УДК 537.63, 537.84

АСИММЕТРИЯ ПОЛЕТА ПЛОСКИХ ЛАЙНЕРОВ, РАЗГОНЯЕМЫХ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А. А. Базанов*, Б. Е. Гриневич*, А. В. Ивановский*,**

* Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров, Россия
** Саровский физико-технический институт, 607189 Саров, Россия
E-mails: aab@elph.vniief.ru, bgr@elph.vniief.ru, ivanovsky@elph.vniief.ru

На конденсаторной установке “Каскад” проведены эксперименты по ускорению плоских металлических лайнеров магнитным полем. Приведены данные об асимметрии полета лайнеров как в направлении вдоль линии тока, так и в поперечном направлении.

Ключевые слова: конденсаторная установка, ударное и безударное сжатие материалов, разрядный ток, скорость лайнера, электроконтактная методика измерения, база полета лайнера.

DOI: 10.15372/PMTF20220508

Введение. Разгон плоских лайнеров магнитным полем широко применяется в лаборатории “Сандия” (США) при проведении экспериментов по изоэнтропическому и ударному сжатию материалов с целью определения уравнений состояния [1, 2]. Преимуществом этих экспериментов является возможность работы лайнеров при значениях давления порядка 10^9 Па, которых невозможно достичь, используя другие лабораторные методы. Получена скорость лайнера 33 км/с, что позволило в 4–5 раз увеличить диапазон достижимых давлений при сохранении заданной точности измерений.

Альтернативными источниками энергии, которые могут применяться в качестве ускорителей плоских пластин до скоростей, приближенно равных 15 км/с, являются дисковые взрывомагнитные генераторы с фольговым размыкателем тока. В работе [3] показано, что даже при относительно большой величине начальной индуктивности нагрузки, равной 10 нГн, сила тока в ней при работе дискового взрывомагнитного генератора диаметром 1 м с фольговым размыкателем тока после разрыва контура составляет 68 МА при характерном времени нарастания тока 1,6 мкс. Согласно оценкам этого времени достаточно для разгона алюминиевого лайнера до скорости, приближенно равной 56 км/с.

Оценки скоростей пластин при разгоне магнитным полем приведены в работе [4]. В [5] показано, что скорости пластины, достижимые при разгоне магнитным полем как без изменения агрегатного состояния вещества, так и в конденсированном состоянии (в случае расплавления материала пластины под действием протекающего по ней тока), определяются только ее толщиной.

© Базанов А. А., Гриневич Б. Е., Ивановский А. В., 2022

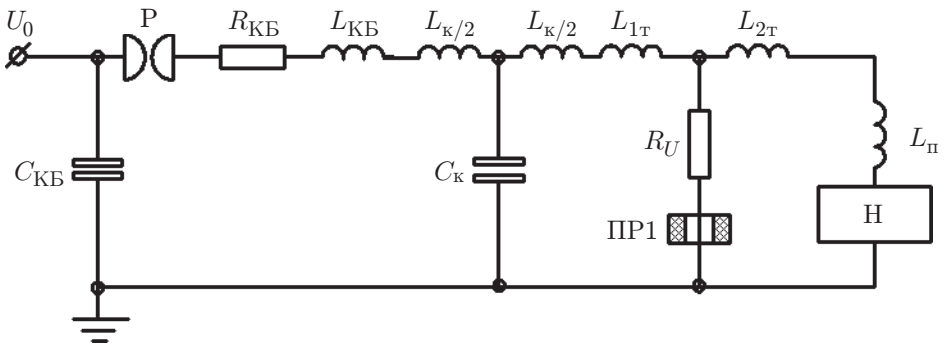

Рис. 1. Электрофизическая схема эксперимента

Оценивая пройденный путь s в толщинах пластины: $s = Nh$, с использованием формулы $v^2 = 2as$ получаем

$$v \approx 3{,}5\sqrt{N/\rho_0}\, J_y,$$

где v — скорость, км/с; $a = [H^2/(8\pi)]/(\rho_0 h)$ — ускорение; $H = 4\pi J_y$ — напряженность магнитного поля, Э; h — толщина пластины, см; N — коэффициент, значение которого обычно принимается равным $4 \div 6$; ρ_0 — плотность материала пластины, г/см^3; J_y — линейная плотность тока, МА/см.

Таким образом, предельные скорости ускоряемой магнитным полем оболочки определяются только линейной плотностью тока или напряженностью магнитного поля.

