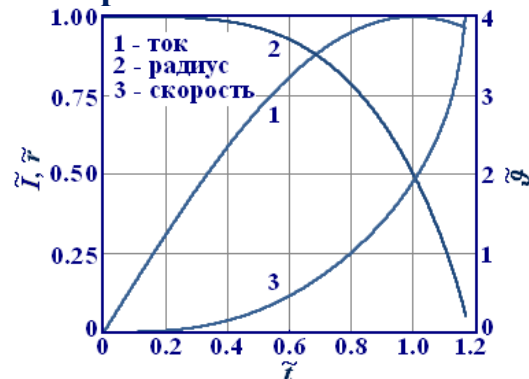
$$\tilde{r} = r/r_0, \quad \tilde{t} = t/\tau, \quad \tilde{\mathcal{G}} = \mathcal{G}/\mathcal{G}_0 = \mathcal{G} \cdot \tau/r_0$$

(τ – время достижения максимального тока I_{max})

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\mathcal{G}}}{d\tilde{t}} = -\Pi \frac{\tilde{I}^2}{\tilde{r}} \\ \tilde{\mathcal{G}} = \frac{d\tilde{r}}{d\tilde{t}} \end{cases}$$

Параметр $\Pi = \frac{\mu_0 I_{max}^2 \tau^2}{8\pi^2 \rho_0 h r_0^3}$ определяет масштабирование лайнеров.

При $\Pi=3$ лайнер проходит половину начального радиуса в момент максимума тока и скорость его составляет $v \approx 2r_0/\tau$ (см. рис.).



Зависимость тока $I/I_{max} = \sin(\pi/2 \cdot t/\tau)$, радиуса и скорости лайнера от времени при $\Pi=3$.

Лайнер устойчив при разгоне на масштабе $N \leq 5$ начальных толщин ($h = r_0 / (2N)$). Поэтому

$$v = \left(\frac{4\mu_0 N}{\pi^2 \Pi} \right)^{1/4} \frac{1}{\rho_0^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{I_{max}}{\tau}} \Rightarrow v [\text{км/с}] = \frac{5.4}{\rho_0^{1/4} [\text{г/см}^3]} \cdot \sqrt{\frac{I_{max} [\text{МА}]}{\tau [\text{мкс}]}}$$

При одинаковых материалах ударника и мишени массовая скорость в ударной волны $v_1 = v/2$.

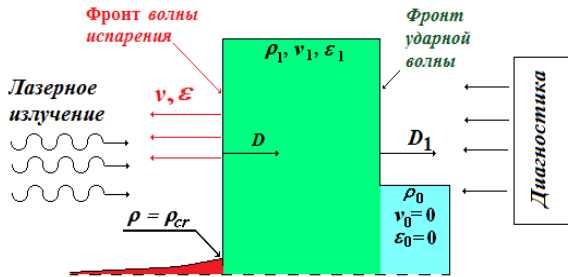
Для ВМГ с размыкателями тока микросекундного диапазона $I/t \leq 50$ МА/мкс и для AL ($\rho_0 = 2.7$ г/см³):

$$v_1 = 15 \text{ км/с}; \quad \varepsilon_1 = 0.1 \text{ МДж/г}; \quad p_1 = 6 \text{ Мбар.}$$

При сокращении фронта импульса до 100 нс:

$$V_1 = 45 \text{ км/с}; \quad \varepsilon_1 = 1 \text{ МДж/г}; \quad p_1 = 55 \text{ Мбар.}$$

Схема нагружения



Считаем, что энергия ЛИ поглощается при плотности $\rho_{cr} = \pi \cdot A / Z \cdot m_p \cdot m_e \cdot (c / \lambda e)^2$.

