

## УСКОРЕНИЕ ПЛОСКИХ УДАРНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПИРАЛЬНОГО МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

*Тенаев Дмитрий Андреевич (selemir@vniief.ru), Агапов Антон Анатольевич, Власов Юрий Валентинович, Филиппов Алексей Владимирович, Тарасов Антон Михайлович*

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

Одним из способов определения параметров уравнений состояния веществ является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью нескольких километров в секунду. Ускорение пластин до таких скоростей можно выполнить электромагнитным способом. В качестве источника электромагнитной энергии возможно применение спирального взрывомагнитного генератора, но необходимо учитывать, что к моменту соударения ударника и мишени сторона ударника, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, должна остаться в твердом состоянии и не должна быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями. В докладе представлены результаты первых двух экспериментов по ускорению плоских дисковых ударников из алюминия площадью  $25 \text{ cm}^2$  и массой  $\sim 70 \text{ г}$  с использованием спирального взрывомагнитного генератора со статором диаметром 200 мм и их сравнение с расчетами.

**Ключевые слова:** электромагнитное ускорение, взрывомагнитный генератор, плоский ударник, магнитное давление.

## ACCELERATION OF FLAT STRIKERS USING A SPIRAL EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATOR

*Tepaev Dmitry Andreevich (selemir@vniief.ru), Agapov Anton Anatolievich, Vlasov Yuri Valentinovich, Filippov Alexey Vladimirovich, Tarasov Anton Mihailovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The analysis of measurement results of wave and mass velocities in the target at the plate strike is one of the methods determining the equations of state parameters. The plate is moving with the velocity of several kilometers per second. The acceleration of the plates up to such velocities can be performed by the electromagnetic method. A spiral explosive magnetic generator can be used as a source of the electromagnetic energy. We must take into account that by the moment of collision of the striker and the target, the striker side opposite to the side influenced by the magnetic pressure, should remain in the solid state and should not be disturbed by hydrodynamic instabilities. The report presents the results of the first two experiments of the acceleration of flat disc strikers made of aluminum with the area of  $25 \text{ cm}^2$  and the mass of  $70 \text{ g}$  using a spiral explosive magnetic generator with a stator of a 200 mm diameter, and their comparison with calculations.

**Keywords:** electromagnetic acceleration; magnetocumulative generator; flat striker; magnetic pressure.

### Введение

Экспериментальное моделирование процессов, происходящих в условиях высокой плотности энергии, позволяет получать необходимые данные для верификации и тестирования физико-математических моделей и программ, используемых в расчетах. Одним из способов исследования свойств ма-

териалов является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней плоского ударника, движущегося со скоростью несколько километров в секунду. Ускорение ударников до таких скоростей можно осуществить либо взрывным [1], либо электромагнитным способами [2–4]. Преимуществами электромагнитного способа ускорения являются: формальное отсутствие

ограничения на конечную скорость пластины [4], возможность использования более широких диагностических средств, возможность сохранения образца после опыта, отсутствие на нем следов дискретности инициирования взрывчатого вещества (ВВ). Кроме того, разнесение источника энергии и узла нагружения позволяет сохранить герметичность последнего при исследовании делящихся материалов.

Необходимо учитывать, что к моменту соударения ударника и мишени сторона ударника, противоположная той, на которую воздействует магнитное давление, должна остаться в твердом состоянии и не должна быть возмущена гидродинамическими неустойчивостями.

На основе результатов моделирования ускорения плоских ударников магнитным полем токового импульса ВМГ-200 [5] предложен проект устройства для исследования уравнений состояния веществ и проведены его первые испытания.

### Устройство для ускорения плоских ударников

Устройство состоит из источника электромагнитной энергии – спирального ВМГ-200, коаксиальной передающей линии (ПЛ), шинной ПЛ и узла ускорения (УУ) плоских ударников (рис. 1). Габариты устройства: длина ~1450 мм, максимальная высота ~450 мм. Масса ~120 кг, в том числе масса ВВ ~10 кг. Запитка ВМГ начальным магнитным потоком осуществляется от конденсаторной батареи.

