

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВКИ PHYLIX ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЁПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И МЕДНЫХ ФОЛЬГ

С. Ф. Гаранин¹, С. Д. Кузнецов¹, Р. Е. Рейновски²

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
² Los Alamos National Laboratory

Рассмотрена возможность использования установки PHYLIX ЛАНЛ (токи 3-5 МА с характерным временем ~ 10 мкс) для получения тёплого плотного вещества (ТПВ), т. е. вещества с плотностью порядка $(0,01 \dots 1)$ твёрдотельной и температурой 1–10 эВ, при электровзрыве тонкой цилиндрической металлической фольги, окруженной изолятором. Показано, что в этой системе, можно получить однородное ТПВ с плотностью $0,1-1$ г/см³ и температурой 3–4 эВ и с хорошей доступностью для измерений. Рассмотрена схема восстановления параметров ТПВ, использующая результаты электротехнических измерений и измерений скорости границ взрывающейся фольги.

Введение

Теплым плотным веществом (ТПВ) [0] называют состояние вещества в промежуточной области между конденсированным веществом и идеальной плазмой, более горячее, чем обычное конденсированное вещество, но более холодной и более плотной, чем традиционная идеальная плазма. В этой области состояния, которую часто характеризуют диапазоном температур $1 < T < 50$ эВ и плотностью в диапазоне $0,01\rho_0 < \rho < 2\rho_0$ (ρ_0 – твердотельная плотность), вещество не может описываться теориями, применимыми для идеальной плазмы или для конденсированного (твердотельного) вещества. Задача получения ТПВ представляет интерес для ряда явлений. ТПВ встречается в ядрах газовых планет-гигантов, а в технических и физических приложениях образуется в системах, испытывающих быстрый переход от твердого состояния в плазму, таких как взрывающиеся проводочки и быстро нагреваемое (под действием, например, лазерного излучения или сильных магнитных полей) вещество.

Для получения ТПВ используются различные экспериментальные методы: изохорический нагрев [0, 3], изобарическое расширение [4–6], ударное сжатие низкоплотной плазмы [3], ударное сжатие конденсированного вещества пластинами или лайнерами, разгоняемыми магнитным полем, (см., например, [7, 8]).

В опытах [9], проводимых в университете в Рино, Невада (UNR) на установке Zebra при разря-

де тока (с характерным временем нарастания тока ~ 100 нс и характерной величиной тока ~ 1 МА) через проводочки диаметром порядка 1 мм, изучалось образование и эволюция поверхностной плазмы, когда магнитные поля мегагауссного диапазона взаимодействуют с металлической поверхностью. При этом, как показали расчеты [10], наряду со сравнительно горячей (десятки эВ) малоплотной короной, образующейся на поверхности проводника, внутри проводника образовывалась сравнительно однородная плотная плазма с температурой около 4 эВ и плотностью $\sim 60\%$ твердотельной, т. е. как раз ТПВ [0, 11].

Расчеты [12] показали, что при электровзрыве металлического стержня с помощью взрывомагнитного генератора (ВМГ) с взрывным замыкающим ключом (ВРК) можно получить большой объем однородной ТПВ в центральной области взрывающегося стержня. Однако измерение параметров полученной плазмы представляет собой сложную задачу. В работе [12] была рассмотрена также система для получения ТПВ, образующейся при электровзрыве цилиндрической металлической фольги, окруженной изолятором.

В данной работе исследуется такая же система для получения ТПВ под действием тока установки PHYLIX [13], в которой использование трансформатора при разряде батареи позволяет получить импульс тока 3–5 МА с характерным временем ~ 10 мкс, близкий по параметрам к токам создаваемым спиральными ВМГ с ВРК.