На практике возможность достижения высоких скоростей ограничена эффектами, возникающими вблизи электродов, и развитием неустойчивости Рэлея — Тейлора.

В данной работе приведены результаты первого этапа исследований, проведенных на стационарной установке “Каскад” при относительно небольших силе тока (до 5 МА) и характерном времени разгона лайнера (приблизительно 5 мкс, что соответствует 1/4 периода разряда батареи). Эксперименты позволили получить скорости медного лайнера $3{,}5 \div 4{,}0$ км/с и исследовать симметрию подлета участков лайнера к нагружаемому образцу.

Описание установки “Каскад” и электрофизической схемы экспериментов. Установка “Каскад” представляет собой импульсную конденсаторную батарею (КБ) с зарядным напряжением до 50 кВ. Установка состоит из 12 энергетических модулей емкостью 41 мкФ каждый. Количество энергетических модулей, подключаемых к нагрузке, может варьироваться. Зарядное напряжение плавно регулируется в диапазоне $0 \div 50$ кВ. Электрофизическая схема подключения лайнерного узла к КБ установки в проведенных экспериментах представлена на рис. 1 ($C_{КБ} = nC_s$ — емкость КБ, $C_s = 41$ мкФ — емкость одной конденсаторной секции; N — количество используемых в эксперименте конденсаторных секций; U_0 — зарядное напряжение; $R_{КБ} = R_s/n$ — сопротивление разрядной цепи КБ; $R_s = 22$ мОм — сопротивление разрядной цепи одной секции; $L_к = 30/n$, нГн; $C_к = 1{,}7$ мкФ — емкость кабельной передающей линии; $L_{КБ} = 32/n$, нГн; $L_{1т} = 5{,}2$ нГн; $L_{2т} = 4$ нГн; $L_п = 5$ нГн; индексы “к”, “т”, “п” соответствуют кабелю, токосборнику и переходнику для подключения нагрузки; $R_U = 150$ Ом — активное сопротивление, служащее для измерения напряжения $U = I_U R_U$ (I_U — сила тока, измеряемая поясом Роговского) на входе в нагрузку; ПР1 — пояс Роговского датчика напряжения; Р — система коммутации КБ, состоящая из 12 двухканальных твердотельных разрядников; Н — нагрузка).

Описание устройства для метания плоских лайнеров. Результаты измерений, проведенных в эксперименте по разгону магнитным полем плоских лайнеров, используются для проведения прецизионных измерений при ударном и безударном сжатии материалов

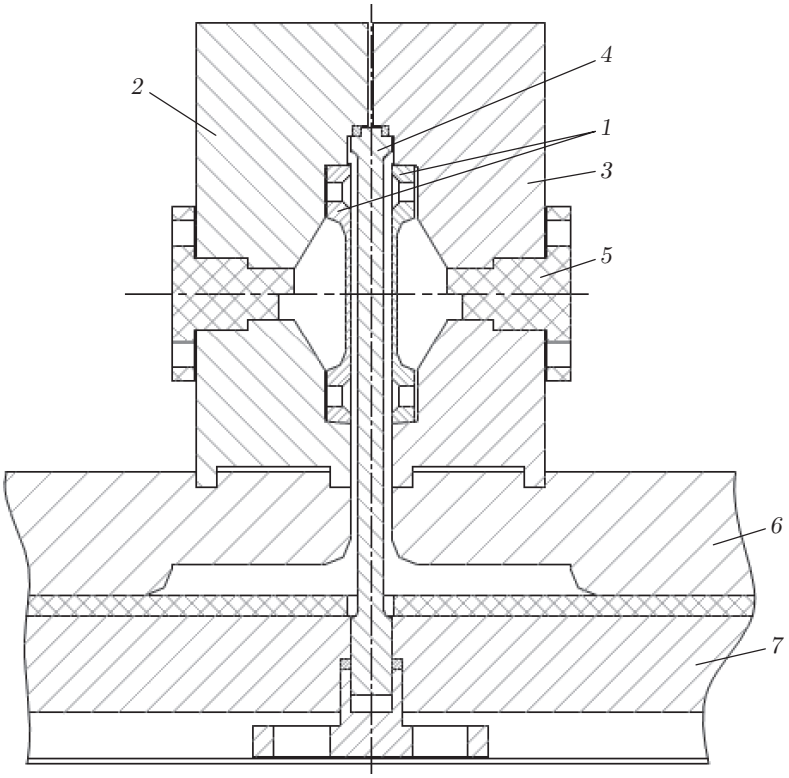

Рис. 2. Устройство для метания лайнеров:
1 — плоские лайнеры, *2, 3* — внешние электроды, *4* — центральный плоский электрод, *5* — приемник (измерительный блок), *6, 7* — подводящие шины токосборника установки

в диапазоне значений давления вплоть до 10 ТПа. В качестве материала мишени выбрана медь. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, уравнение состояния меди известно в диапазоне давлений вплоть до 1 ТПа, а с другой — выбор меди позволяет проводить измерения методом торможения [6].