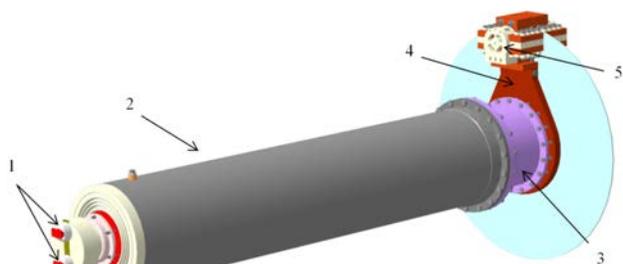


Рис. 1. Устройство ускорения плоских ударников: 1 – электродетонаторы, 2 – спиральный ВМГ-200, 3 – коаксиальная ПЛ, 4 – шинная ПЛ, 5 – узел ускорения

Узел ускорения и шинная ПЛ выполнены из медного сплава. Изолятор ПЛ толщиной 3 мм выполнен из лавсановой пленки методом спекания. Узел ускорения в первом эксперименте состоял из двух каналов – цилиндрического и конусного (рис. 2), во втором – из двух цилиндрических. Угол сужения конусного канала составлял ~1°. Внутренний диаметр УУ – 56 мм. Длина разгонного участка для каждого ударника составляет 40 мм.

Ускоряемые диски (ударники) выполнены из алюминиевого сплава марки АМц. Диаметр дисков – 56 мм, толщина – 10 мм, масса каждого диска ~70 г. На диске, расположенном в цилиндрической части УУ, выполнен кольцевой паз с внутренним диаметром 40 мм, глубиной 5 мм и шириной – 3 мм. Расчеты

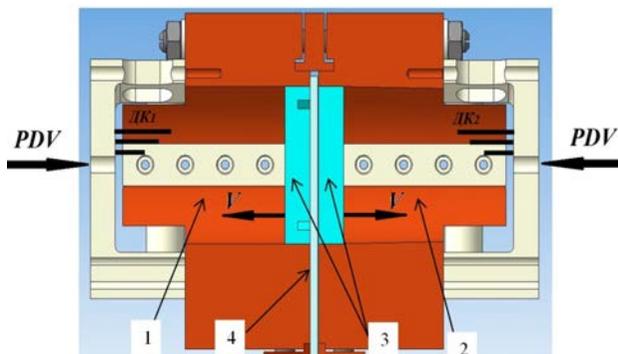


Рис. 2. Эскиз узла ускорения: 1 – цилиндрический канал, 2 – конусный канал, 3 – ударники, 4 – изолятор, ДК<sub>1</sub>, ДК<sub>2</sub> – датчики контактной методики, PDV – датчики методики измерения скорости

распределения тока в цилиндрических направляющих узла ускорения показали, что чем больше ускоряемый диск смещается относительно своего начального положения, тем более значительная часть тока растекается по боковой поверхности узла ускорения, минуя ускоряемый диск. В результате расчетная скорость движения диска не будет достигнута. Для исключения этого стенки цилиндра выполнены с разрезом, заполненным изолятором высотой 15 мм, выполненным из полиамида. Регистрация зависимости скорости ударников от времени проводилась лазеро-гетеродинной методикой PDV. Для измерения времени пролета ударниками заданного расстояния применялась электрическая контактная методика (рис. 3). Измерения параметров импульсов тока ВМГ-200 производились индукционной и оптоволоконной методиками.

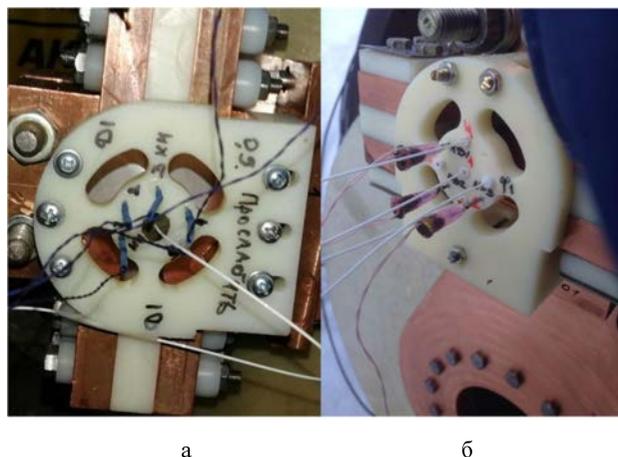


Рис. 3. Расположение датчиков в экспериментах: а – 1-ый эксперимент, б – 2-ой эксперимент

### Результаты взрывных экспериментов

В опытах измерены зависимости от времени производной тока, тока и скорости ударника. Зафиксированы моменты смещения ударника на заданные расстояния. Получены следующие результаты.

