

УДК 537.63, 537.84

ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ КАСКАДИРОВАНИЯ

В. К. Баранов*, А. М. Глыбин*, А. Г. Голубинский*,
Б. Е. Гриневич*, П. В. Дудай*, А. А. Зименков*,
А. В. Ивановский**, А. И. Краев*,
В. И. Мамышев*, Н. И. Ситникова*

* Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

** Саровский физико-технический институт, 607189 Саров, Россия
E-mails: baranov@elph.vniief.ru, glybin@elph.vniief.ru, golubinsky@elph.vniief.ru,
bgr@elph.vniief.ru, duday@elph.vniief.ru, zimenkov@elph.vniief.ru, ivanovsky@elph.vniief.ru,
krayev@elph.vniief.ru, V.I.Mamyshev@vniief.ru, sitnikova@elph.vniief.ru

Предложен способ уменьшения характерного времени действия импульса, создаваемого взрывомагнитными генераторами. Проведен эксперимент, результаты которого подтверждают возможность реализации такого способа на практике.

Ключевые слова: дисковый взрывомагнитный генератор, цилиндрический конденсированный лайнер, взрывчатое вещество, каскадная система, ударник.

DOI: 10.15372/PMTF20200408

Введение. Взрывомагнитные генераторы — устройства, позволяющие накапливать в относительно небольшом объеме энергию магнитного поля, составляющую сотни мегаджоулей. Эта энергия с эффективностью до 60 % может быть преобразована в кинетическую энергию металлического лайнера. Для определения уравнений состояния материалов при больших динамических нагрузках широко используется ускорение конденсированных лайнеров с помощью взрывчатых веществ (ВВ) до скоростей порядка нескольких километров в секунду. В плоской геометрии при непосредственном контакте ударников с ВВ можно сообщить им скорость до $5 \div 6$ км/с [1, 2]. При этом давление в испытываемых образцах может достигать 200 ГПа.

Одним из способов увеличения скорости металлических лайнеров является использование слоистых и каскадных систем [3–9]. Каждый каскад состоит из двух слоев: легкого внешнего и тяжелого внутреннего. Легкий слой затягивает импульс давления при ударе и служит для более полной передачи импульса от каскада к каскаду. Тяжелый слой аккумулирует основную энергию.

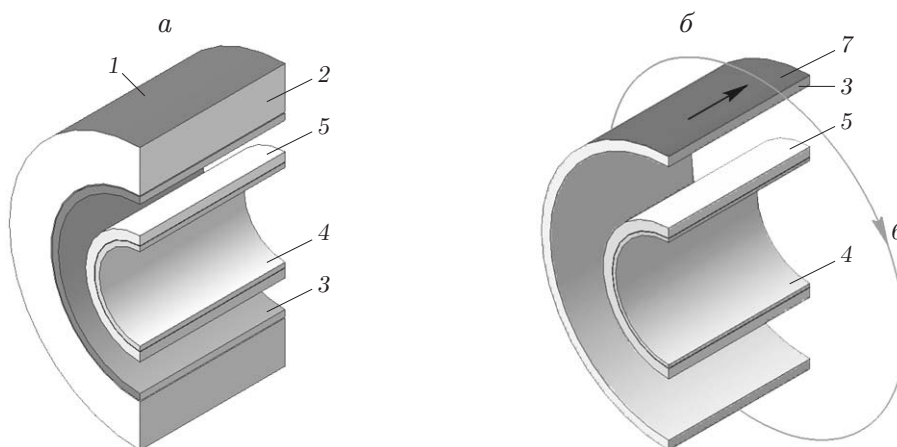


Рис. 1. Схемы устройств, используемых при газодинамическом (а) и электродинамическом (б) способах разгона лайнеров:

1 — поверхность, на которой инициируется ВВ, 2 — заряд ВВ, 3 — лайнер, 4 — ударник, 5 — легкая оболочка; 6 — силовые линии магнитного поля, 7 — поверхность, на которой приложено давление