Условия на фронте

$$\begin{cases} (v_* - D) \cdot \rho_* = (v - D) \cdot \rho \\ p_* + \rho_* (v_* - D)^2 = p + \rho (v - D)^2 \\ \varepsilon_* + \frac{p_*}{\rho_*} + \frac{(v_* - D)^2}{2} + \frac{S}{\rho_* (v_* - D)} = \varepsilon + \frac{p}{\rho} + \frac{(v - D)^2}{2} \end{cases}$$

Индекс «*» относится к величинам за фронтом волны. S – мощность потока ЛИ.

Сильная ударная волна

$$(v_0=0, p_0=0, \varepsilon_0=0)$$

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\delta}{\delta - 1} \cdot \rho_0 v_1^2, \\ \varepsilon_1 = \frac{v_1^2}{2}, \quad \delta = \frac{\rho_1}{\rho_0} - \text{сжатие.} \end{cases}$$

Фронт волны испарения

Скорость истечения плазмы $v - D_1 = -c_0$.

При адиабатическом процессе:

- скорость звука $c_0 = (\gamma p / \rho_{cr})^{1/2}$; давление $p = 1 / \gamma \rho_{cr} c_0^2$.

Для идеального газа $\varepsilon = \frac{p}{(\gamma - 1) \rho_{cr}} = \frac{c_0^2}{\gamma(\gamma - 1)}$.

С учетом этого и условий на фронте сильной ударной волны

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta - 1} v_1^2 = \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} c_0^2 \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} \right) \\ \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} - \frac{1}{\delta^2} \cdot \frac{\rho_{cr}^2}{\rho_0^2} \right) \cdot \frac{c_0^2}{2} - \frac{\delta + 1}{\delta - 1} \cdot \frac{v_1^2}{2} = \frac{S}{\rho_{cr} \cdot c_0} \end{cases}$$

Преобразуя имеем ($\rho_{cr} / \rho_0 \rightarrow 0$, $\delta / (\delta - 1) \rightarrow 1$)

$$\begin{cases} p_1 \approx 2 \cdot \rho_{cr} c_0^2 \\ \varepsilon_1 = \frac{v_1^2}{2} = \frac{\delta - 1}{\delta} \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} c_0^2 \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} \right) \approx \frac{\gamma + 1}{\gamma} \cdot \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} c_0^2 \\ S = \frac{1}{2} \cdot \rho_{cr} \cdot c_0^3 \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} - \frac{\delta + 1}{\delta} \cdot \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma} + \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\rho_{cr}^2}{\rho_0^2} \right) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \rho_{cr} \cdot c_0^3 \end{cases}$$

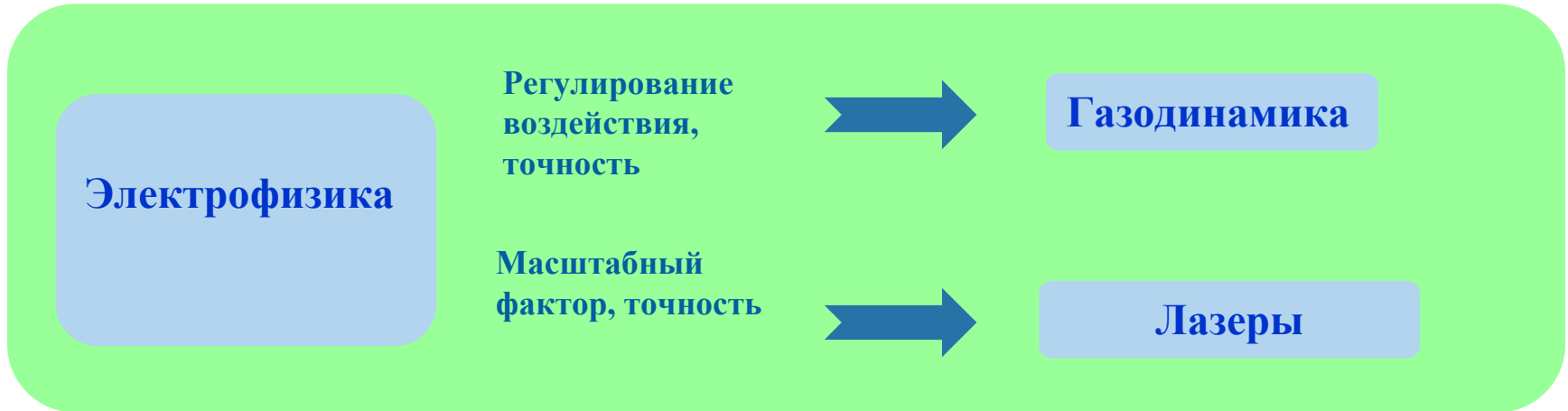
Предельное значение $S_m \approx 10^{15}$ Вт/см². При $\lambda = 1$ мкм $\rho_{cr} \approx 4 \cdot 10^{-3}$ г/см³.