## Опыт № 1

Спиральный ВМГ-200 запитан начальной магнитной энергией 12 кДж. Максимальный ток ВМГ составил 8,8 МА (рис. 5).

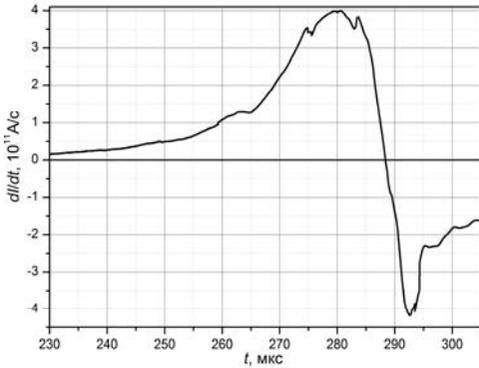


Рис. 4. Производная тока ВМГ

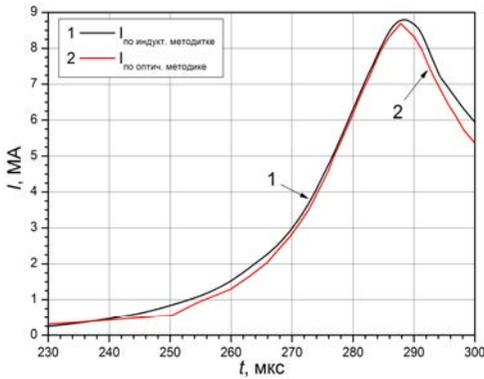


Рис. 5. Ток ВМГ

Внешняя граница ударника в цилиндрическом канале достигла контактного датчика через 293,5 мкс (рис. 7) после пуска измерительной аппаратуры, т. е. за 1 мкс до окончания работы ВМГ. Это означает, что методика PDV не регистрировала движение ударника на конечной стадии его ускорения (после 280 мкс). Датчиками электрической контактной методики зарегистрированы сигналы Д1 КМ2 – 293,5 мкс и Д1 КМ5 – 294,1 мкс. Это соответствует пролету ударника расстояний 50 мм и 56 мм, соответственно.

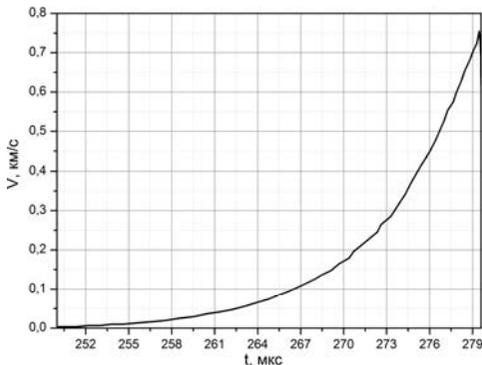


Рис. 6. Скорость ударника

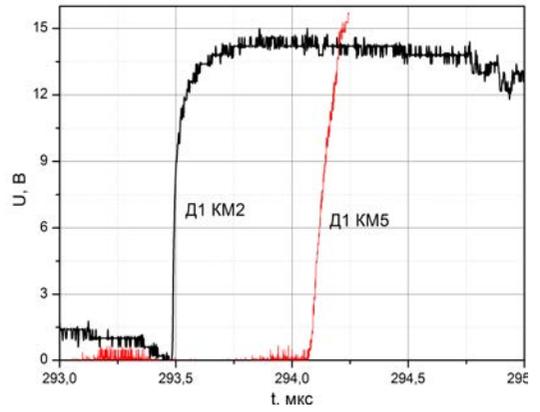


Рис. 7. Сигналы с контактных датчиков

Для оценки скорости ударника на конечной стадии его ускорения воспользуемся измеренной скоростью движения ударника на начальной стадии  $v_{\text{эксп}}(t)$  и полученным в опыте импульсом тока  $I_{\text{эксп}}(t)$ .

