

ПРИМЕНЕНИЕ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗГОНА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛАЙНЕРА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СПИРАЛЬНОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Майоров Александр Олегович (oefimova@otd13.vniief.ru), Гриневиц Борис Евгеньевич, Дудай Павел Викторович, Краев Андрей Иванович, Зименков Алексей Александрович, Февралев Алексей Юрьевич, Глыбин Алексей Михайлович, Ситникова Наталья Ивановна, Иванов Евгений Иванович

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

Одним из эффективных методов исследования уравнений состояния и поведения веществ в условиях высокоинтенсивного динамического нагружения является способ соударения цилиндрических образцов с оболочкой, разгоняемой давлением магнитного поля, создаваемого с помощью взрывомагнитного генератора (ВМГ). При этом для сохранения конденсированного состояния оболочки и ее устойчивого полета необходимо обеспечить условия ее максимально возможного ускорения. Данная задача традиционно решается при оснащении ВМГ взрывными и электровзрывными обострителями тока, что позволяет значительно уменьшить время нарастания тока в лайнере, тем самым, обеспечивая ускорение оболочки в соответствии с требуемым режимом нагружения образцов. Подобный метод разгона ударника является достаточно финансово-емким, а также имеет ряд ограничений как физического, так и технологического характера.

В качестве альтернативного решения проблемы в работе предлагается ускорение цилиндрической оболочки с последующим увеличением концентрации энергии путем постановки каскадной системы.

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

APPLICATION OF A CASCADE SYSTEM FOR ACCELERATION OF A CYLINDRICAL LINER BY A MAGNETIC FIELD OF A SPIRAL EXPLOSION MAGNETIC GENERATOR

Mayorov Aleksandr Olegovich (oefimova@otd13.vniief.ru), Grinevich Boris Evgenievich, Dudai Pavel Viktorovich, Kraev Andrey Ivanovich, Zimenkov Aleksey Aleksandrovich, Fevralev Aleksey Yurievich, Glybin Aleksey Mihailovich, Sitnikova Nataliya Ivanovna, Ivanov Evgeniy Ivanovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The method of collision of cylindrical samples with a shell accelerated by the pressure of a magnetic field created using an explosive magnetic generator (EMG) is one of the effective methods for studying the equations of states and behavior of substances under conditions of high-intensity dynamic loading. In this case, in order to preserve the condensed state of the shell and its stable flight, it is necessary to ensure the conditions for its maximum possible acceleration. This problem is traditionally solved by equipping the EMG with explosive and electroexplosive current sharpeners, which makes it possible to significantly reduce the rise time of the current in the liner, thereby providing the shell acceleration in accordance with the required loading mode of the samples. This method of acceleration of the impactor is quite financially intensive, and also has a number of limitations, both physical and technological.

As an alternative solution to the problem, the work proposes the acceleration of a cylindrical shell with a subsequent increase in the energy concentration by setting up a cascade system.

Keywords: spiral explosive magnetic generator, cylindrical condensed liner, explosive, cascade system.

Введение

В настоящее время активно ведутся исследования уравнения состояния и динамических свойств материалов в условиях ударно-волнового нагружения. Для создания высокоинтенсивного нагружения в исследуемых образцах материалов используются различные методы и устройства [1]: метательные устройства пушечного типа; взрывные системы; электрические, электромагнитные и комбинированные ускорители; устройства, основанные на использовании источников излучения (лазерное и рентгеновское излучение, электронные и ионные пучки и т. д.). Каждый из указанных типов ускорителей не всегда может самостоятельно охватить весь необходимый для исследования характеристик вещества диапазон параметров давления, скоростей и масс метаемых тел, длительности импульса нагружения. Поэтому выбор метода нагружения и типа установки определяется конкретной задачей. В электрофизическом отделении ИЛФИ подобные исследования осуществляются методом нагружения (соударения) образцов оболочкой-лайнером, разгоняемой давлением магнитного поля, создаваемого с помощью источников импульсной мощности на основе взрывомагнитных генераторов [2–5].