Для регистрации скоростей использовались электроконтактные датчики. С их помощью непосредственно измеряется скорость лайнера при подлете к мишени и скорость ударной волны в веществе. Если мишень и лайнер изготовлены из одного и того же материала, то с учетом симметрии массовая скорость в мишени равна половине скорости ударника. Для меди при давлениях до 927 ГПа [1] волновая скорость определяется по формуле

$$D = 3{,}9 + 1{,}534u - 0{,}0096u^2, \qquad P = 8{,}93uD,$$

где u — массовая скорость; P — давление.

Эксперименты выполнялись на конденсаторной установке “Каскад” с устройством, схема которого показана на рис. 2. Отработка конструкции и методологии проведения эксперимента также осуществлена на конденсаторной установке “Каскад”.

Выполнялся симметричный разгон двух внешних токопроводов (лайнеров) одинаковой толщины в противоположных направлениях от внутреннего токопровода, выполненного из листа стали толщиной 4 мм. Ток проходил по центральному плоскому электроду *4* и возвращался по симметрично установленным относительно него двум плоским лайнерам (см. рис. 2). Высота плоской части лайнеров равна 40 мм, ширина — 50 мм. Лайнеры устанавливались таким образом, чтобы их плоская часть располагалась симметрично относительно шейки центрального электрода. Геометрия центрального плоского электрода представлена на рис. 3. Ширина шейки центрального электрода равна 20 мм, высота —

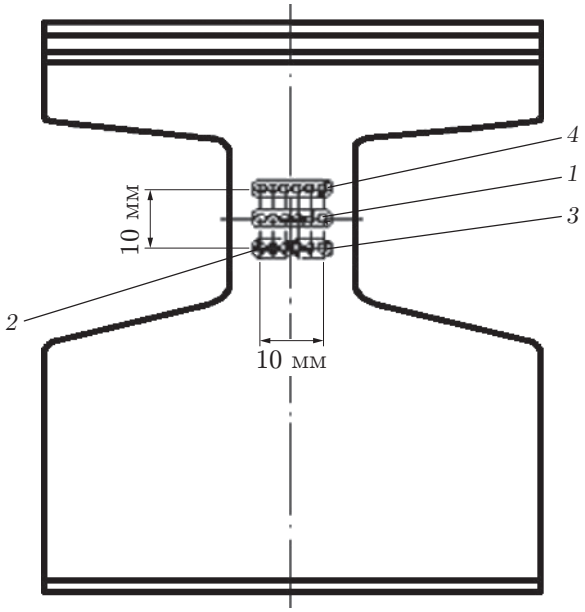

Рис. 3. Схема центрального плоского электрода:
1 — датчики уровня 1, *2* — датчики уровня 2, *3* — датчики уровня 3, *4* — датчики уровня 4

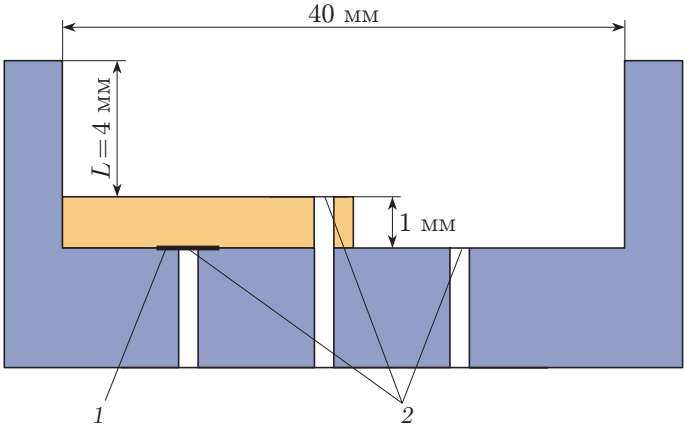

Рис. 4. Схема расположения датчиков:
1 — тонкая пленка из изоляционного материала, *2* — уровни, на которых размещены датчики

20 мм. Начальная величина зазора между центральным электродом и любым лайнером равна 2 мм. Длина базы полета лайнеров составляла приблизительно 5 мм, сила разрядного тока — 5 МА. Это препятствовало разрушению основных деталей экспериментального устройства.