В результате для алюминия ($\rho_0 = 2,7$ г/см³):
 $c_0 = 1,26 \cdot 10^8$ см/с; $v_1 \approx 62$ км/с; $\varepsilon_1 \approx 1,9$ МДж/г; $p_1 \approx 100$ Мбар.

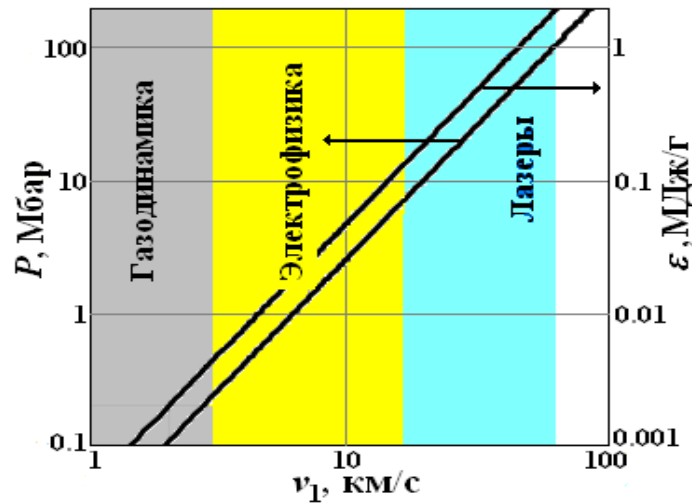
Сравнение методов исследования

	Газодинамические комплексы	Электрофизические методы	Лазерные методы
Схемы нагружения			
Давление	точность определения ~5%	$=H_{\phi}^2/8\pi$ - точность определения ~1%	точность определения ~5%
Масштабы	1- 10 см	1- 10 см	0.1-1 мм
Симметрия	возмущения от системы инициирования, неустойчивости на фронте детонации	высокая	неоднородность пятна ЛИ
Сохранение образцов	практически невозможно	возможно при скоростях оболочки ≤ 1 км/с	практически невозможно
Регулирование воздействия	возможно в ограниченных пределах	возможно	возможно, путем профилирования импульса ЛИ

Таким образом:



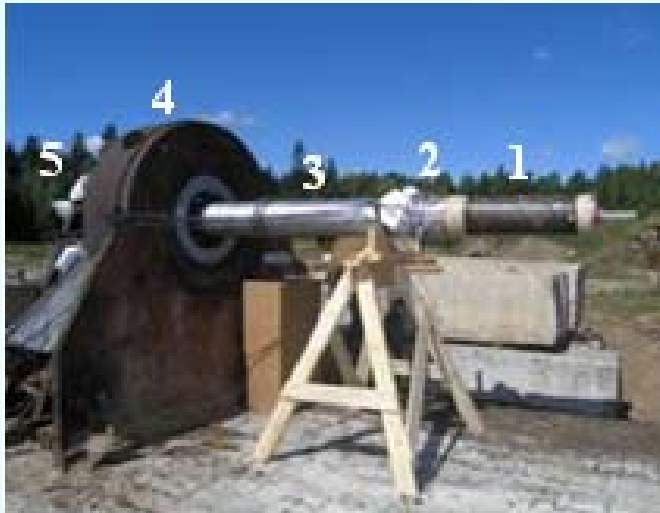
Зависимость удельной энергии и давления от скорости оболочки



1. Низкие удельные энергии (≤ 10 кДж/г)

Представляет интерес исследования: откольного разрушения, динамической прочности, пыления при выходе ударной волны на поверхность.