Спиральные взрывомагнитные генераторы (СВМГ), которые достаточно подробно описаны в открытой литературе [6, 7], являются взрывными устройствами со сравнительно большой начальной индуктивностью, позволяющие формировать в нагрузке мощные импульсы тока с амплитудой в десятки миллионов ампер. Принцип действия таких генераторов основан на эффекте магнитной кумуляции. Генератор состоит из центральной проводящей трубы и коаксиально расположенной внешней цилиндрической спирали (соленоида), переходящей в коаксиальную нагрузку. В трубу помещается цилиндрический заряд ВВ, инициируемый в одной точке с торца со стороны спирали. На электрический контур, образованный трубой, нагрузкой и спиралью, разряжается конденсаторная батарея (рис. 1, а). Под действием продуктов взрыва центральная труба растягивается в виде конуса и ее стенки подлетают к началу спирали. При дальнейшем распространении детонации наблюдается картина, аналогичная продвижению металлического конуса со скоростью детонации внутрь спирали (рис. 1, б): точка соприкосновения конуса со спиралью движется по винтовой линии, число незамкнутых витков спирали уменьшается и соответственно уменьшается индуктивность генератора. Уменьшение индуктивности сопровождается увеличением тока I и магнитной энергии W . При достаточно быстрой деформации контура магнитный поток сохраняется (1).

$$\begin{aligned} \Phi &= LI \approx L_0 I_0, \\ I &= \frac{\Phi}{L} \approx \frac{L_0}{L} I_0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$W = \frac{\Phi^2}{2L} \approx \frac{L_0}{L} W_0,$$

где L_0 , I_0 , W_0 – начальные значения индуктивности, тока и магнитной энергии.

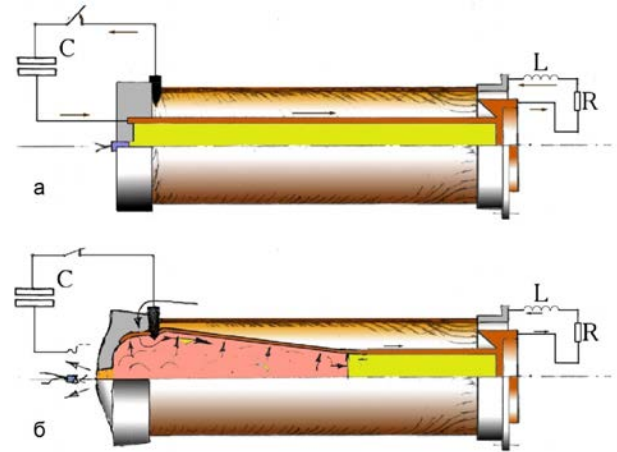


Рис. 1. Принципиальная схема работы СВМГ: а – исходное состояние; б – начальная фаза

Ток, созданный СВМГ, подводится к коаксиальному низко-индуктивному лайнерному узлу. Под действием давления магнитного поля тока СВМГ, реализуется разгон цилиндрического лайнера по направлению к оси и ударное нагружение исследуемого образца-мишени (рис. 2).

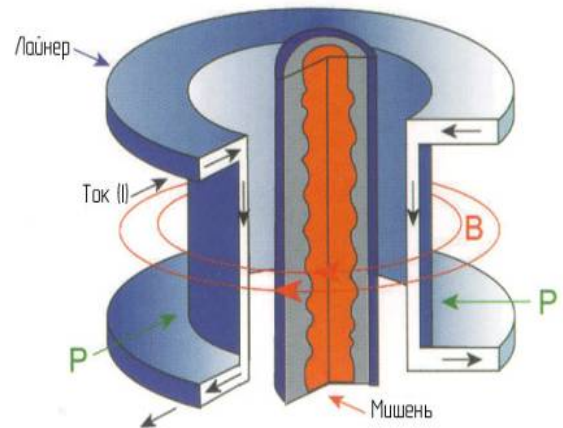


Рис. 2. Схема разгона лайнера магнитным полем

Для сохранения конденсированного состояния лайнера и его устойчивого полета необходимо обеспечить условия ее максимально возможного ускорения. Данная задача традиционно решается при оснащении ВМГ взрывными и электровзрывными обострителями тока, что позволяет значительно уменьшить время нарастания тока в лайнере, тем самым, обеспечивая ускорение оболочки в соответствии с требуемым режимом нагружения образцов.



