

УДК 537.84+539.89

DOI 10.53403/9785951505170_2021_26_2_66

Возможности использования установки «Гамма» для изучения свойств материалов в области существования теплого плотного вещества и давлений до 100 ГПа

С. Ф. Гаранин, С. Д. Кузнецов

Представлены результаты предварительных расчетов возможных экспериментов по получению теплого плотного вещества (ТПВ), а также ударному и квазиизэнтропическому сжатию некоторых материалов (Ta, Si, Al) с использованием мощной электрофизической установки «Гамма», которая может использоваться в полном 16-модульном (ток в нагрузке до 10 МА) и начальном 4-модульном вариантах (ток в нагрузке до 3 МА). Токовая кривая в нагрузке определяется электротехническими параметрами установки и ее передающих линий, а также с помощью результатов экспериментов с одним модулем. Приведены схемы возможных опытов по получению ТПВ и опытов с лайнерами для изучения свойств веществ, а также параметры скоростей, давлений и температур, которые могут быть получены в таких опытах.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны генераторы высоковольтных импульсов на основе ступенчатых передающих линий [1], которые, в основном, используются для генерации импульсов рентгеновского излучения в рентгенографических исследованиях. В процессе создания и эксплуатации импульсных ускорителей подтверждена высокая эффективность генераторов на основе ступенчатых передающих линий и накоплен большой опыт по разработке и эксплуатации таких систем. Одним из последних генераторов этого типа является установка «Гамма-1» [2], испытанная в одномодульном варианте. Предполагается создание более мощных установок на основе объединения 4 и 16-типовых модулей «Гамма-1» при помощи общего токосборника [3], что позволит проводить целый ряд исследований в области физики высоких плотностей энергии и исследовать свойства материалов в области мегабарных давлений.

Электрическая эквивалентная схема установки для проведения расчетов

Принцип работы установки состоит в управляемом с помощью коммутаторов разряде электрической энергии, накопленной в ступенчатой формирующей линии на электрофизическую нагрузку. Детальные расчеты импульса напряжения на выходе формирующей линии приведены в работе [3]. Для упрощенных расчетов использовалась электрическая схема, учитывающая форму импульса напряжения в выходном каскаде установке на выходе в магнитно-изолированную передающую линию. Для работы на токовую нагрузку в схему установки вводится узел сумматора тока с отдельных модулей [4]. Общая индуктивность сумматора тока и магнитно-изолированных передающих линий может быть подсчитана по геометрическим размерам [5]. Принципиальная электрическая схема, использовавшаяся для расчетов импульсов тока и напряжения в нагрузке, приведена на рис. 1. Аналогичная упрощенная схема использовалась для моделирования импульсов тока ряда других установок, имеющих похожую электротехническую реализацию, таких как Ангара-5 [6, 7]. На этой схеме показаны генераторы напряжения U , форма напряжения которых получена из опытов с одним модулем [5], эквивалентные импедансы источников напряжения Z_0 , индуктивности магнитно-изолированной передающей линии L_m , также учтена индуктивность L_v до источника потерь в концентраторе, который может шунтировать разряд через нагрузку переменным сопротивлением R_s , индуктивность после шунта L_0 , а также параметры нагрузки L_l .

Кривая напряжения может быть восстановлена по измерениям напряжения на входе в магнитно-изолированную линию, полученного в опытах с одним модулем. Если кривая напряжения генератора известна, то, используя параметры цепи на рис. 1, можно получить кривые токов на жесткую нагрузку с малой индуктивностью по сравнению с индуктивностью цепи при одновременном срабатывании всех модулей, показанные на рис. 2. Для расчетов использовались следующие параметры цепи: $Z_0 = 2,9$ Ом, $L_m = 87$ нГн, $L_v = 15$ нГн, $L_0 = 2$ нГн.