1. Постановка задачи для расчётов электровзрыва цилиндрической фольги

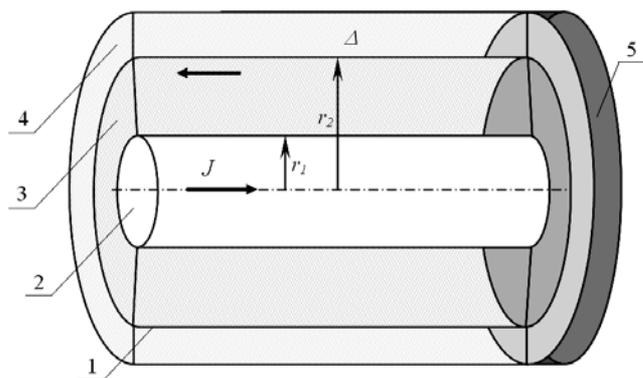


Рис. 1. Физическая схема нагрузки. 1 – фольга; 2 – центральный стержень; 3, 4 – цилиндры из диэлектрика; 5 – торцевой фланец

Рассматривается система, состоящая из фольги, зажатой между двумя цилиндрическими слоями изолятора, через которую протекает ток установки PHELIX. Предполагается, что фольга расположена на наружном радиусе электровзрывной нагрузки, что может существенно облегчить проведение измерений параметров ТПВ. Принципиальная физическая схема нагрузки показана на рис. 1.

Центральный металлический стержень (2) имеет радиус r_1 , который определяет механическую жёсткость всей конструкции, а также служит центральным токопроводом. Толщина стержня должна быть достаточно велика для того, чтобы избежать электровзрыва поверхности. Обратный токопровод представляет из себя цилиндр (1) радиуса r_2 из металлической фольги толщиной δ . Между центральным стержнем и фольгой, а также снаружи фольги расположен диэлектрик (3, 4). Внешний диэлектрик (4) требуется для сдерживания разлёта цилиндрической электровзрываемой фольги, что обеспечивает высокую плотность и однородность электровзрывной плазмы. Для возможности диагностик в видимом свете требуется, чтобы диэлектрик был прозрачным и оставался прозрачным после воздействия на него взрывающейся фольги. Общая длина нагрузки определяется удобством для измерений, а также ограничениями на общую индуктивность нагрузки. Замыкание цепи осуществляется при помощи толстого металлического фланца, который должен иметь хороший электрический контакт с центральным стержнем и металлической фольгой.

В качестве источника тока предполагается использовать установку PHELIX. Характерная форма разряда такой системы на жёсткую нагрузку показана на рис. 2 [13], эта кривая тока и была использована в расчётах разряда на предлагаемую низкоиндуктивную нагрузку.

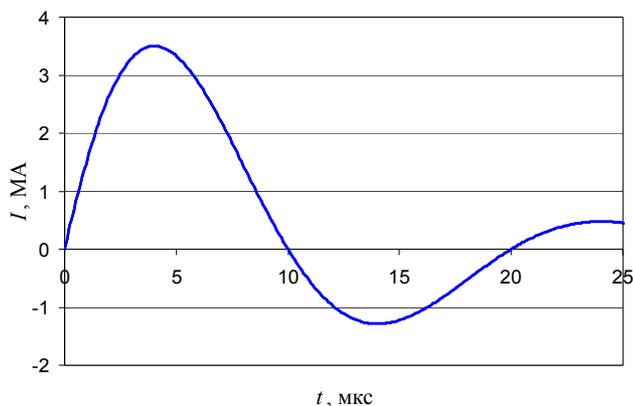


Рис. 2. Зависимость тока в нагрузке от времени из работы [13], использовавшаяся в расчётах

Начальная индуктивность нагрузки определяется геометрическими размерами нагрузки

$$L_0 = 2l \ln r_2 / r_1 \quad (1)$$

(l – длина цилиндра на рис. 1).

Расчеты проводились с помощью одномерной программы УП МГД [14]. Сетка расчетов выбиралась так, чтобы обеспечить достаточно высокую точность и сходимость результатов.

