

УДК 533.9.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВКИ RHELIX ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОГО ПЛОТНОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВЕ АЛЮМИНИЕВОЙ И МЕДНОЙ ФОЛЬГИ

С. Ф. Гаранин, С. Д. Кузнецов, Р. Е. Рейновски*

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

Лос-аламосская национальная лаборатория, Лос-Аламос, США

E-mails: sfgar@vniief.ru, S.D.Kuznetsov@vniief.ru, bobr@lanl.gov

Исучена возможность использования установки RHELIX для получения теплового плотного вещества (ТПВ), т. е. вещества с плотностью порядка $0,01 \div 1,00$ плотности твердотельного вещества и температурой $1 \div 10$ эВ, при электровзрыве тонкой цилиндрической металлической фольги, окруженной изолятором. Показано, что в этой системе можно получить значительный объем однородного ТПВ с плотностью $0,1 \div 1,0$ г/см³ и температурой $3 \div 4$ эВ, достаточный для проведения электротехнических измерений. Рассмотрена схема восстановления параметров ТПВ с использованием результатов электротехнических измерений и измерений скорости границ взрывающейся фольги.

Ключевые слова: теплое плотное вещество, уравнение состояния, электровзрыв, джоулево тепло.

Введение. Теплым плотным веществом (ТПВ) [1] называется промежуточное состояние вещества между конденсированным веществом и идеальной плазмой, более горячего, чем обычное конденсированное вещество, но более холодного и плотного, чем традиционная идеальная плазма. В этом состоянии, которое обычно характеризуется температурой вещества в диапазоне $1 \text{ эВ} < T < 50 \text{ эВ}$ и плотностью в диапазоне $0,01\rho_0 < \rho < 2\rho_0$ (ρ_0 — плотность твердотельного вещества), вещество не может быть описано теориями, применимыми для идеальной плазмы или конденсированного (твердотельного) вещества. Задача получения ТПВ представляет интерес при изучении ряда явлений. ТПВ встречается в ядрах газовых планет-гигантов, а также в системах, быстро переходящих из твердого состояния в состояние плазмы, таких как взрывающиеся проволочки и быстро нагреваемое (под действием лазерного излучения или сильных магнитных полей) вещество.

Для получения ТПВ используются различные способы: изохорический нагрев [2], изобарическое расширение [3, 4], ударное сжатие низкоплотной плазмы, ударное сжатие конденсированного вещества пластинами или лайнерами, разгоняемыми магнитным полем (см., например, [5, 6]).

В экспериментах [7], проведенных на установке Zebra при разряде тока (с характерным временем нарастания тока ≈ 100 нс и характерной величиной тока ≈ 1 МА) через проволочки диаметром порядка 1 мм, изучались образование и эволюция поверхностной

плазмы, в случае когда магнитные поля мегагауссного диапазона взаимодействуют с металлической поверхностью. При этом, как показали расчеты [8], наряду со сравнительно горячей (десятки электронвольт) малоплотной короной, образующейся на поверхности проводника, внутри него образовывалась сравнительно однородная плотная плазма с температурой ≈ 4 эВ и плотностью, составляющей $\approx 0,6$ плотности твердотельного вещества, что соответствует ТПВ [1, 9].

Расчеты [10] показали, что при электровзрыве металлического стержня с помощью взрывомагнитного генератора (ВМГ) с взрывным размыкателем тока (ВРТ) можно получить достаточно большой объем однородного ТПВ в центральной области взрывающегося стержня. Однако измерение параметров полученной плазмы является сложной задачей. В работе [10] рассмотрена также система для получения ТПВ, образующегося при электровзрыве цилиндрической металлической фольги, окруженной изолятором.

В данной работе исследуется аналогичная система для получения ТПВ под действием тока, генерируемого установкой RHELIX [11]. Использование в этой установке трансформатора при разряде батареи позволяет получить импульс тока $3 \div 5$ МА с характерным временем ≈ 10 мкс. Импульс тока с близкими характеристиками создается спиральными ВМГ с ВРТ.

1. Постановка задачи для расчета электровзрыва цилиндрической фольги.