Движение ударника описывается уравнением

$$m\omega = p_M S \quad (1)$$

где  $m$  – масса ударника,  $\omega$  – его ускорение,  $p_M$  – магнитное давление,  $S$  – площадь поверхности ударника, к которой приложено магнитное давление. Масса ударника равна

$$m = \gamma \delta S \quad (2)$$

где  $\gamma, \delta$  – плотность ударника и его толщина. Ускорение ударника равно

$$\omega = \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

Магнитное давление равно

$$p_M = \frac{\mu_0 H^2}{2} \quad (4)$$

Здесь  $H$  – магнитное поле на поверхности ударника,  $\mu_0 = 4\pi \text{ нГн/см}$  – магнитная постоянная. Мы знаем, что с ростом расстояния между ударниками напряженность магнитного поля на их поверхности уменьшается. Поэтому запишем магнитное поле на поверхности ударника в виде

$$H = \frac{kl}{b} \quad (5)$$

где  $I$  – ток,  $b$  – ширина ударника,  $k = k(a)$  – коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного поля с ростом расстояния между ударниками ( $a$ ).

Подставив все величины в уравнение движения (1), получим

$$\omega = \mu_0 \frac{\left(\frac{kl}{b}\right)^2}{2\gamma\delta} \quad (6)$$

Аппроксимируем зависимость от времени коэффициента  $k$  линейной функцией (кривая 1 на рис. 8).

$$k(t) = \begin{cases} k_{\max}, & t < t_m \\ k_{\max} + \frac{(k_{\min} - k_{\max})(t - t_m)}{(t_f - t_m)}, & t \geq t_m \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $k_{\max}$ ,  $k_{\min}$  – начальное значение  $k$  и его значение в момент  $t_f$  пролета ударником расстояния, равного четырем его толщинам (примерно момент срабатывания датчика D1KM5),  $t_m$  – момент начала движения ударников, время  $t$  измеряется от момента запуска измерительной аппаратуры. Значение  $t_m = 250$  мкс и  $t_f = 295$  мкс известны по результатам измерений скорости. Значение  $k_{\min} = 0,4$  подбираем так, чтобы ускорение  $\omega = k^2 \omega_0$  было близко к  $\omega_{\text{эксп}} = \frac{dv_{\text{эксп}}}{dt}$  на том временном интервале, где была измерена скорость  $v_{\text{эксп}}$  (рис. 8). Интегрируя полученное ускорение (кривая 4 на рис. 8), найдем скорость и смещение ударника.

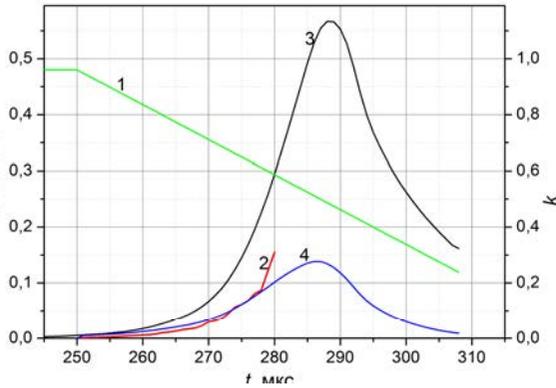


Рис. 8. Оценка ускорения ударника на конечной стадии его работы: 2, 3, 4 – ускорение ударника по результатам измерения его скорости, исходя из интеграла действия тока при  $k = 1$ , и при  $k$ , заданной зависимости 1

Как видно из рис. 9, скорость ударника к моменту срабатывания крайнего контактного датчика оценивается величиной  $\sim 2,6$  км/с.