В экспериментах каскадные системы применялись для разгона молибденовой фольги и тонких медных пластин. В трехкаскадной системе максимальная скорость молибденовой фольги и медных пластин толщиной 0,1 мм составляла 11,3 км/с [9]. Большие скорости могут достигаться в сходящейся геометрии: сферической или цилиндрической. Наибольшие скорости достигаются при сферическом сжатии, однако при этом существенно затруднена диагностика системы. Более перспективным направлением представляется проведение опытов в цилиндрической геометрии. В этом случае ускорение лайнеров может осуществляться как газодинамическим способом (с использованием конденсированных ВВ), так и электродинамическим (ускорение проводника магнитным полем) (рис. 1).

По сравнению с газодинамическим способом разгона лайнеров электродинамический способ имеет следующие преимущества:

1) плавный разгон лайнера (без образования ударных волн), обуславливающий отсутствие асимметрии или неустойчивости вследствие неоднородности состава ВВ и разновременности его инициирования;

2) возможность реализации более высокого давления и регулирования его величины и времени нарастания.

Известно, что применение взрывамагнитных генераторов для ускорения лайнеров давлением магнитного поля позволяет сообщить лайнеру кинетическую энергию порядка нескольких десятков мегаджоулей [10]. В работах [11–13] описаны результаты эксперимента, в котором алюминиевому лайнеру массой 1 кг была сообщена скорость, приблизительно равная 8,4 км/с, недостижимая при разгоне лайнеров продуктами детонации современных ВВ. При этом кинетическая энергия лайнера составила $25 \div 30$ МДж. Это позволяет уменьшить количество каскадов при заданной скорости ударника (тяжелой оболочки последнего каскада) по сравнению с количеством каскадов, используемых при газодинамическом способе разгона.

В работе [14] приведены результаты расчетов рабочих параметров дискового взрывамагнитного генератора (ВМГ) диаметром 0,4 м с двухкаскадной системой и дискового ВМГ диаметром 1 м с трехкаскадной системой. Расчетная скорость титанового ударника толщиной 1 мм при подлете к цилиндрической мишени радиусом 10 мм в двухкаскадной системе составила приблизительно 18 км/с, в трехкаскадной — 54,45 км/с. Эти значения соответствуют давлению в мишени 600 и 4950 ГПа соответственно.