Для описания металлов использовались уравнения состояния (УРС) и проводимости из работ [15–17]. В качестве рабочего изолятора в системе использован пластик с физическими свойствами лавсана с $\rho_0 \sim 1 \text{ г/см}^3$. Для описания этого пластика были специально подобраны параметры УРС. В расчётах была задана нулевая прочность на разрыв соединения пластика с металлом, так как образование зазора между фольгой, смещающейся под действием магнитного поля, и слоем пластика, а также заполнение этого зазора веществом фольги после взрыва может оказаться существенным для описания развития разряда и образования ТПВ.

2. Результаты расчётов взрыва фольги

В качестве базовых размеров нагрузки были взяты

$$r_1 = 0,7 \text{ см}; r_2 = 1,5; \Delta = 2 \text{ см}; l = 2 \text{ см}. \quad (2)$$

Общая индуктивность нагрузки с такими геометрическими размерами, согласно (1) составляет

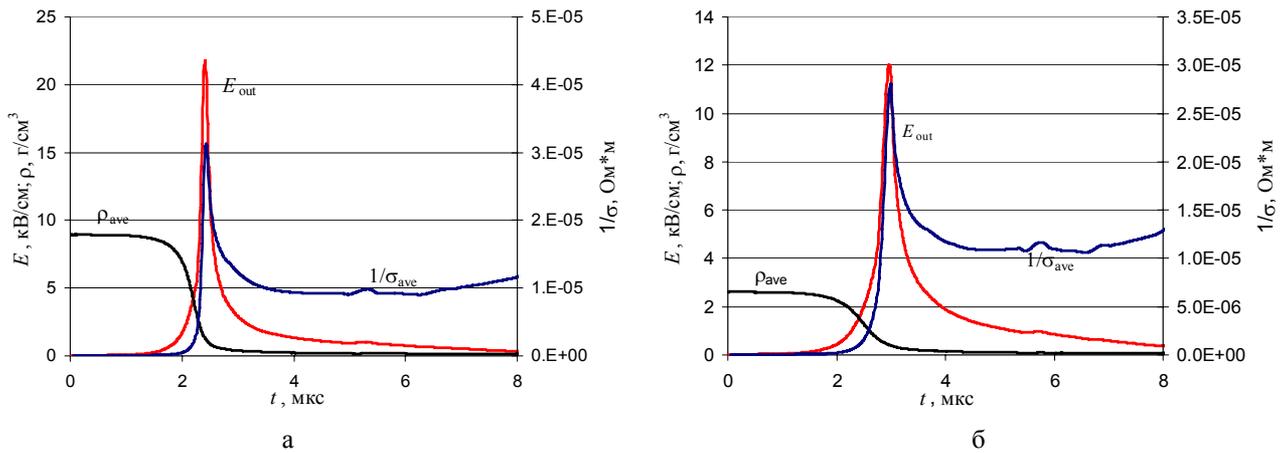


Рис. 3. Напряжение на единицу длины фольги, её средняя плотность и удельное сопротивление, вычисленные по радиусам внешней и внутренней границ: а – Медная фольга, б – алюминиевая фольга