Рассматривается система, состоящая из зажатой между двумя цилиндрическими слоями изолятора фольги, через которую протекает ток установки RHELIX. Схема нагрузки показана на рис. 1. Центральный металлический стержень 2 радиусом r_1 определяет механическую жесткость всей конструкции, а также служит центральным токопроводом. Толщина стержня должна быть достаточно большой, чтобы избежать электровзрыва поверхности. Обратный токопровод представляет собой цилиндр 1 радиусом r_2 , изготовленный из металлической фольги толщиной δ . Фольга расположена между двумя диэлектриками 3, 4. Внешний диэлектрик 4 препятствует разлету цилиндрической электровзрываемой фольги, обеспечивая высокую плотность и однородность электровзрывной плазмы. Для проведения диагностики в видимом свете требуется, чтобы диэлектрик был прозрачным даже после воздействия на него взрывающейся фольги. При выборе общей длины нагрузки следует учитывать ограничения, накладываемые на общую индуктивность нагрузки. Замыкание цепи осуществляется с помощью толстого металлического фланца, который должен иметь хороший электрический контакт с центральным стержнем и металлической фольгой.

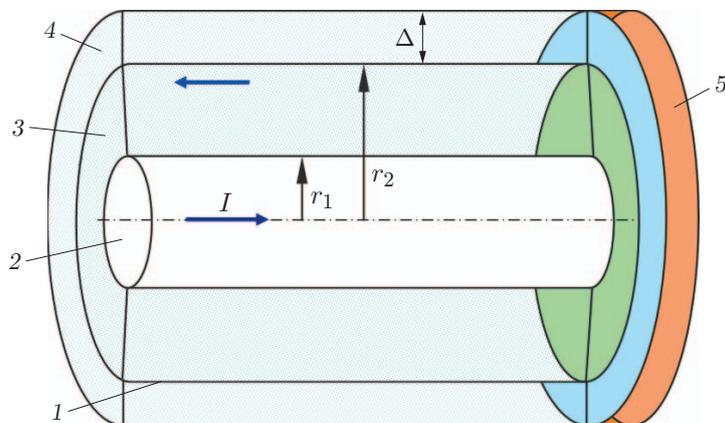


Рис. 1. Схема нагрузки:

1 — фольга, 2 — центральный стержень, 3, 4 — цилиндры из диэлектрика, 5 — торцевой фланец; стрелки — направления течения тока

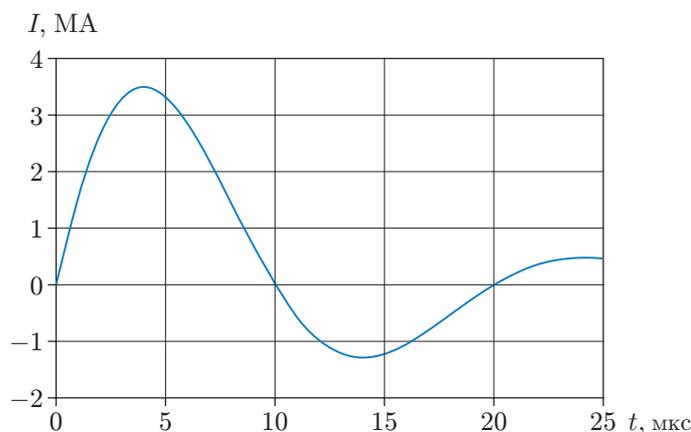


Рис. 2. Зависимость тока в нагрузке от времени [11], используемая в расчетах

В качестве источника тока использовалась установка PHELIX. Характерная форма разряда такой системы на жесткую нагрузку показана на рис. 2 [11]. Зависимость тока от времени, приведенная на рис. 2, использована в расчетах разряда на низкоиндуктивную нагрузку.

Начальная индуктивность нагрузки определяется геометрическими размерами нагрузки:

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

(l — длина цилиндра (см. рис. 1)).

Расчеты проводились с помощью программы УПМГД [12] в одномерной геометрии (все величины зависели только от цилиндрического радиуса и времени) при наличии азимутального магнитного поля. В расчетах учитывались гидродинамическое движение, магнитная диффузия, электронная теплопроводность и лучистый теплоперенос в приближении “вперед-назад”. Сетка для проведения одномерных расчетов выбиралась таким образом, чтобы обеспечивались достаточно высокая точность и сходимость результатов.

Для описания свойств металлов использовались уравнения состояния и проводимости из работ [13–15]. В качестве изолятора в системе использован пластик, физические свойства которого аналогичны свойствам лавсана с $\rho_0 \approx 1 \text{ г/см}^3$. Для описания этого пластика были специально подобраны параметры уравнений состояния. В расчетах задавалась 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 могут оказать существенное влияние на характеристики разряда и процесс образования ТПВ.