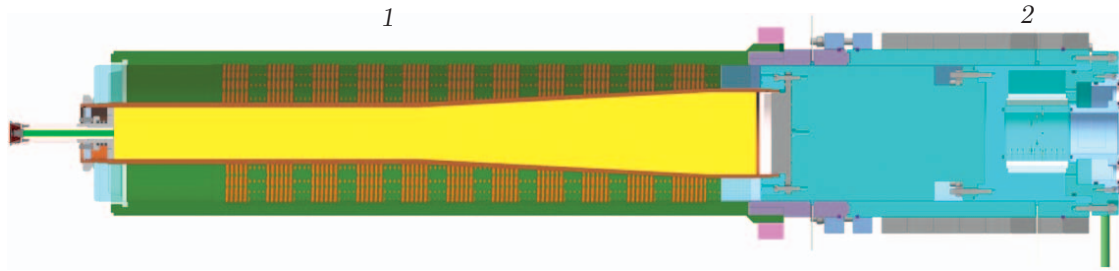


Рис. 2. Схема экспериментального устройства:
1 — СВМГ, 2 — лайнерный узел

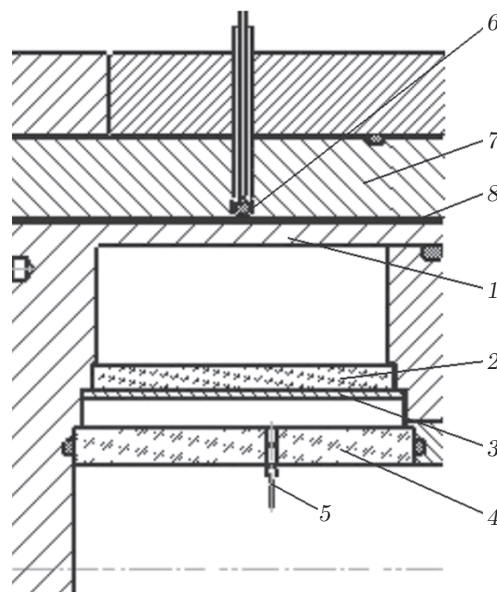


Рис. 3. Расположение основных элементов лайнерного узла:
1 — лайнер, 2 — легкая оболочка, 3 — ударник (тяжелая оболочка), 4 — центральный измерительный блок, 5 — PDV-датчик, 6 — B-dot-датчик, 7 — обратный токопровод, 8 — входной изолятор

В экспериментах, описываемых в данной работе, для ускорения цилиндрического лайнера с последующим увеличением концентрации энергии путем установки под лайнер однокаскадной системы, состоящей из пары оболочек, изготовленных из легкого и тяжелого материалов, использовался спиральный ВМГ с относительно небольшой энергией, передаваемой лайнерному узлу (приблизительно 3 МДж). Исследовались возможность создания и эффективность работы экспериментального устройства на основе ВМГ при разгоне ударника методом каскадирования.

Описание экспериментального устройства. С целью реализации каскадного метода разгона ударника магнитным полем разработано экспериментальное устройство, состоящее из спирального ВМГ и лайнерного узла (рис. 2).

Основными элементами лайнерного узла являлись лайнер, легкая оболочка, ударник и центральный измерительный блок (рис. 3).

Моделирование процесса разгона лайнера. Целью численного моделирования являлось определение максимальной скорости, приобретаемой ударником в результате ударного воздействия цилиндрического лайнера, разгоняемого давлением магнитного поля.

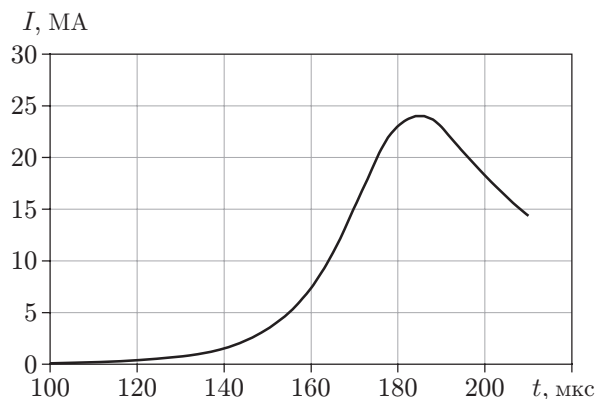


Рис. 4

Рис. 4. Расчетная зависимость силы тока в лайнерной нагрузке от времени

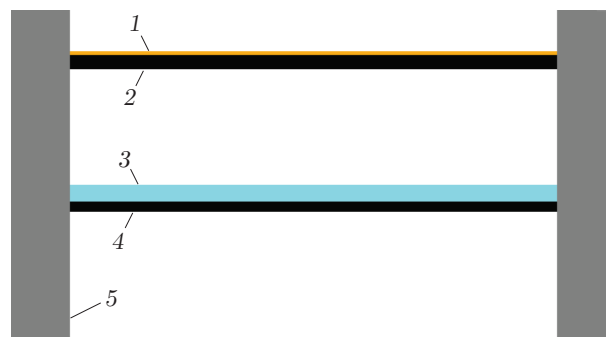


Рис. 5

Рис. 5. Схема каскадной системы:

1 — область, в которой приложено давление магнитного поля, 2 — лайнер, 3 — легкая оболочка, 4 — ударник (тяжелая оболочка), 5 — стенка