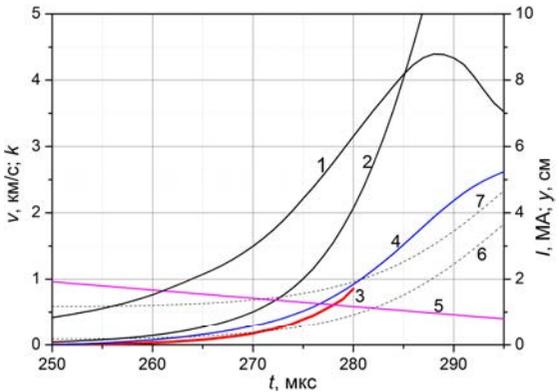


Рис. 9. Оценка скорости ударника на конечной стадии его ускорения: 1 – ток ВМГ; 2 – скорость ударника исходя из интеграла действия тока без учета зависимости напряженности магнитного поля от расстояния между ударниками; 3, 4 – измеренная скорость ударника и ее оценка на конечной стадии ускорения; 5 – линейная аппроксимация коэффициента  $k$ ; 6, 7 – расчетное положение границ ударника, исходя из оценки его скорости согласно кривой 4

Во втором эксперименте для исследования формы ударника во время полета применялся метод рентгенографии. Для повышения контрастности снимка на торцевую сторону одного из дисков была приклеена танталовая фольга. Для измерения скорости ударников использовалось два варианта методики PDV. Результаты опыта представлены на рис. 10 – 13. Спиральный ВМГ-200 запитан начальной магнитной энергией 14,5 кДж. Максимальный ток ВМГ составил 7,2 МА (рис. 11).

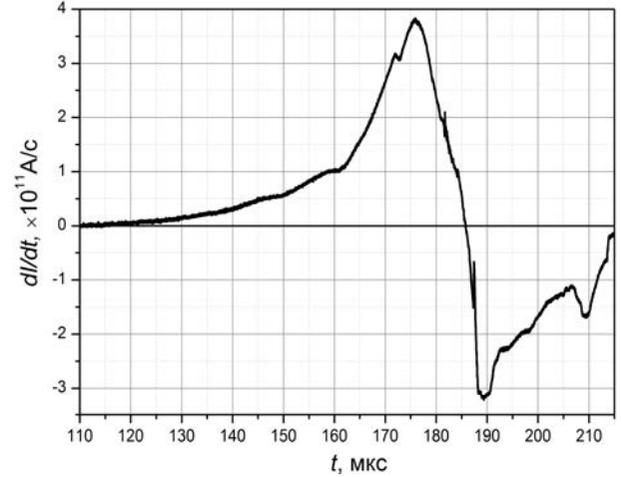


Рис. 10. Производная тока ВМГ

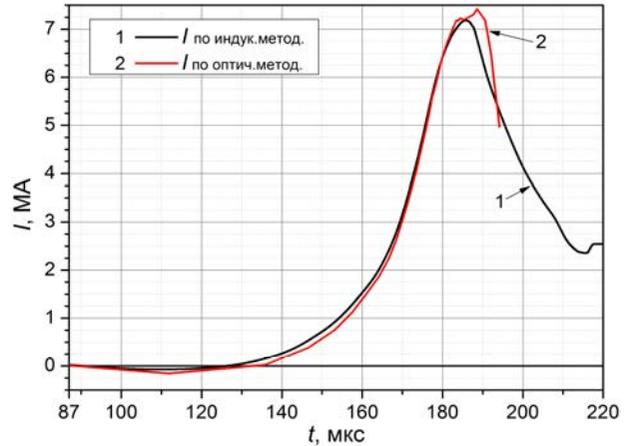


Рис. 11. Ток ВМГ

Движение ударников начинается в момент времени равный  $\sim 150$  мкс (рис. 12, 13). Через 32,5 мкс (на 182,5 мкс) регистрация сигналов прекратилась.

Скорость наиболее быстрого из ударников (с проточкой) к этому моменту достигла 1,8 км/с (согласно PDV методике № 2), что соответствует  $\sim 1,2$  см пролета (рис. 13). Согласно PDV методике № 1 максимальная скорость ударника равна 2,1 км/с.