Схема расположения контактных датчиков штыревого типа для измерения скорости полета лайнера и скорости распространения ударной волны в меди приведена на рис. 4 (L — длина базы полета лайнера).

Датчики размещены на четырех уровнях.

На первом уровне находятся шесть датчиков, расположенных в одну линию на расстоянии от лайнера, равном 4 мм. Диаметр датчиков равен 0,6 мм. Расстояние между соседними датчиками составляет 2 мм. Сравнение показаний этих датчиков позволяет

судить о симметрии полета лайнера в направлении, перпендикулярном направлению протекания тока в нем.

На втором и третьем уровнях находится по три датчика, расположенных в одну линию на расстоянии от лайнера, равном 5 и 6 мм соответственно. Сравнение показаний этих датчиков с показаниями датчиков на первом уровне позволяет получить значения скорости лайнера при различной длине базы разгона.

На четвертом уровне находятся шесть датчиков, расположенных в одну линию под поверхностью образца из меди. Между поверхностью образца и датчиками находится тонкая пленка из изоляционного материала. Сравнение показаний этих датчиков с показаниями датчиков на первом уровне позволяет получить значение скорости распространения ударной волны в меди и вычислить давление по формуле

$$P = \rho_0 u D,$$

где ρ_0 — начальная плотность меди.

Расположение матрицы с отверстиями для установки датчиков на разных уровнях в проекции на центральный электрод показано на рис. 3.

Для исключения влияния воздушной ударной волны на результаты измерений пространство между лайнером и приемником было вакуумировано таким образом, чтобы длина свободного пробега молекул воздуха была значительно больше длины базы полета лайнера.

Результаты экспериментов по отработке электроконтактной методики измерения. С целью отработки методики измерения лайнеры изготавливались из листа алюминия толщиной 1 мм. Установлено, что разновременность срабатывания соседних контактов, расположенных на одном уровне, составляет ± 3 нс (среднеквадратичный разброс экспериментальных данных по результатам 18 измерений) на временном интервале $300 \div 500$ нс при скорости лайнера, приближенно равной 3 км/с. Это означает, что относительная погрешность измерения составляет приблизительно 1 %. Типичная осциллограмма срабатывания электроконтактов приведена на рис. 5.

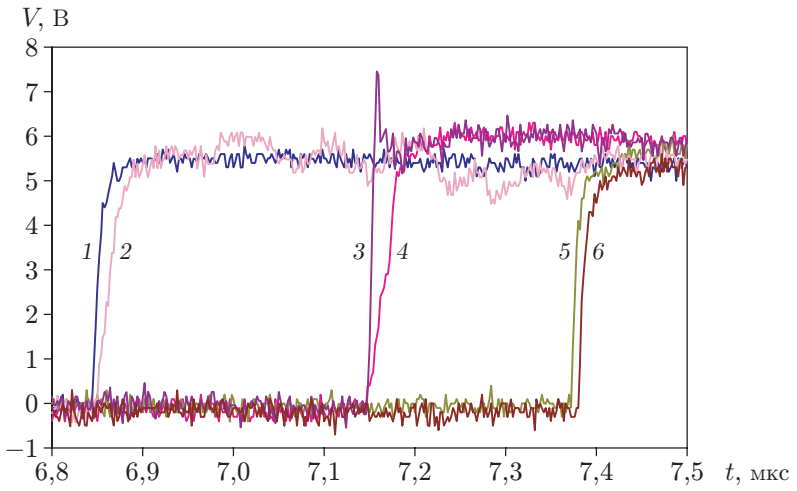

Рис. 5. Осциллограмма срабатывания пар контактов, расположенных на разных уровнях:

1, 2 — показания датчиков, расположенных на первом уровне, *3, 4* — показания датчиков, расположенных на четвертом уровне, *5, 6* — показания датчиков, расположенных на третьем уровне