Рис. 3. Общий вид экспериментального устройства

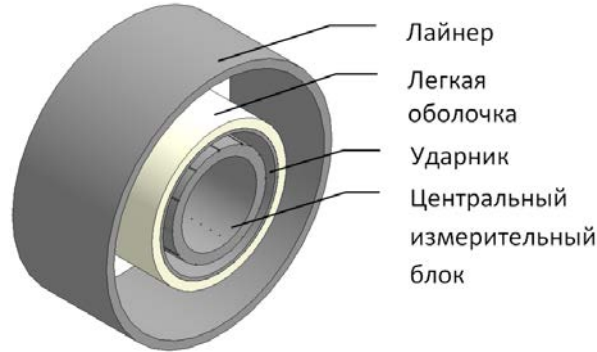


Рис. 4. Расположение основных элементов лайнерного узла

Подобный метод разгона ударника является достаточно финансово емким, а также имеет ряд ограничений как физического, так и технологического характера. В качестве альтернативного решения проблемы в работе предлагается ускорение цилиндрической оболочки с последующим увеличением концентрации энергии путем постановки каскадной системы (лайнерного узла). Идея создания каскадной системы заключается в использовании закона сохранения импульса для получения необходимой скорости ударника.

Постановка эксперимента

Общий вид экспериментального устройства, состоящего из СВМГ и лайнерного узла (ЛУ), приведен на рис. 3.

Основными элементами ЛУ (рис. 4) являются: лайнер, легкая оболочка, ударник и центральный измерительный блок (ЦИБ).

Под действием силы Лоренца лайнер при протекании по нему тока ускоряется и ударно нагружает более легкую оболочку-ударник. Легкая оболочка из оргстекла обеспечивает серию ударных волн нагружения. При этом реализуется многократное воздействие на ударник, что обеспечивает ему большую скорость, чем при однократном режиме соударения лайнера с ударником. Оболочка внутреннего каскада значительно легче лайнера, благодаря чему достигается увеличение ее скорости. Необходимо отметить, что в отличие от классического разгона оболочки

магнитным полем, в данной схеме по ударнику не протекает ток, что означает отсутствие неустойчивостей, обусловленных джоулевым нагревом.

Для регистрации токовых параметров устройства используется методика измерения тока на основе индукционных датчиков, установленных в нагрузку [4]. Датчики располагаются по азимутальному углу в одном сечении для контроля равномерности распределения тока.

Схемы расположения датчиков в ЦИБ представлены на рис. 5.

- Диаметр центрального измерительного блока – 100 мм;

- Скорость внутренней поверхности ударника регистрируется при помощи трех групп коллиматоров, расположенных в ЦИБ согласно схеме на рис. 6. Каждая группа состоит из 4 коллиматоров, расположенных с азимутальным смещением 90° . Относительно края ЦИБ группы датчиков устанавливаются со смещением 40, 50, 60 мм в осевом направлении.

- Скорость наружной поверхности лайнера регистрируется двумя парами азимутально-противоположных коллиматоров, устанавливаемых во внешнем токопроводе (корпусе) лайнерного узла в перпендикулярных плоскостях. В изоляторе ЛУ выполняются диагностические отверстия $\varnothing 10$ мм и закрываются пленкой из лавсана толщиной 50 мкм в один слой.

- Общее количество коллиматоров: 16.

- Дополнительно в ЦИБ устанавливаются две азимутально-противоположных группы контактных