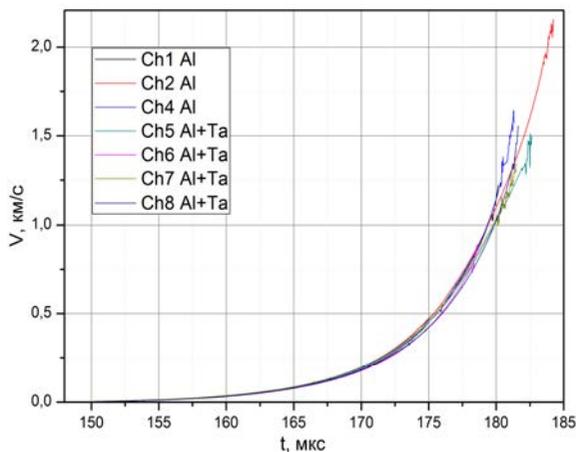


Рис. 12. Скорость ударников, измеренная методикой PDV № 1

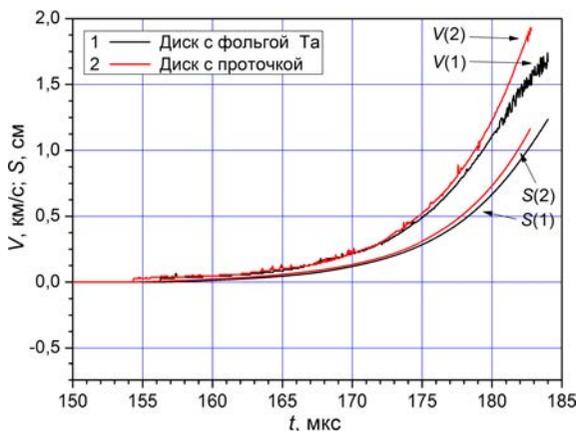


Рис. 13. Скорость и смещение ударников, измеренные методикой PDV № 2

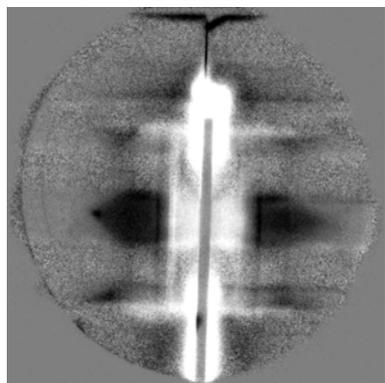


Рис. 14. Снимок ударников, полученный методом рентгенографии

Столь ранний обрыв сигнала происходит из-за значительной деформации плоских ударников, движущихся по ускорительным каналам устройства под действием магнитного поля. Отражение измеритель-

ного сигнала PDV методики прекращается в тот момент, когда плоскость ударника деформируется до некоторого критического значения. Искажение формы ударников отчетливо видно на снимке, полученном в ходе рентгенографии, в момент времени равный 187 мкс (рис. 14). Этот нежелательный эффект необходимо будет устранить или минимизировать.

### Заключение

В ходе первых испытаний устройства ускорения плоских ударников, проведены измерения параметров импульсов тока с применением индукционной и магнитооптической методик. Проведены измерения параметров движения ударников с применением рентгенографической, электроконтактной и PDV методик.

Максимальная зарегистрированная скорость полета ударников составила 2,1 км/с.

Обнаружено искажение формы ударников в процессе их движения. При подготовке следующих экспериментов необходимо будет принять меры для минимизации этого нежелательного эффекта.

### Список литературы

1. Трунин Р. Ф. Сжимаемость металлов при высоких давлениях ударных волн / Высокие плотности энергии // Сборник научных трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. С. 253–270.
2. Lemke R. W., Knudson M. D., Harjes C. H., Davis J. P., Bliss D. E., Pointon T. D., Mehlhorn T. A. Shockless acceleration of flyer plates at multimegabar magnetic pressures on the Z-machine // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg. Berlin: Humboldt University at Berlin, 2005. P. 403–405.
3. Krivosheev S. I. Magneto-pulse method of creating short pulses of mechanical pressure for testing materials // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg. Berlin: Humboldt University at Berlin, 2005. P. 354–356.
4. Ивановский А. В. Высокоскоростные плоские ударники, ускоряемые током взрывом магнитных генераторов // В кн.: Труды Международной конференции «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» 14–18 марта 2005 г. / Под. ред. доктора технических наук А. Л. Михайлова. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005 С. 506–511.
5. Demidov V. A., Boriskin A. S., Vlasov Y. V. Simulation of the Magnetically Accelerated Flat Strikers Using a Magnetocumulative Generator // IEEE Transactions on Plasma Science, March 2018. Vol. 46. N 3. P. 659–662.