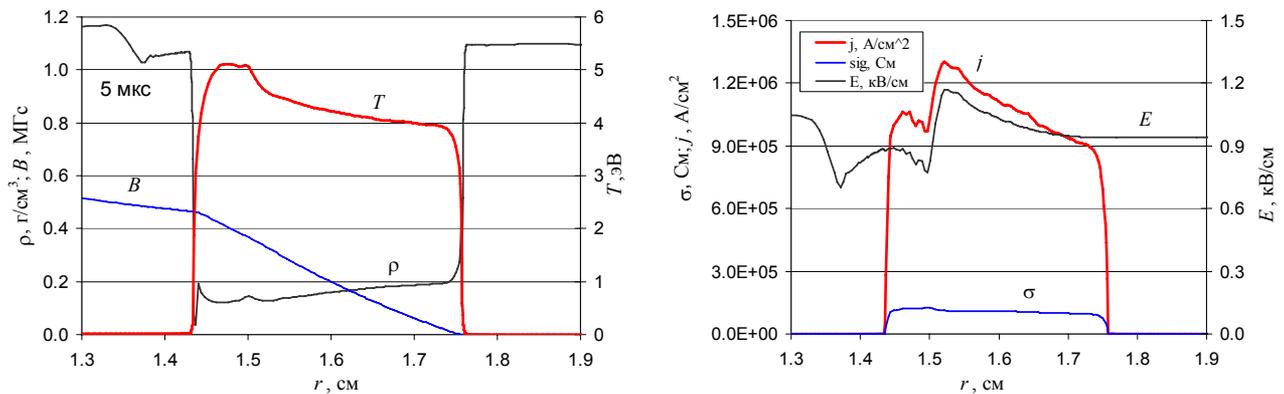


Рис. 4. Распределение МГД величин по радиусу для медной фольги с начальной толщиной 0,0625 мм на момент 5 мкс

~ 3 нГн. По сравнению с суммарной индуктивностью вторичной обмотки трансформатора установки PHELIX (~ 25 нГн) это малая величина, даже с учётом «раздувания» этой индуктивности в процессе электровзрыва, что оправдывает использование кривой тока, полученной из опытов на постоянную нагрузку.

Для размеров нагрузки (2) были проведены расчёты с медной и алюминиевой фольгой. Толщина медной фольги была 0,0625 мм, а алюминиевой 0,125 мм. В целом результаты расчётов с медной и алюминиевой фольгой близки, о чём можно судить по приведённым ниже результатам.

Напряжение на внешней поверхности фольги, которое может быть непосредственно измерено в опыте, показано на рис. 3, на котором показана также средняя плотность и среднее удельное сопротивление фольги, вычисленные по радиусам внешней и внутренней её поверхности, а также току и напряжению на внешней поверхности. Ве-

личина пика напряжения, соответствующего взрыву алюминиевой фольги при этом ниже, чем в случае с медью, и взрыв происходит несколько позже.

На рис. 4 показаны распределения МГД величин по сечению взорванной медной фольги, которые демонстрируют степень однородности ее взрыва. В расчётах было обнаружено, что нагрев пластика, окружающего фольгу, не приводит к сколько-нибудь заметному ответвлению тока в разряд по пластику. В расчётах также было обнаружено, что увеличение толщины медной фольги приводит к большей неоднородности электровзрыва и большему ответвлению тока в разряд по изолятору.

Аналогичные величины для алюминиевой фольги представлены на рис. 5. Как показывает рис. 5, разряд в алюминиевой фольге происходит даже более равномерно, чем в медной.

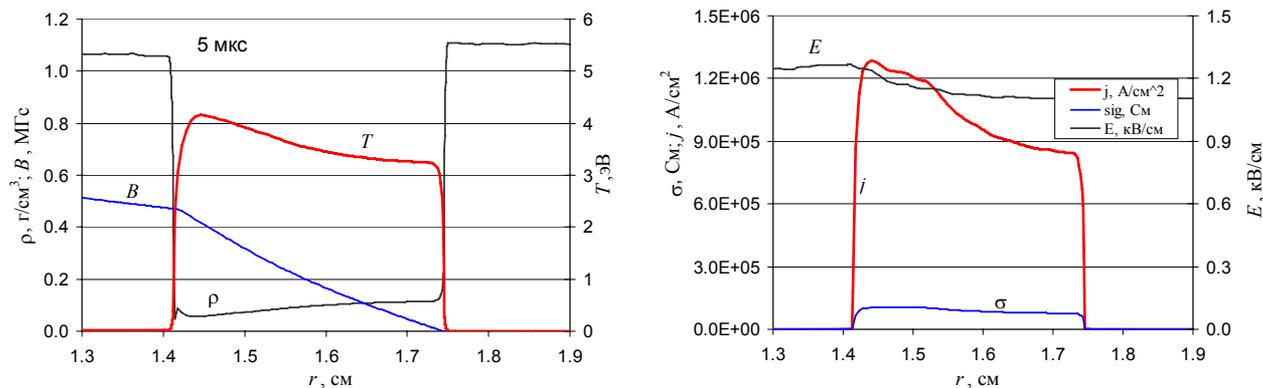


Рис. 5. Распределение МГД величин по радиусу для алюминиевой фольги с начальной толщиной 0,0125 см на момент 5 мкс