Использованные в расчетах коэффициент электронной теплопроводности и пробеги излучения приведены в работах [8, 14].

2. Результаты расчетов взрыва фольги. В расчетах были выбраны следующие размеры нагрузки: $r_1 = 0,7 \text{ см}$, $r_2 = 1,5 \text{ см}$, $\Delta = 2 \text{ см}$, $l = 2 \text{ см}$. Согласно (1) общая индуктивность нагрузки с такими геометрическими размерами составляет $\approx 3 \text{ нГн}$. По сравнению с суммарной индуктивностью вторичной обмотки трансформатора установки PHELIX ($\approx 25 \text{ нГн}$) это малая величина даже с учетом “раздувания” указанной индуктивности в процессе электровзрыва, что допускает использование кривой тока, полученной в результате экспериментов при постоянной нагрузке.

При выбранных размерах нагрузки проведены расчеты для медной и алюминиевой фольги. Толщина медной фольги составляла $0,0625 \text{ мм}$, алюминиевой — $0,125 \text{ мм}$. В основ-

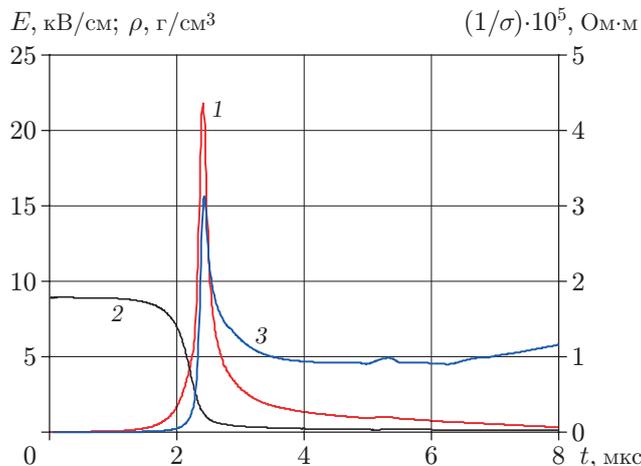


Рис. 3. Зависимости напряжения на единицу длины медной фольги E (1), ее средней плотности ρ (2) и среднего удельного сопротивления $1/\sigma$ (3) от времени

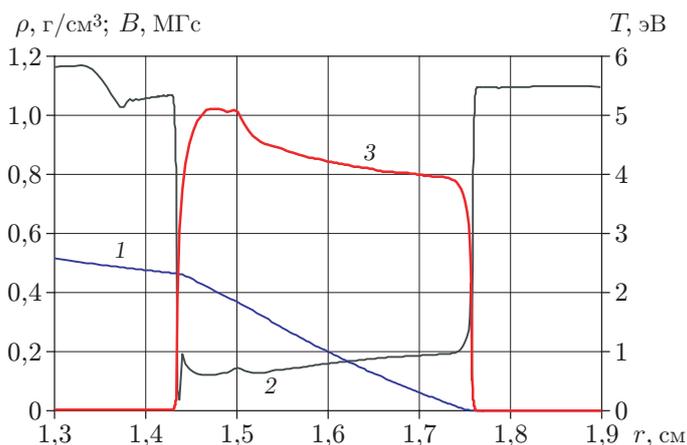


Рис. 4. Распределения магнитного поля B (1), плотности ρ (2) и температуры T (3) по радиусу для медной фольги с начальной толщиной 0,0625 мм в момент $t = 5$ мкс

ном результаты расчетов для медной и алюминиевой фольги близки. Ниже приводятся результаты, полученные для медной фольги.

Напряжение на внешней поверхности медной фольги, которое может быть непосредственно измерено в опыте, показано на рис. 3. Также на рис. 3 показаны средняя плотность и удельное сопротивление фольги, вычисленные с использованием значений радиусов ее внешней и внутренней поверхностей, тока и напряжения на внешней поверхности. Пик напряжения, соответствующий взрыву алюминиевой фольги, меньше, чем в случае медной фольги, при этом взрыв происходит позднее.