Экспериментальный стенд



Внешний вид экспериментальной установки:
 1- СВМГ; 2– узлы обострения и прерывания тока; 3- волновая линия; 4– защита исследуемых образцов;
 5– нагрузка.

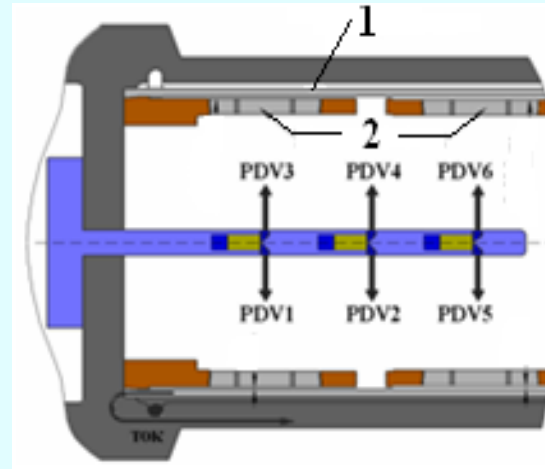
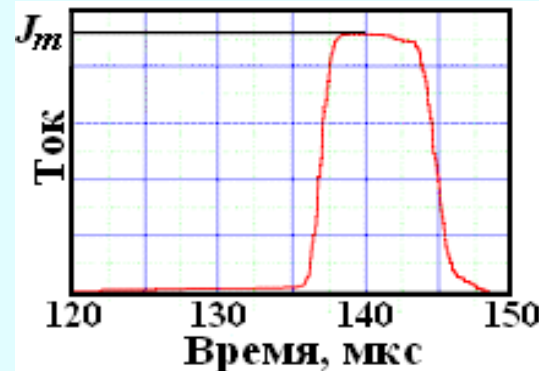


Схема нагрузки:
 1. -ускоряемый лайнер;
 2 – цилиндрические мишени из исследуемого материала.



Импульс тока:
 амплитуда до 10 МА;
 регулируемая длительностью до ~30 мкс;
 время нарастания и спада ~2 мкс.

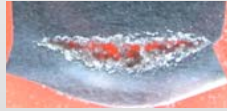
Откольная прочность матери. Серия *R-damage* (10 опытов *AL*)



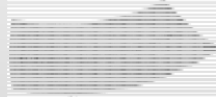
Впервые получена представительная информации о зарождении, развитии, а также полном и частичном компактировании откола в металле.



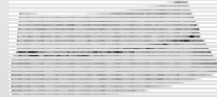
Зарождение откола



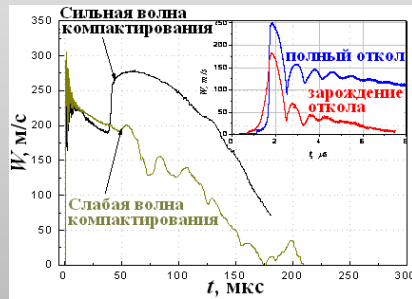
Полный откол



Полное компактирование



Частичное компактирование



Зарегистрированные скорости внутренней поверхности мишеней.