Сила тока, протекающего по лайнеру и стенкам лайнерного узла, показанного на рис. 2, определялась по соотношениям

$$\Phi(t) = \Phi_c(t) - \iint E \, dl \, dt, \quad L(t) = L_c(t) + L_v(t),$$

где $\Phi(t)$ — магнитный поток во всем устройстве; $\Phi_c(t)$ — магнитный поток в спиральном ВМГ в режиме работы на нагрузку, включающую переходную линию к лайнеру и индуктивность входного изолятора; $\iint E \, dl \, dt$ — интегральные по времени потери магнитного потока в стенках токового контура; $L_c(t)$ — индуктивность спирального ВМГ, включающая индуктивность переходной линии к лайнеру и индуктивность входного изолятора; $L_v(t)$ — индуктивность полости между входным изолятором, стенками и лайнером. Сила тока вычисляется по формуле $I(t) = \Phi(t)/L(t)$. Характеристики движения лайнера рассчитывались по одномерной магнитогидродинамической модели в лагранжевых координатах.

Результаты предварительных расчетов характеристик движения лайнера (давление магнитного поля в зависимости от радиуса и силы тока) использованы при моделировании работы каскадной системы с помощью пакета ANSYS AutoDYN. Расчет по программе ANSYS AutoDYN проведен с использованием двумерной модели гидродинамики с учетом упругопластических свойств материалов в координатах Лагранжа — Эйлера. Учитывались деформация стенок и характер деформации лайнера. Для определения скорости лайнера при подлете к легкой оболочке в качестве граничного условия задавалось давление магнитного поля на внешнюю поверхность лайнера. На рис. 4 приведена расчетная зависимость силы тока в лайнерной нагрузке от времени.

Схема каскадной системы представлена на рис. 5. Для каскадной системы определены оптимальные соотношения толщин легкой и тяжелой оболочек каскада, исключающие развитие откольных явлений в ударнике.

С использованием результатов моделирования определены параметры основных элементов лайнерной системы. Длина лайнера составляла 100 мм, остальные параметры лайнерного узла приведены в таблице (h — толщина, r — внешний радиус).

Параметры лайнерного узла

Составляющие каскадной системы	Материал	h , мм	r , мм
Лайнер	Алюминий	8,0	120,0
Легкая оболочка	Оргстекло	8,5	71,5
Ударник	Алюминий	3,0	63,0
Стенки	Алюминий	20,0	—

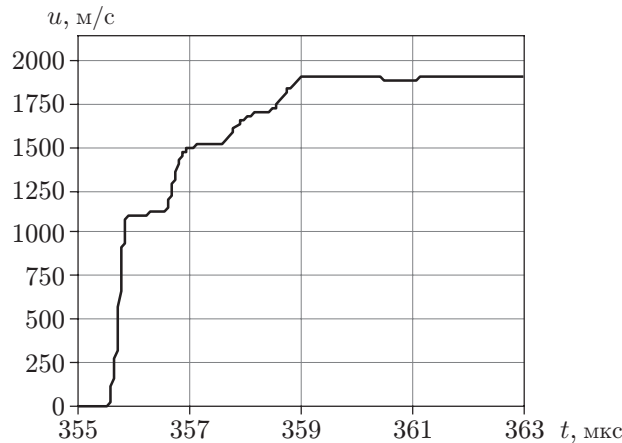


Рис. 6. Расчетная зависимость скорости тяжелой оболочки от времени

На рис. 6 представлена расчетная зависимость скорости тяжелой оболочки от времени. Скорость лайнера в момент подлета к каскаду составила 1,12 км/с. Из рис. 6 следует, что скорость тяжелой оболочки изменяется скачкообразно: первому скачку соответствует скорость тяжелой оболочки каскада $u \approx 1,1$ км/с, второму — $u \approx 1,5$ км/с, третьему — $u \approx 1,68$ км/с. Конечная скорость оболочки составила $u \approx 1,92$ км/с.