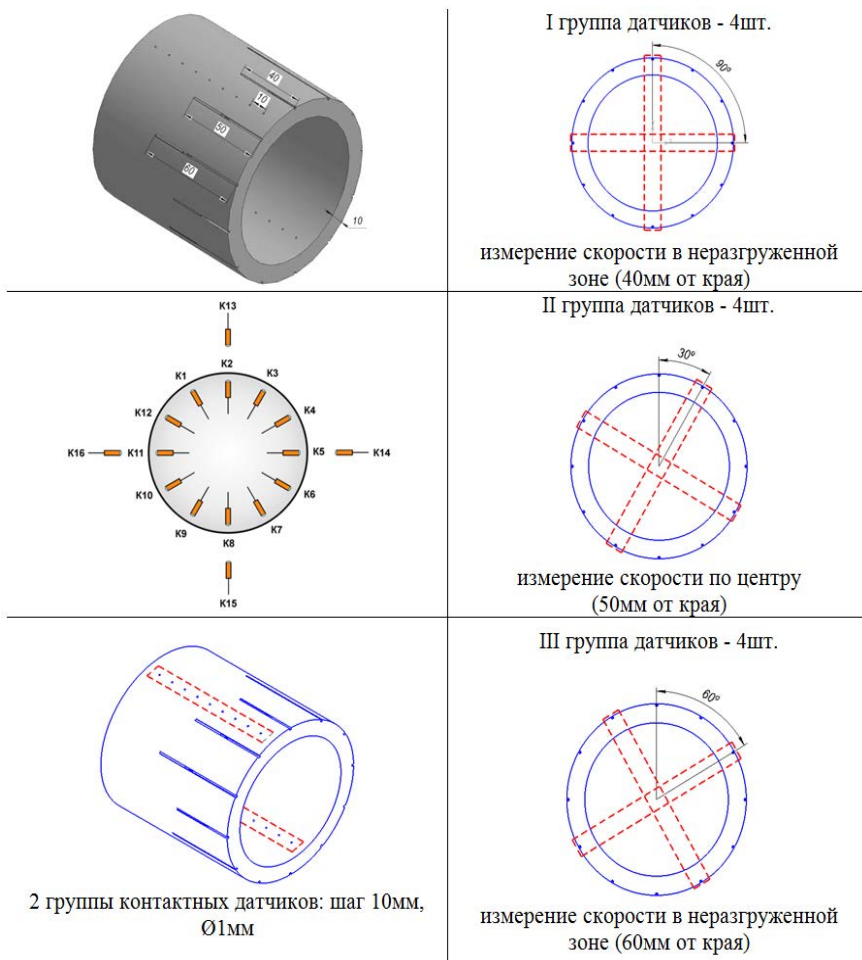


Рис. 5. Схемы расположения датчиков в ЦИБ

датчиков с шагом 10 мм и смещением 5 мм относительно друг друга;

– На каркасе с прямоугольным сечением на выходе СВМГ устанавливаются индукционные датчики.

Для регистрации скорости поверхности лайнера и мишеней применяется 32-х канальный лазерный опто-гетеродинный комплекс ЛОГМИ [8].

Физический принцип ЛОГМИ основан на регистрации доплеровского сдвига частот в отраженном от исследуемой поверхности зондирующем лазерном излучении с помощью дополнительного гетеродинного излучения, суммируемого с отраженным сигналом на поверхности фотодиода.

Результаты эксперимента

Совпадение экспериментальных производных тока, зарегистрированных несколькими датчиками (рис.6), говорит о равномерном распределении тока по азимутальному углу и соответственно об отсутствии азимутальной асимметрии нагружения.

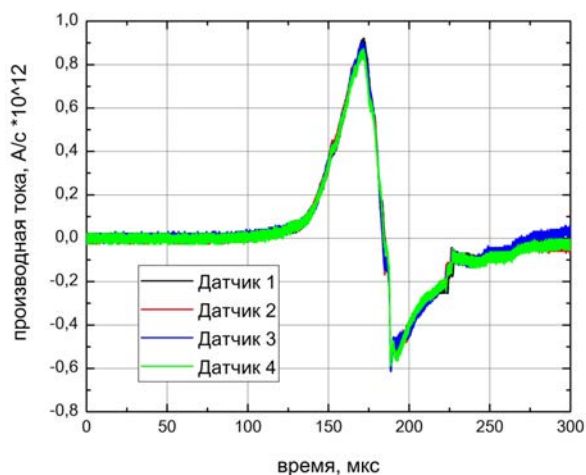


Рис. 6. Зарегистрированные производные тока в нагрузке

В результате расчета работы СВМГ был получен ток 24 МА в лайнере (рис. 7).