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2013, том 448, № 3, с. 285–288

ФИЗИКА

УДК 539.4

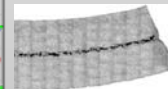
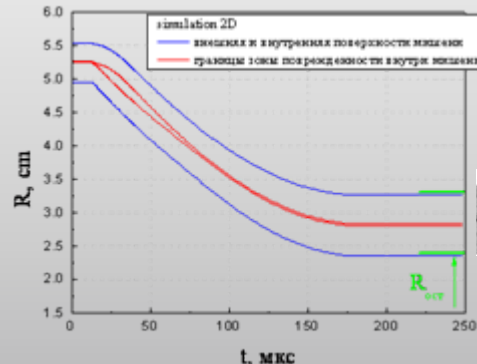
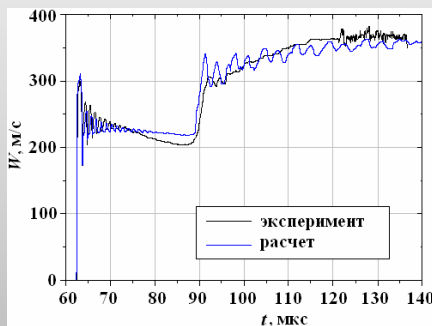
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2013 г. В. А. Васюков, А. М. Глыбин, П. В. Дудай, В. И. Дулин, А. А. Зименков, В. А. Иванов, А. В. Ивановский, А. И. Краев, А. И. Кузьев, С. С. Надежин, А. А. Петрухин, А. Н. Скобелев, О. А. Топанова, W. L. Atchison, D. B. Holtkamp, A. M. Kaul, R. E. Reinovsky, G. Rodrigues, L. J. Tabaka, C. L. Rousculp, J. B. Stone, D. M. Oro, M. Salazar, J. R. Griego, J. R. Payton, D. T. Westley

Представлено академиком Р.И. Ильякаевым 30.03.2012 г.

Поступило 18.07.2012 г.

Результаты позволили верифицировать численные модели откольного разрушения и компактирования поврежденной среды.



JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 115, 023516 (2014)

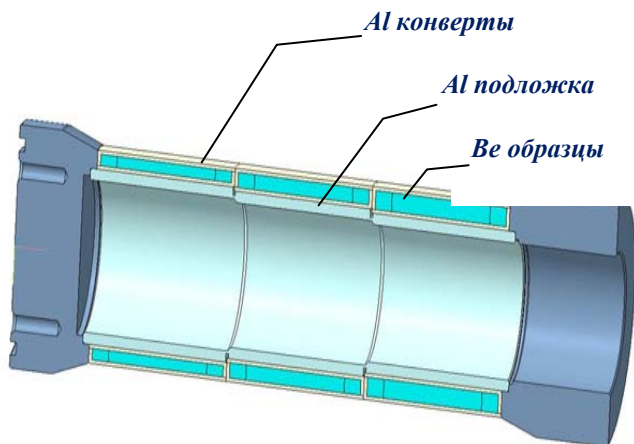
Damage growth and recollection in aluminum under axisymmetric convergence using a helical flux compression generator

A. M. Kaul,^{1(a)} A. V. Ivanovsky,² W. L. Atchison,¹ A. A. Petrukhin,² P. V. Duday,² J. R. Griego,¹ M. Salazar,¹ S. S. Nadezhin,² O. A. Tyupanova,² D. M. Oro,¹ D. B. Holtkamp,¹ G. Rodriguez,¹ L. J. Tabaka,¹ A. I. Kraev,² A. N. Skobelev,² D. T. Westley,¹ B. G. Anderson,¹ V. A. Ivanov,² A. M. Glybin,² A. I. Kuzyaev,² J. B. Stone,¹ J. R. Payton,¹ P. M. Goodwin,¹ Q. McCulloch,¹ R. R. Montoya,¹ V. I. Dudin,² A. A. Zimenkov,² R. B. Randolph,¹ F. Fierro,¹ R. E. Reinovsky,¹ C. L. Rousculp,¹ A. N. Balandina,² and A. M. Podurets²

¹Los Alamos National Laboratory, P. O. Box 1663, Los Alamos, New Mexico 87545, USA
²Russian Federal Nuclear Center, 607190, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

(Received 23 October 2013; accepted 20 December 2013; published online 13 January 2014)

Мишенный блок



Образцы из *Be* толщиной 3, 4, 5 мм конвертуется в оболочку из *Al* толщиной 1мм для сохранения осколков в случае фрагментации.