Методика измерений. С целью определения режима токового нагружения в эксперименте регистрировались производная силы тока и сила тока конденсаторной батареи, производная силы тока, протекающего в нагрузке по лайнеру.

При измерении параметров тока устройства использовалась методика измерения силы тока на основе индукционных В-dot-датчиков. Четыре азимутально расположенных датчика размещались непосредственно в лайнерном узле (см. рис. 3).

Для измерения производной силы тока и силы тока запитки спирального ВМГ использовался дифференцирующий пояс Роговского, который устанавливался в цепи разряда конденсаторной батареи.

Скорость внутренней поверхности ударника регистрировалась с помощью оптогетеродинного комплекса ЛОГК-32 на основе методики PDV (photon Doppler velocimetry).

Результаты измерений параметров тока устройства. На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости силы тока и ее производной от времени. Здесь и далее отсчет времени ведется с момента подрыва спирального ВМГ. Результаты измерений показывают, что при начальной силе тока запитки $I \approx 56$ кА спиральный ВМГ обеспечивает силу тока в лайнерной нагрузке $I \approx 24$ МА. Максимальная производная силы тока составила $9,5 \cdot 10^{11}$ А/с.

Совпадение кривых зависимости производной силы тока в лайнерном узле от времени, полученных с помощью четырех датчиков (см. рис. 7,б), азимутальный угол между которыми равен 90° , свидетельствует о равномерном распределении тока по азимутальному углу и, следовательно, об отсутствии асимметрии нагружения по азимуту.

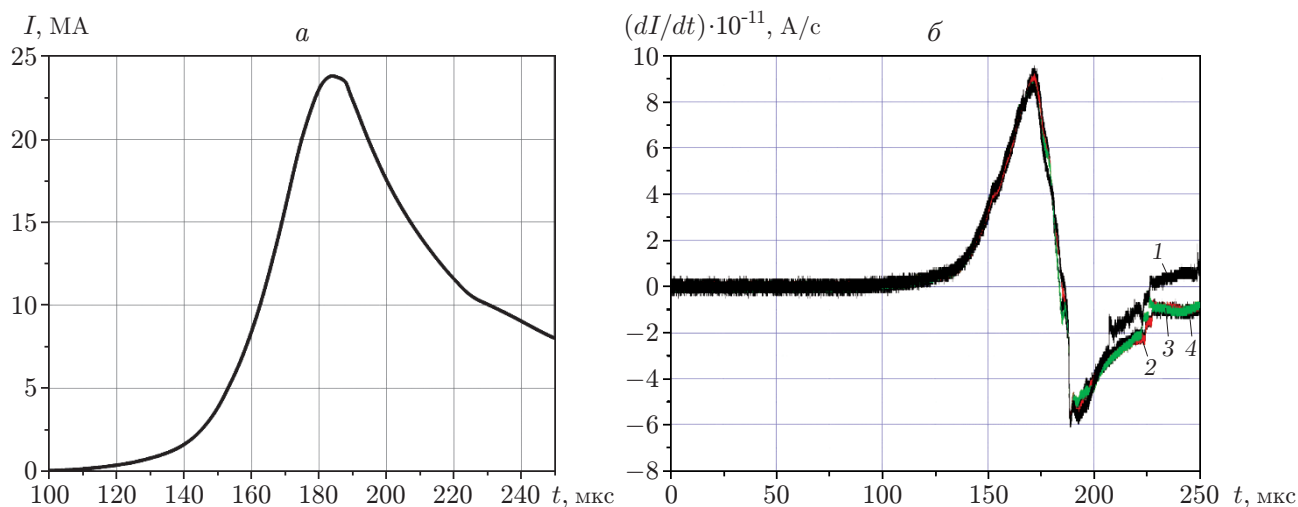


Рис. 7. Экспериментальные зависимости силы тока в лайнерном узле (а) и ее производной, определенной по данным четырех (1–4) датчиков (б), от времени

Результаты измерений скорости ударника. На рис. 8 приведены все кривые, полученные с помощью датчиков PDV. Кривые смещены к одному начальному моменту времени. Анализ кривых на рис. 8 показывает, что конечная скорость тяжелой оболочки каскада равна $u = (1,90 \pm 0,03)$ км/с.