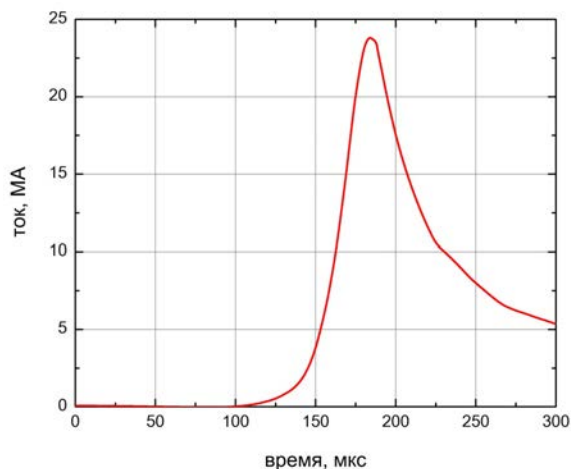


Рис. 7. Ток в нагрузке

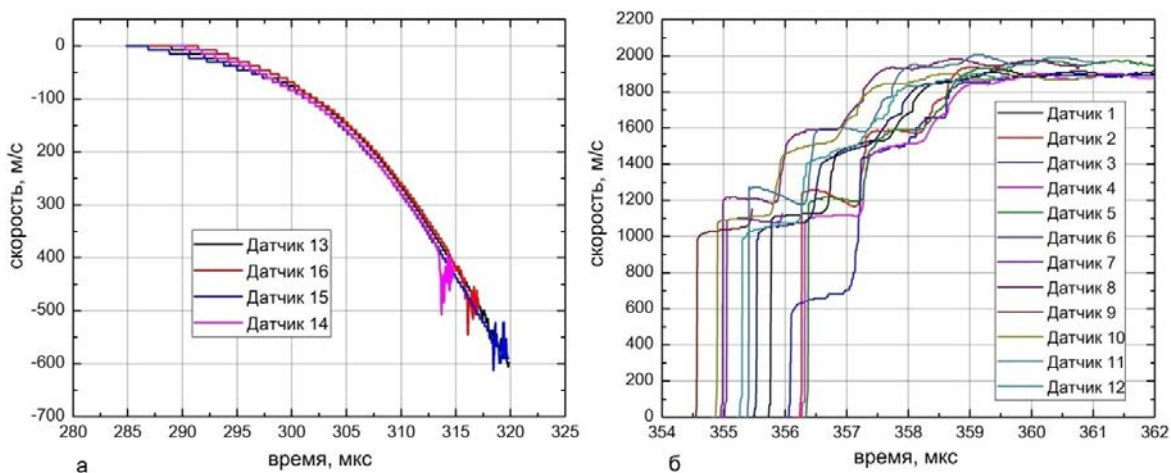


Рис. 8. Временные зависимости скоростей: а – лайнера, б – ударника

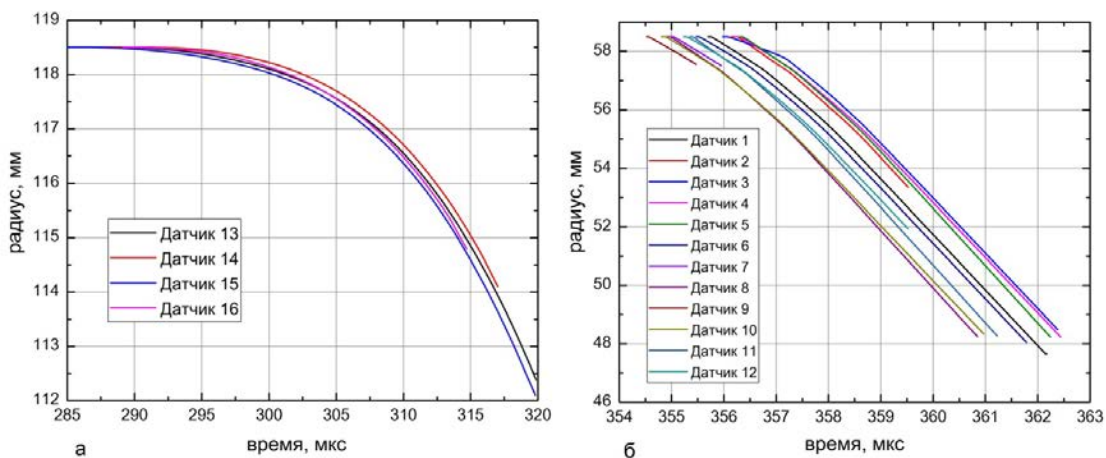


Рис. 9. $r-t$ диаграммы: а – лайнера, б – ударника

С помощью опго-гетеродинной методики в эксперименте были зарегистрированы скорости движения внешней поверхности лайнера и внутренней поверхности ударника (рис. 8).

Конечную скорость лайнера зарегистрировать не удалось. Сигналы с соответствующих коллиматоров

(рис. 8, а) пропали на 313–320 мкс при скоростях 450 – 600 м/с и смещении лайнера от начального положения 4–6,5 мм. Асимметрия полета лайнера наблюдается с самого начала его движения и к моменту прекращения сигналов составляет до 1,2 мкс по времени или до 0,5 мм по радиусу (рис. 9, а). Даль-

нейший анализ эксперимента показал, что причиной прерывания сигналов явилось разрушение датчиков вследствие воздействия ударной волны от давления магнитного поля.

Небольшой разброс на $r-t$ диаграмме (рис. 9, а) говорит о симметричном полете лайнера на зарегистрированном интервале.

Сигналы скоростей внутренней поверхности ударника (рис. 8, б) показывают одновременность начала движения до 1,8 мкс. Данная одновременность сохраняется в течение всего времени движения ударника вплоть до подлета к ЦИБ. Асимметрия подлета внутренней границы к ЦИБ составляет до 3 мм по радиусу. Максимальная скорость ударника (рис. 8, б) лежит в диапазоне 1,85–2,0 км/с.