Во избежание откольного разрушения в *Be* мишени помещались на «жертвенную» подложку из алюминия толщиной 3 мм

Ток пропускается по *Al* лайнеру толщиной 2 мм.

В первом опыте лайнер ускорен до ~ 1 км/с. Это обеспечило давление ~ 10 ГПа при ударе о мишень.

Получена вся запланированная информация о скоростях лайнера и мишеней.

Удалось избежать схлопывания мишеней на ось.

Исследуемые образцы сохранены для металлографического анализа.



Мишенный блок с *Be*:
до эксперимента –а;
после эксперимента –б.

Получена информация о поведении *Be* при скоростях деформаций $10^3 \div 10^4 \text{с}^{-1}$ и интенсивности деформаций $\varepsilon \sim 0.3 \div 0.4$.

Запланированы эксперименты по исследованию пыление свинца при выходе ударной волны на поверхность



Схема процесса

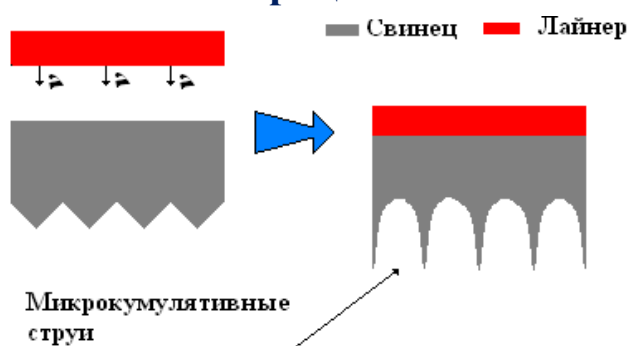
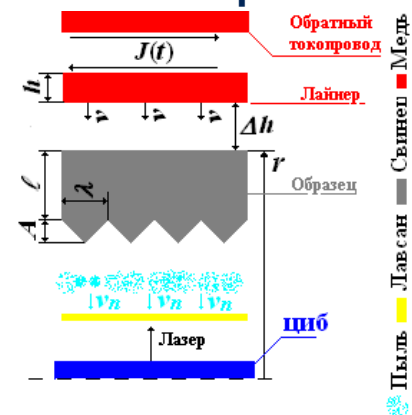


Схема экспериментов



Планируется серия опытов. В каждом нагружается 5-6 образцов.

- Образцы отличаются шероховатостью поверхности - амплитуда до 80 мкм, длина волны до 400 мкм.
- Толщины *Cu*-лайнера $h=1$ мм. Ток во всех опытах одинаков - $J_m=10$ МА, $\tau=30$ мкс.
- От опыта к опыту меняется радиус поверхности образцов, что позволяет варьировать давление от 20 до 40 ГПа.

В опытах измеряются ток, скорости лайнера, пыли $-v_n$ и лавсановой пленки $-v_L$ с погонной массой m_L (PDV). Погонная масса пыли m оценивается из

$$m = m_L \cdot \frac{v_L}{v_n - v_L}$$

Мы планируем исследовать пыление без разнодинамичности воздействия, вызываемой системой инициирования ВВ и неустойчивостями на фронте детонации.

2. Промежуточные удельные энергии (10^{-2} МДж $\leq \varepsilon \leq 10^{-1}$ МДж/г)

Представляют интерес исследования турбулентного перемешивания (ТП) и уравнений состояния (УРС) веществ.