На рис. 9 приведены осредненная по результатам измерений с помощью датчиков PDV кривая $u_{exp}(t)$ и кривая $u_{mod}(t)$, построенная по результатам численного моделирования. В результате использования каскада скорость увеличилась в $1,90/1,12 = 1,7$ раза.

Результаты эксперимента показали, что, зная любую из скоростей u_1 , u_2 , u_f , можно определить скорость лайнера (считая, что уравнения состояния являются достаточно точными), а по скорости лайнера можно вычислить силу тока.

На рис. 9 видно, что расчетная и экспериментальная кривые совпадают во всем временном диапазоне, за исключением диапазона $358,0 \text{ мкс} \leq t \leq 358,5 \text{ мкс}$. Следует отметить, что фронты экспериментальной кривой (см. рис. 9) более крутые, чем фронты

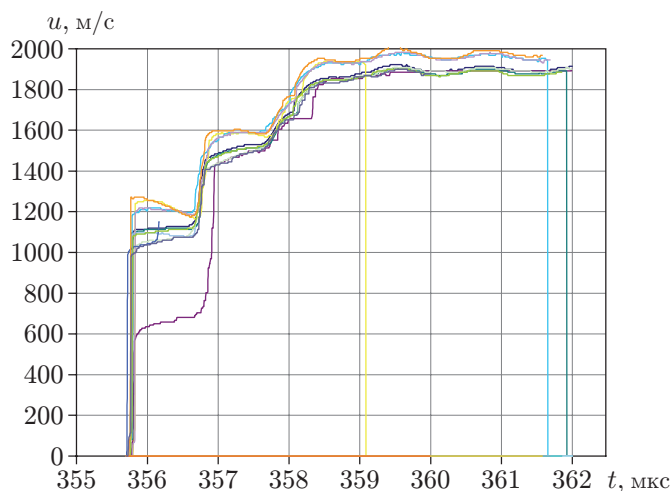


Рис. 8. Экспериментальные зависимости скорости тяжелой оболочки от времени, полученные с помощью датчиков PDV

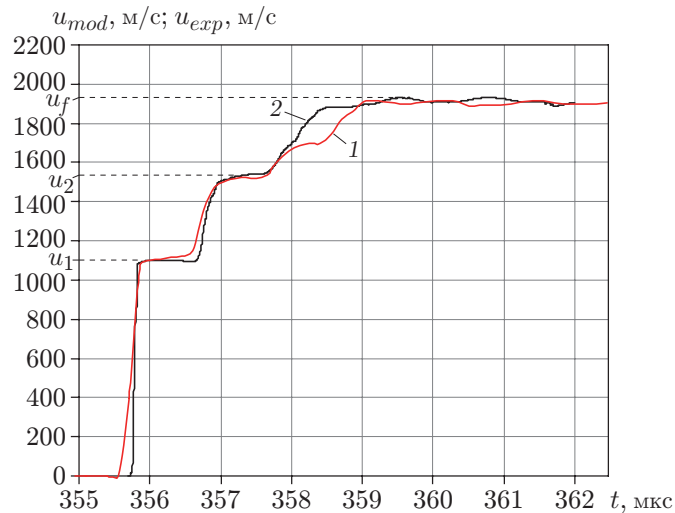


Рис. 9. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости скорости оболочки от времени

расчетной кривой. Крутизна фронтов свидетельствует о высоком качестве оболочки каскада, используемой в роли ударника.