С помощью измерений возможно определить давление плазмы внутри фольги. Нами была предложена [12] расчетно-экспериментальная методика восстановления давления металлической плазмы при условии, если УРС внешнего материала, окружающего фольгу, известно. На рис. 6 показано давление, полученное из одномерного гидродинамического (ГД) расчёта слоя пластика с заданной скоростью на внутренней границе (эта скорость была взята из МГД расчёта, а в эксперименте ее можно получить, например, с помощью велосиметрических методик, просвечивая лазером окружающий фольгу диэлектрик и получая информацию о движении границы фольги, если этот диэлектрик будет прозрачным), и усреднённое по объёму давление в фольге, получающееся в МГД расчётах. Для получения теплового давления P_{rest} в фольге нами производится вычет усреднённого

магнитного давления, которое в случае линейного профиля магнитного поля (оболочка тоньше скин-слоя) равно 1/3 от магнитного давления на границе фольги

$$P_{rest} = P_{HD} - \frac{1}{3} \frac{B_b^2}{8\pi}, \quad B_b = \frac{I}{5r_{int}}, \quad (3)$$

где I – ток в системе в МА, r_{int} – внутренний радиус фольги в см.

Из рис. 6 видно, что давления в плазме на всех стадиях взрыва, в том числе на стадии существования ТПВ, полученные из прямого МГД расчёта и гидродинамического расчёта пластика с известным уравнением состояния совпадают с достаточно хорошей точностью.

Измеряя напряжение и ток в эксперименте, можно найти джоулево тепловыделение и, если

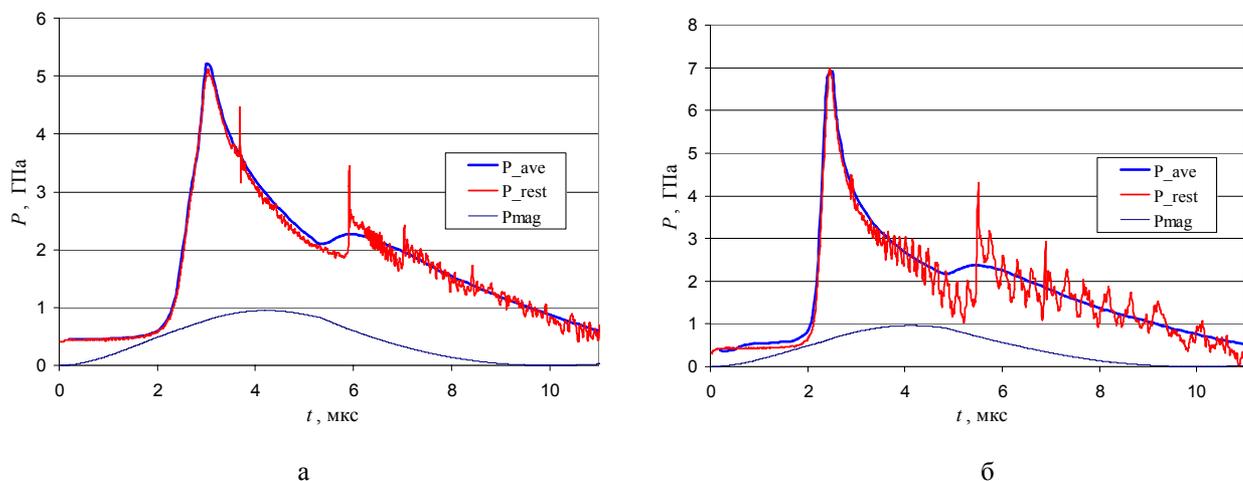


Рис. 6. Среднее по объёму давление P_{ave} в медной (а) и алюминиевой плазме (б), полученное в МГД расчёте, и восстановленное давление P_{rest} , полученное из одномерного ГД расчёта внешнего слоя пластика с навязанной скоростью на внутренней границе, взятой из МГД расчёта