На рис. 4 показаны распределения МГД-величин по сечению взрывающейся медной фольги, которые характеризуют степень однородности ее взрыва. В расчетах обнаружено, что обусловленный теплопереносом нагрев пластика, окружающего фольгу, не приводит к существенной утечке тока в разряд по пластику. В расчетах также установлено, что увеличение толщины медной фольги приводит к увеличению неоднородности электровзрыва и более значительной утечке тока в разряд по изолятору. Расчеты показали, что в алюминиевой фольге разряд происходит более равномерно, чем в медной.

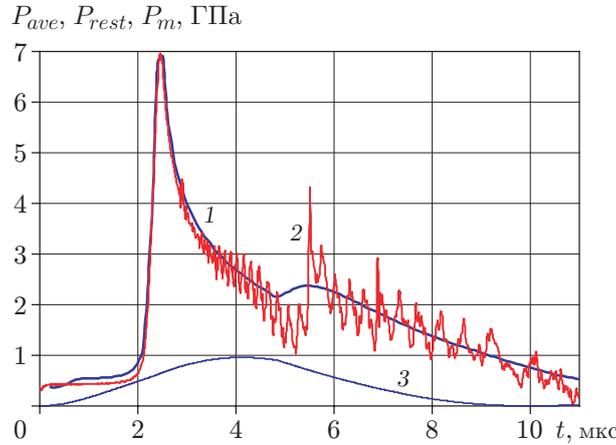


Рис. 5. Зависимости среднего по объему давления P_{ave} в медной плазме, полученного в МГД-расчете (1), восстановленного давления P_{rest} , полученного в одномерном гидродинамическом расчете внешнего слоя пластика с заданной скоростью на внутренней поверхности, найденной в МГД-расчете (2), и осредненного магнитного давления P_m (3) от времени

Проведя измерения, можно определить давление плазмы внутри фольги. В [10] предложена расчетно-экспериментальная методика восстановления давления металлической плазмы при условии, что уравнение состояния материала, окружающего фольгу, известно. На рис. 5 показаны давление, полученное в одномерном гидродинамическом расчете параметров движущегося слоя пластика в случае заданной скорости на внутренней границе (эта скорость найдена в МГД-расчете, а в эксперименте ее можно определить, например, с помощью велосиметрических методик, просвечивая лазером окружающий фольгу диэлектрик, и получаемой при таком просвечивании информации о движении границы фольги, если этот диэлектрик прозрачный), и осредненное по объему давление в медной фольге, полученное в МГД-расчетах. Тепловое давление P_{rest} в фольге вычислялось по формуле

$$P_{rest} = P_h - P_m, \quad B_b = \frac{I}{5r_{in}}, \quad P_m = \frac{1}{3} \frac{B_b^2}{8\pi}$$

(I — ток в системе, МА; P_m — магнитное давление, ГПа; P_h — гидродинамическое давление, ГПа; $r_{in} = r_2 - \delta$ — внутренний радиус фольги, см).

Из рис. 5 следует, что на всех стадиях взрыва, в том числе на стадии существования ТПВ, значения давления в плазме, полученные в МГД-расчете и гидродинамическом расчете динамики пластика с известным уравнением состояния, достаточно хорошо согласуются.

Измеряя напряжение и ток в эксперименте, можно найти джоулево тепловыделение, и если удастся определить давление во взорванной фольге, то с помощью уравнения энергии

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{EI}{m} - P \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

(ε — внутренняя энергия; m — масса фольги на единицу длины; V — объем фольги на единицу длины) можно найти внутреннюю энергию ТПВ. На рис. 6 показаны зависимости от времени джоулевой энергии на 1 г вещества, выделяющейся в фольге при протекании через нее тока, средней расчетной внутренней энергии ε_f и средней внутренней энергии в фольге ε_{rest} , восстановленной (вычисленной) с использованием уравнения (2), восстановленного давления P_{rest} (см. рис. 5) и объема фольги, измеряемого на основе определения

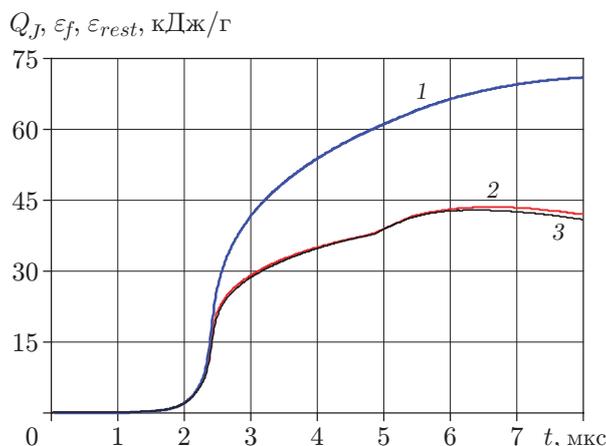


Рис. 6. Зависимости средней джоулевой энергии на 1 г вещества Q_J , выделяющейся в фольге (1), средней расчетной внутренней энергии ε_f (2) и средней восстановленной внутренней энергии в фольге ε_{rest} (3) от времени

координат границ. Из рис. 6 следует, что расчетные значения внутренней энергии хорошо согласуются с восстановленными значениями энергии.