Заключение. Испытано устройство, состоящее из взрывомагнитного генератора и лайнерного узла с одним каскадом. Скорость тяжелой оболочки каскада составила 1,9 км/с, что в 1,7 раза превышает скорость, которая была сообщена лайнеру магнитным полем. Результаты эксперимента, хорошо согласующиеся с данными предварительных расчетов скорости по программе ANSYS AutoDYN, показали перспективность данного направления исследования при разработке способов ускорения конденсированных лайнеров до скоростей порядка десятков километров в секунду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физ. наук. 1965. Т. 85, вып. 2. С. 197–257.
2. Альтшулер Л. В., Бушман А. В., Жерноклетов М. В. и др. Изэнтропы разгрузки и уравнения состояния металлов при высоких плотностях // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1980. Т. 78, № 2. С. 741–760.
3. Забабахин Е. И. Механика в СССР за 50 лет. М.: Изд-во АН СССР, 1967. Т. 2.
4. Терновой В. А. Получение высоких скоростей метания при использовании взрывных линейных устройств // Динамика сплошной среды / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1980. Вып. 48. Нестационарные проблемы гидродинамики. С. 141–145.
5. Иванов А. Г., Коротченко М. В., Новицкий Е. З. и др. Разгон пластин до гиперзвуковых скоростей // ПМТФ. 1982. № 2. С. 86–90.
6. Foules G. R., Leung C., Rabue R., Shaner J. Acceleration of flat plates by multiple staging // High-pressure science and technology: Proc. of the 6th AIRAPT conf., Boulder (USA), 1977. N. Y.: Springer Sci., 1979. V. 2. P. 1943–1951. DOI: 10.1007/978-1-4684-7470-1_236.
7. Попов Н. А., Щербаков В. А., Минеев В. Н. и др. О термоядерном синтезе при взрыве сферического заряда (проблема газодинамического термоядерного синтеза) // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 10. С. 1087–1094.

8. **Имховик Н. А., Мачнева И. П., Соловьев В. С.** Влияние характеристик основного и промежуточного зарядов взрывчатого вещества на скорость пластин в каскадной системе // Оборон. техника. 1997. № 8/9. С. 28–36.
9. **Глушак Б. Л., Жарков А. П., Жерноклетов М. В.** Экспериментальное изучение термодинамики плотной плазмы металлов при высоких концентрациях энергии // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1989. Т. 96, вып. 4. С. 1301–1318.
10. **Гриневиц Б. Е., Демидов В. А., Ивановский А. В., Селемир В. Д.** Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 4. С. 422–427.
11. **Reinovsky R. E., Anderson B. G., Clark D. A., et al.** HEL-1: a DEMG based demonstration of solid liner implosion at 100 MA // Proc. of the 11th IEEE Intern. pulsed power conf., Baltimore, June 29 — July 2, 1997. Baltimore: Maryland, 1997. P. 378–383.
12. **Chernyshev V. K., Mokhov V. N., Buzin V. N., et al.** Study of high-energy liner compression in HEL-1 experiment // Proc. of the 11th IEEE Intern. pulsed power conf., Baltimore, June 29 — July 2, 1997. Baltimore: Maryland, 1997. P. 566–572.
13. **Clark D. A., Anderson B. G., Ekhdahl C. A., et al.** High energy imploding liner experiment HEL-1: experimental results // Proc. of the 11th IEEE Intern. pulsed power conf., Baltimore, June 29 — July 2, 1997. Baltimore: Maryland, 1997. P. 1369–1374.
14. **Grinevich B. E., Ivanovsky A. V., Klimushkin K. N., et al.** On acceleration of shells by explosive magnetic generators and cascade systems // The 16th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Kashiwa (Japan), Sept. 25–29, 2018. S. l.: IEEE, 2018. P. 116–119.

*Поступила в редакцию 8/X 2019 г.,
после доработки — 24/I 2020 г.
Принята к публикации 2/III 2020 г.*