удастся определить давление во взорванной фольге, то с помощью уравнения энергии

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = EI/m - P \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

(ε – внутренняя энергия, m – масса фольги на единицу длины, V – объем единицы длины фольги) можно найти внутреннюю энергию ТПВ. На рис. 7 показана джоулева энергия на грамм, выделяющаяся в фольге при протекании через неё тока, и сравнение средней расчётной внутренней энергии ε_f со средней внутренней энергией в фольге ε_{rest} , восстановленной с помощью уравнения (4), восстановленного давления P_{rest} из рис. 6 и объема фольги, который должен быть измерен с помощью регистрации координат границ. Из рис. 7 видно, что расчетная внутренняя энергия с хорошей точностью совпадает с восстановленной энергией. Кроме объема, давления и внутренней энергии, зная напряжение и ток (рис. 3), можно определить удельное сопротивление ТПВ. Таким образом, измерения динамики границ фольги, тока и напряжения могут позволить определить уравнение состояния и проводимость ТПВ в рассматриваемых экспериментах.

В целом результаты расчётов позволяют надеяться на успешность экспериментальной реализации такой системы. В качестве недостатков системы с нагрузкой, взрывающейся током изнутри, можно отметить лишь достаточно узкую область температур 2–5 эВ, которые можно получить при выполнении требования однородности разряда по сечению фольги. При повышении плотностей тока реализуются режимы с неоднородным взрывом

фольги и преимущественным нагревом внутренней поверхности взрывающейся фольги.

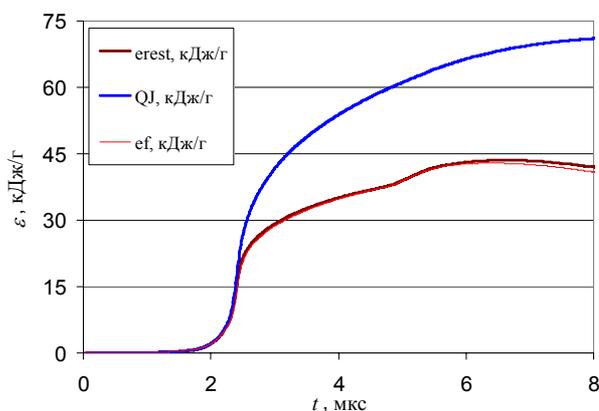
Заключение

Произведено моделирование электровзрыва цилиндрической металлической фольги, зажатой между слоями изолятора, с использованием в качестве источника энергии установки PHELIX. Показана возможность получения ТПВ с плотностью $> 0,1$ г/см³ и температурой ~ 3 –4 эВ. За счёт энергии используемого источника рассматриваемая система с трансформатором тока позволяет получить большой объём электровзрывной плазмы. При этом геометрическая конфигурация и постановка эксперимента представляется более удобной для диагностики, по сравнению с взрывом проволоочки. Показаны возможности для диагностики параметров полученной плазмы в рассматриваемой системе, в частности, описана схема восстановления параметров плазмы по результатам электротехнических измерений и измерений скорости движения границ взрывающейся фольги.

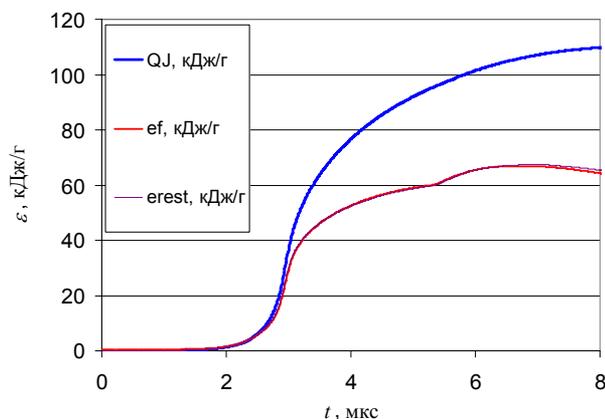
Авторы выражают благодарность участникам семинара отдела ИТМФ ВНИИЭФ за полезные обсуждения.