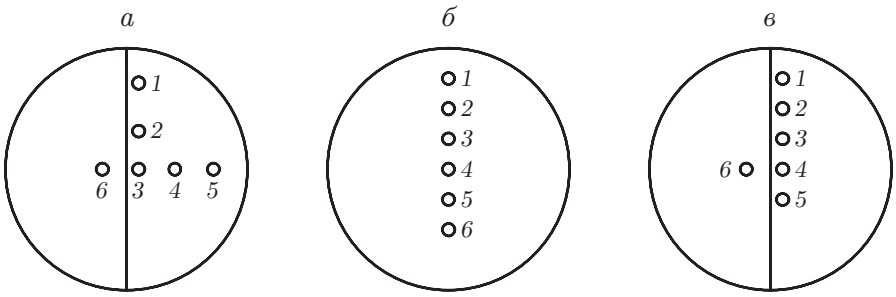

Рис. 6. Схема расположения датчиков в экспериментах:
а–в — варианты расположения датчиков; *1–6* — номера датчиков

Расчеты скорости полета лайнера показали, что скорость в эксперименте составила 3,1 км/с при силе тока в цепи 3,2 МА. Волновая скорость ударной волны в меди, рассчитанная по времени прохождения базы длиной 1,4 мм, составила 5,40 км/с, скорость, рассчитанная по уравнению состояния меди [1], равна 5,39 км/с. Следует отметить, что эти значения хорошо согласуются.

Результаты экспериментов по определению симметрии подлета участков лайнеров к нагружаемой поверхности. Лайнеры изготавливались из листа меди толщиной 1 мм. Для определения симметрии подлета пластин-лайнеров использовались схемы, приведенные на рис. 6. Центры больших окружностей совпадают с центрами лайнеров. Направление протекания тока — снизу вверх. Расстояние между центрами соседних датчиков составляло 2,5 мм. Датчики, расположенные слева от вертикальной линии на рис. 6,*а,в*, находились на расстоянии от лайнера, на 1,5 мм превышающем расстояние, на котором находились остальные датчики, и служили для измерения скорости лайнера.

На рис. 7, 8 приведены полученные по результатам нескольких экспериментов профили поверхности центральной зоны лайнера с размерами 20×20 мм, соответствующими размерам шейки центрального электрода, в момент удара по приемнику вдоль линии тока и перпендикулярно ей соответственно.

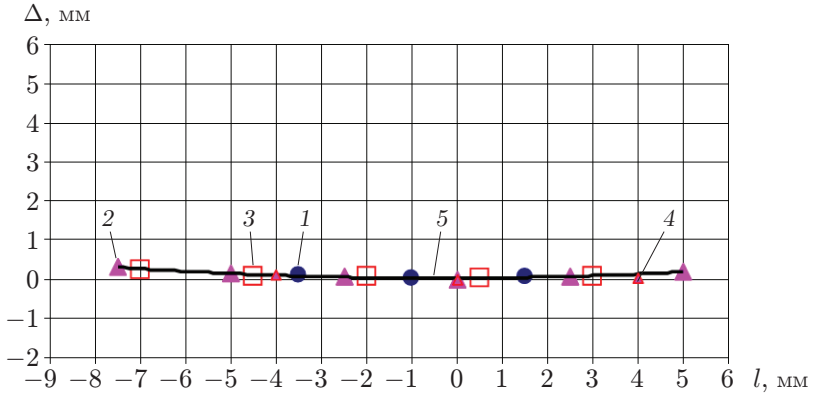

Рис. 7. Профиль центральной зоны плоского лайнера вдоль линии тока в момент удара по измерительному блоку:
1 — эксперимент 1, *2* — эксперимент 2, *3* — эксперимент 3, *4* — эксперимент 4, *5* — аппроксимация экспериментальных данных

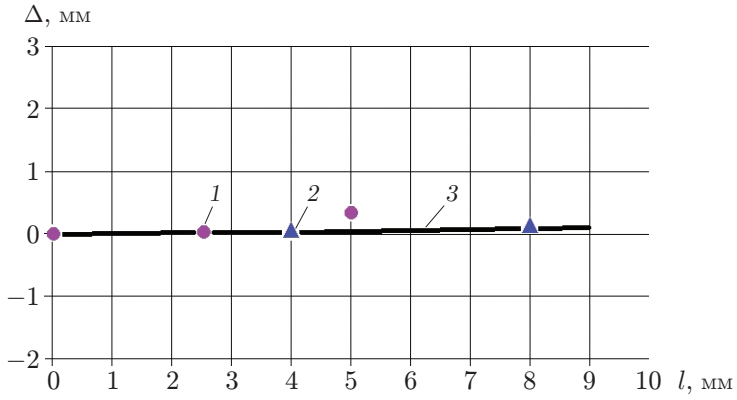

Рис. 8. Профиль центральной зоны плоского лайнера перпендикулярно линии тока в момент удара по измерительному блоку:
1 — эксперимент 1, *2* — эксперимент 4, *3* — аппроксимация экспериментальных данных