На $r-t$ диаграмме (рис. 9, б) показано положение различных участков ударника, находящихся напротив датчиков в зависимости от времени.

Средняя скорость ударника достигла 1,92 км/с.

По результатам расчетов скорость лайнера составила 1,12 км/с. В результате постановки каскада получено увеличение скорости в $1,9/1,12 = 1,7$ раза.

Сигналы с первой группы контактных датчиков зарегистрировать не удалось из-за сбоя в аппаратуре. В центральной области результаты контактной методики (вторая группа датчиков) хорошо согласуются с результатами, зарегистрированными коллиматорами (рис. 10). Видно, что при подлете ударника к ЦИБ существует достаточно плоский участок длиной ~ 30 мм.

В целом результаты измерений с помощью контактной методики хорошо согласуются с данными опто-гетеродинной методики.

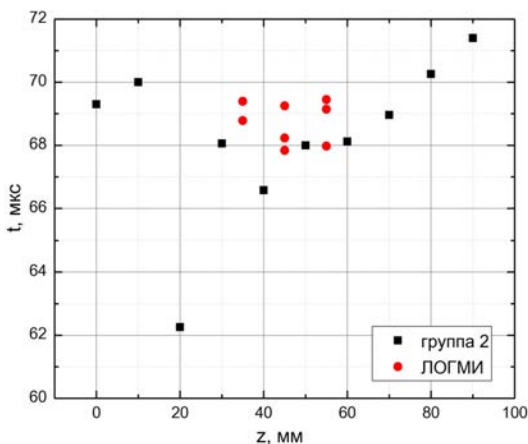


Рис. 10. Моменты времени срабатывания контактных датчиков и подлета ударника к ЦИБ по сигналам с коллиматоров

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Каскадный метод разгона ударника позволил достигнуть увеличения его скорости в 1,7 раза больше скорости лайнера.

- В центральной части ударника в области длиной ~ 30 мм одновременность подлета к приемнику не превышает 2 мкс.

- Асимметрия начала движения лайнера, вероятно, связана с его разнотолщинностью. Постановка подобных экспериментов требует прецизионного изготовления и сборки элементов лайнерного узла.

- В подобных экспериментах, где реализуются высокие по амплитуде или длительные по времени давления магнитного поля, конструкция лайнерного узла не должна допускать преждевременную деформацию фланцев скольжения, токопроводов и коллиматоров.

Представленный способ ускорения цилиндрического ударника может быть использован для исследований динамических свойств конструкционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения.

Список литературы

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. 2-е изд. Монография: под ред. д-ра физ.-мат. наук М. В. Жерноклетова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2005. С. 428.
2. Терновой В. Я. Получение высоких скоростей метания при использовании взрывных лайнерных устройств. Сб. Динамика сплошной среды. Институт гидродинамики СО, 1980. Вып. 48. С. 86.
3. High Magnetic Field Driven Liner-Impactors for Shock Wave and Warm Dense Matter Applications. Proceedings of The International Conference «EAPPC, BEAMS & MEGAGAUSS 2016». С. L. Rousculp, R. E. Reinovsky. 2016. P. 232.
4. Progress on the Design of a Stabilized Liner Compressor for Low-Cost Controlled Fusion at Megagauss Field-Levels. Proceedings of The International Conference «EAPPC, BEAMS & MEGAGAUSS 2016». P. J. Turchil, S. D. Frese. Portugal: CASCAIS & ESTORIL COAST. 2016. P. 225.
5. PPC-2015: Stability of the fuel/liner interface in magnetized liner implosions. 2015 Pulsed Power Conference. Digest of Technical Papers and Abstracts (2015). M. R. Weis, P. Zhang, Y. Y. Lau et al. IEEE Catalog Number: CFP15PPC-DVD. ISBN: 978-1-4799-8402-2. P. 222.
6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
7. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / под ред. Демидова В.А., Пляшкевича Л.Н., Селемира В.Д. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 439.
8. Баранов В. К., Голубинский А. Г., Ириничев Д. А., Степушкин С. Н., Хатункин В. Ю. Опто-гетеродинное измерение скорости нескольких быстро движущихся объектов / Межд. конф. XII Харитоновские тематические научные чтения // Тр. конф. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2010. С. 297–302.