Список литературы

1. Reinovsky R. E. Warm Dense Matter: Another application for pulsed power hydrodynamics // Dig. Tech. Papers, XVII IEEE Int. Pulsed Power Conf., Washington, DC, USA, 2009. P. 203–208.
2. Sasaki T., Kikuchi T., Nakajima M., et al. Tamped target for Warm Dense Matter experiments



а



б

Рис. 7. Средняя выделяющаяся джоулева энергия на грамм Q_J и сравнение средней расчётной внутренней энергии ε_f со средней восстановленной внутренней энергией в фольге ε_{rest} : а – медная фольга, б – алюминиевая фольга

using intense heavy ion beams // *J. Phys.* 2008. Vol. 112. P. 042027.

3. Benage J., Christensen C., Cobble J., Dodd E. Formation of plasma targets suitable for equation of state experiments // 47th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, October 24–28, 2005; Denver, Colorado, Bull. Amer. Phys. Soc. 2005. P. 223.

4. Лебедев С. В. О возможности создания плазмы при электровзрыве проволочек // ТВТ. 1968. Т. 6. С. 50.

5. Gathers G. R. Fast transient thermophysical measurements at Livermore // *Int. J. Thermophys.* 1990. Vol. 11. N 4. P. 693–708.

6. Gathers G. R., Shaner J. W., Brier R. L. Improved apparatus for thermophysics measurements on liquid metals up to 8000K // *Rev. Sci. Instrum.* 1976. Vol. 47. N 4. P. 471.

7. Bailey J. E., Knudson M. D., Carlson A. L., et al. Time-resolved optical spectroscopy measurements of shocked liquid deuterium // *Phys. Rev. B.* 2008. Vol. 78. P. 144107(17).

8. Buyko A. M., Garanin S. F., Gorbachev Yu. N., et al. Explosive magnetic liner devices to produce shock pressures up to 3 TPa // *Dig. Tech. Papers, XVII IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, Washington, DC, USA, 2009. P. 215–220.

9. Awe T. J., Bauer B. S., Fuelling S., Siemon R. E. Threshold for thermal ionization of an aluminum surface by pulsed megagauss magnetic field // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, N 3. P. 035001(4).

10. Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Atchison W. L. et al. Numerical simulations of thick aluminum wire behavior under megaampere current drive // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. P. 1815–1821.

11. Reinovsky R. E., Atchison W. L., Rousculp C. et al. Pulsed high magnetic fields for exploring the dynamic properties of materials // *Proc. of XIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*, ed. SUN Chengwei, LIU Cangli, Suzhou, China, 2010. P. 44–45.

12. Buyko A. M., Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Reinovsky R. E. Numerical simulations of foil electrical explosion under HEMG current drive for warm dense matter generation // *High-Power Pulsed Electrophysics. Proc. of Int. Conf. XIV Khariton's topical scientific readings 2012. Sarov: RFNC VNIIEF*, 2013. P. 95–103.

13. Rousculp C. L., Reass W. A., Oro D. M., et al. Small scale magnetic drivers for shock physics and other applications // *Int. Conf. XV Khariton's topical scientific readings*, 2013.

14. Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н. Программа UP-Ok для решения одномерных программ механики сплошной среды в одномерном комплексе // ВАНТ, Серия: Методики и программы. 1982. № 3(4). С. 11–14.

15. Buyko A. M., Garanin S. F., Demidov V. A., et al. Investigation of the dynamics of a cylindrical exploding liner accelerated by a magnetic field in the megagauss range // *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems*, ed. V. M. Titov, G. A. Shvetsov, New York: Nova Science Publishers, 1990. P. 743.

16. Гаранин С. Ф., Мамышев В. И. Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // ПМТФ. 1990. № 1. С. 30–37.

17. Garanin S. F., Ivanova G. G., Karmishin D. V., Sofronov V. N. Diffusion of a megagauss field into metal // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2005. Vol. 46, N 2. P. 153–159.