Анализ результатов экспериментов показывает, что наблюдается опережение центральной зоны лайнера как вдоль линии тока, так и перпендикулярно ей. Форма поверхности в центральной зоне лайнера вдоль линии тока представляет собой дугу окружности радиусом 100 мм. Величина, на которую центральная зона протяженностью 8 мм опережает периферийные зоны вдоль линии тока, не превышает 0,1 мм. Разброс результатов экспериментов приблизительно соответствует погрешности измерений ($\sigma = \pm 3$ нс). Величина отставания участков лайнера, расположенных перпендикулярно линии тока на расстояниях 2,5; 5,0; 8,0 мм от центра, равна 0,015; 0,300; 0,040 мм соответственно, т. е. в точке $l = 5$ мм наблюдалось более существенное отклонение Δ. По-видимому, этот результат является случайным (например, вследствие дефекта датчика, не замеченного при его установке), поскольку получен только в одном эксперименте. Поэтому линия профиля лайнера в момент удара по измерительному блоку построена без учета этого отклонения.

Отставание периферийных участков лайнера, зарегистрированное при подлете к приемнику в направлении вдоль линии тока, объясняется контактным зажатием лайнера на его внешней границе, в поперечном направлении — уменьшением напряженности магнитного поля в направлении к свободным краям лайнера. Сравнение рис. 7 и 8 показывает, что вдоль линии тока наблюдается более существенное отставание периферийных точек лайнера, чем в направлении, перпендикулярном линии тока (0,10 и 0,04 мм соответственно), т. е. влияние контактного зажатия в данном случае является более значительным.

Заключение. На стационарной конденсаторной установке “Каскад” проведены эксперименты по ускорению плоских лайнеров до скоростей, приближенно равных 3 км/с. Результаты экспериментов показывают, что лайнеры можно разгонять достаточно симметрично (отношение величины отклонения формы пластины от плоской формы на базе полета длиной 5 мм составляет $\Delta l/l \approx 1{,}25$ %) и, следовательно, использовать при проведении исследований в случае высоких плотностей энергии.

Зарегистрировано отставание периферийных точек лайнеров при подлете к приемнику как в направлении вдоль линии тока, так и в поперечном направлении. По периметру зоны размером 8×8 мм наиболее существенная величина отставания относительно центральной зоны не превышает 0,1 мм, что соответствует отставанию по времени 0,033 мкс при скорости подлета лайнера 3 км/с. Максимальное отставание наблюдается вдоль линии тока вследствие контактного зажатия лайнера по краям, соединяющим его с центральным токопроводом, что приводит к центральной асимметрии участков лайнера при подлете.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Asay J., Knudson M., Hall C., Hanson D.** Recent advances in high-pressure equation-of-state capabilities using fast pulsed power tecniques // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сб. тез. и докл. Междунар. конф. “III Харитоновские тематические научные чтения”, г. Саров (Россия), 26 февр. — 2 марта 2001 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2002. С. 76.
2. **Knudson M. D.** Advances in pulsed power and MHD technologies to enable high pressure material dynamics studies // Proc. of the 15th Intern. conf. on high-power particle beams, St. Petersburg (Russia), July 18–23, 2004. S. l., 2004.
3. **Буйко А. М., Буренков О. М., Гаранин С. Ф. и др.** Эффективность использования электровзрывных открывающих ключей для дисковых ВМГ с энергией 100 МДж при различных индуктивных нагрузках // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения: Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, г. Саров (Россия), 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. Т. 1. С. 428.
4. **Ивановский А. В.** Высокоскоростные плоские ударники, ускоряемые током взрывомагнитных генераторов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Материалы Междунар. конф. “IV Харитоновские тематические научные чтения”, г. Саров (Россия), 14–18 марта 2005 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2005. С. 506–511.
5. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
6. **Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудоладов И. П. и др.** Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // ПМТФ. 1981. № 2. С. 3–34.

Поступила в редакцию 19/X 2021 г.,
после доработки — 29/XII 2021 г.
Принята к публикации 31/I 2022 г.