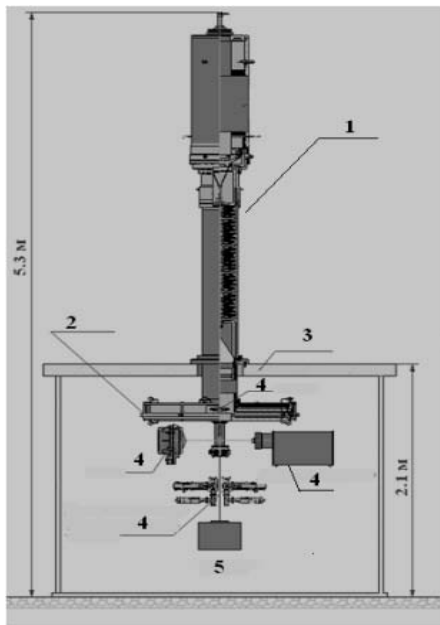


Схема экспериментального стенда:

- ДВМГ диаметром 0.25 м - 1;
- электровзрывной размыкатель тока - 2;
- система защиты от ударной волны и осколков - 3;
- радиальная и продольная рентгенография - 4;
- методика *PDV* - 5;
- методики оптическая и *B-dot* для измерения токовых импульсов.

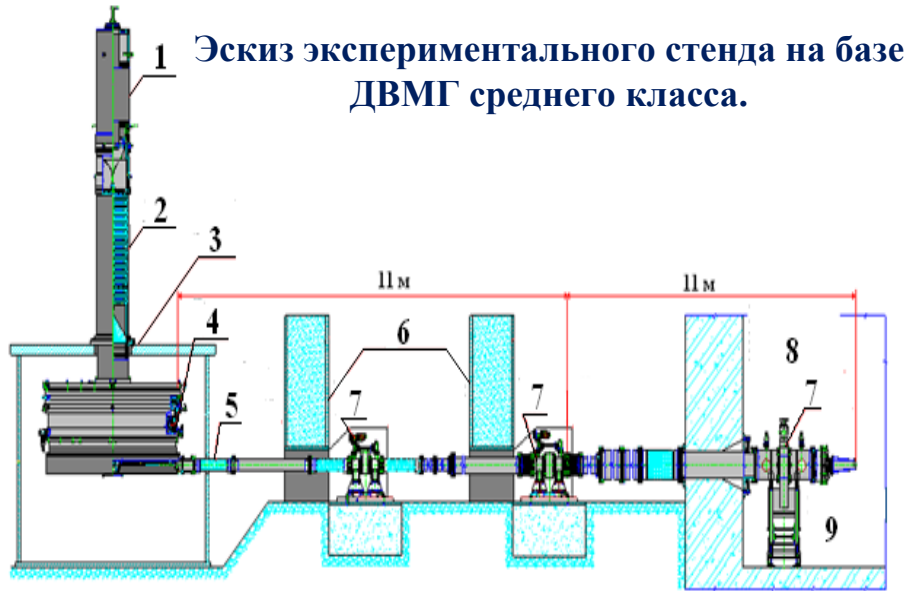
Турбулентное перемешивание (ТП)

- Исследование с твердыми телами на ГК при скоростях ~ 5 км/с невозможно из-за упругопластических эффектов, препятствующих развитию ТП.
- Скорость ≥ 10 км/с достигается в трехкаскадных системах или на легкогазовых пушках. Толщины оболочек (доли мм) недостаточны для рентгенографии.
- Для верификации моделей привлекают данные, полученные при ускорениях до $10^5 g_0$ в экспериментах с газами.
- ДВМГ позволяет разогнать цилиндрические лайнеры толщиной ~ 1.5 мм до скоростей 10-20 км/с. Это расширяет диапазон исследований до $10^9 g_0$.

Предполагается проводить исследования развития зоны ТП при торможении медных оболочек на слое легкого вещества (полиэтилен, вода).

Наряду с этим, возможны исследования УРС веществ при изэнтропическом и ударном нагружении давлением 3-4 Мбар.