Зная напряжение и ток, можно определить также удельное сопротивление ТПВ. Таким образом, с использованием данных о динамике границ фольги, токе и напряжении можно определить уравнения состояния и проводимости ТПВ в рассматриваемых экспериментах.

Недостатком системы с нагрузкой, взрываемой током изнутри, является достаточно узкий диапазон значений температуры ($2 \div 5$ эВ), которые можно получить при выполнении требования однородности разряда по сечению фольги. При увеличении плотности тока реализуются режимы с неоднородным взрывом фольги и нагревом преимущественно ее внутренней поверхности.

Заключение. Проведено моделирование электровзрыва цилиндрической металлической фольги, зажатой между слоями изолятора, с использованием в качестве источника энергии установки RHELIX. Показана возможность получения ТПВ с плотностью более $0,1$ г/см³ и температурой $3 \div 4$ эВ. За счет использования энергии источника рассматриваемая система с трансформатором тока позволяет получить большой объем электровзрывной плазмы. При этом геометрическая конфигурация нагрузки и постановка эксперимента представляются более предпочтительными для диагностики по сравнению с экспериментом со взрывом проволоки. Показана возможность 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reinovsky R. E. Warm dense matter: Another application for pulsed power hydrodynamics // Dig. Tech. Papers of the 17th IEEE Intern. pulsed power conf., Washington, June 28 — July 2, 2009. S. 1., 2009. P. 203–208.
2. Sasaki T., Kikuchi T., Nakajima M., et al. Tamped target for warm dense matter experiments using intense heavy ion beams // J. Phys. 2008. V. 112. P. 042027.
3. Лебедев С. В. Возможность использования “электрического взрыва” проволок для исследования металлов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1968. Т. 6. С. 157–159.

4. **Gathers G. R., Shaner J. W., Brier R. L.** Improved apparatus for thermophysics measurements on liquid metals up to 8000 K // *Rev. Sci. Instrum.* 1976. V. 47, N 4. P. 471–479.
5. **Bailey J. E., Knudson M. D., Carlson A. L., et al.** Time-resolved optical spectroscopy measurements of shocked liquid deuterium // *Phys. Rev. B.* 2008. V. 78. P. 144107(17).
6. **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 of the 17th IEEE Intern. pulsed power conf., Washington, June 28 — July 2, 2009.* S. 1., 2009. P. 215–220.
7. **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. V. 104, N 3. P. 035001(4).
8. **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. V. 38. P. 1815–1821.
9. **Reinovsky R. E., Atchison W. L., Rousculp C., et al.** Pulsed high magnetic fields for exploring the dynamic properties of materials // *Proc. of the 13th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Suzhou (China), 6–9 July 2010.* Chángsha: Nat. Univ. Defence. Technol., 2012. P. 44–45.
10. **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 the Intern. conf. “XIV Khariton’s topical scientific readings”, Sarov, Mar. 12–16, 2012.* Sarov: VNIIEF, 2013. P. 95–103.
11. **Reass W. A., Vaca D. M., Griego J. R., et al.** Electrical design and operation of the Phelix pulsed power system // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. V. 42, N 10, pt 2. P. 2934–2942.
12. **Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н.** Программа UP-Ok для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы.* 1982. № 3. С. 11–14.
13. **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 // *Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics “Megagauss fields and pulsed power systems”, Novosibirsk, July 3–7, 1989.* N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 743.
14. **Гаранин С. Ф., Мамышев В. И.** Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // *ПМТФ.* 1990. № 1. С. 30–37.
15. **Гаранин С. Ф., Иванова Г. Г., Кармишин Д. В., Софронов В. Н.** Диффузия мегагауссного поля в металл // *ПМТФ.* 2005. Т. 46, № 2. С. 5–12.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.