3. Высокие удельные энергии ($\varepsilon \geq 1$ МДж/г)



Эскиз экспериментального стенда на базе ДВМГ среднего класса.

В состав стенда входят:

- источник тока на базе СВМГ - 1 и ДВМГ- 2 среднего класса($\varnothing 0.4$ м);
- узел обострения тока до ~ 100 нс - 4, размещенный в защитном помещении – 3.

Вакуумная система узла обострения тока и измерительного тракта, состоящая из:

- гибкого вакуумного звена – 5;
- вакуумных затворов– 7;
- защитных сооружений – 6;
- вакуумного поста – 9; размещенный в помещении каземата - 8.

В процессе эксплуатации уничтожается только источник тока на базе ВМГ.

На стенде возможны эксперименты по имплозии Z-пинча током ~ 25 МА за время ~ 120 нс. Это позволит:

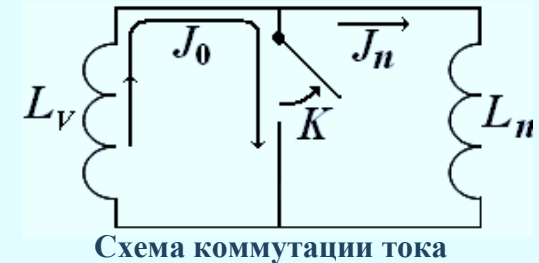
- достичь давлений до 40 Мбар;
- генерировать рентгеновское излучение с энергией до ~ 3 МДж за время ~ 10 нс.

Дальнейшее увеличение давления и энергии рентгеновского излучения возможно в разовых экспериментах с применением сверхмощных дисковых ВМГ диаметром 1 метр.

Проблемный вопрос - реализация обострение тока до ~ 100 нс.

Узел обострения тока до ~ 100 нс.

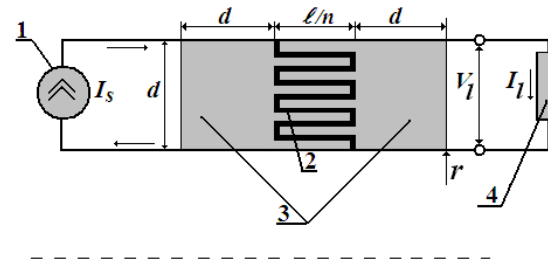
При коммутации тока J_0 из индуктивного накопителя $-L_v$ в нагрузку равной индуктивности ($L_n=L_v$) ток делится пополам $J_n=J_0/2$, энергия уменьшается в 4 раза.



Имеется две идеи реализации коммутации тока за время ~ 100 нс:

• **электровзрывной гофрированный размыкатель тока;**

S.G. Garanin, A.V. Ivanovsky and L.S. Mkhitarian
An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator//Nuclear Fusion., 2011, V.51, N10 (15pp).

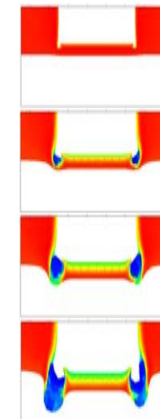
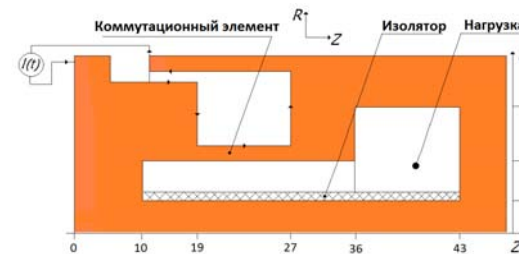


Схема

Внешний вид

• **магнитодинамический размыкатель тока**

А.А.Базанов, А.В.Ивановский, В.Ш.Шайдуллин
Магнитодинамический размыкатель тока с субмикросекундным временем переключения // ЖТФ, 2010.



Схема

Процесс коммутации

Какая из идей более приемлема покажет время.