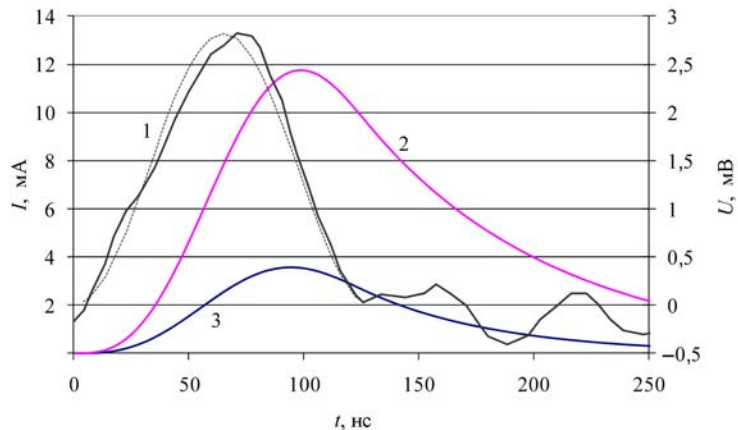
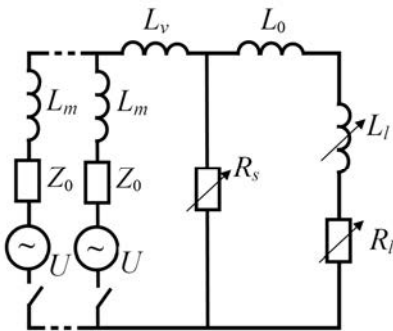


Рис. 1. Упрощенная модель цепи для установки «Гамма», использовавшаяся в расчетах

Рис. 2. Кривая напряжения на изоляторе магнитно-изолированной передающей линии (1) и ее приближение кривой вида $U_{\max} \sin^2(\pi t/T)$ ($U_{\max} = 2,8$ МВ, $T = 130$ нс), тока при одновременном разряде 16-ти (2) и 4-х (3) модулей установки «Гамма» на нагрузку с индуктивностью, малой по сравнению с индуктивностью цепей установки

Установка позволяет провести целый ряд экспериментов по исследованию свойств материалов при высоких давлениях. Изменение амплитуды и профилирование импульса могут значительно расширить возможные применения установки для проведения экспериментов по квази-изэнтропическому сжатию материалов.

Возможные нагрузки для проведения исследований свойств материалов при коротком импульсе установки

Короткий и мощный токовый импульс установки позволяет производить ударное нагружение различных материалов как в цилиндрической, так и плоской геометрии. Установка также может быть использована для получения ТПВ при взрыве проволочек и фольг в цилиндрической геометрии. Возможные типы нагрузок представлены на рис. 3. На рис. 3, *а* показана нагрузка в геометрии обычного Z-пинча, обратным тоководом в этом случае служит внешняя арматура лайнера, и достаточно миниатюрная диагностика для измерения параметров лайнера должна быть размещена во внутренней части нагрузки. Примером такой постановки экспериментов могут служить опыты на Z-машине [8]. На рис. 3, *б* показана нагрузка в геометрии обратного Z-пинча, этот случай обладает рядом преимуществ по размещению диагностической аппаратуры для измерения параметров лайнера, так как вся аппаратура располагается снаружи и имеет гораздо лучший доступ.

Для расчетов использовались широкодиапазонные уравнения состояния веществ, которые описаны в работе [9] и применялись в расчетах различных задач лайнерной физики.

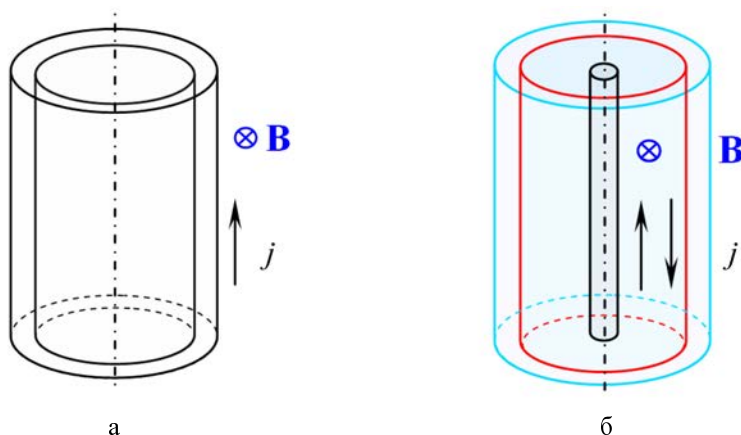


Рис. 3. Физическая схема цилиндрической нагрузки в геометрии прямого и обратного Z-пинча

В работах [10, 11] изучается система для ТПВ при электрическом взрыве тонкой металлической фольги, зажатой между слоями изолятора. Такая постановка эксперимента обеспечивает однородность ТПВ и облегчает возможности его диагностики. Электрический взрыв металлической фольги может быть осуществлен с помощью токов таких источников, как спиральный взрывомагнитный генератор с узлом разрыва или стационарная установка ЛАНЛ PHELIX [12]. Проведенные по одномерной методике [13] расчеты показывают, что возможно достижение параметров

ТПВ в этой геометрии с использованием установки «Гамма». Расчеты проведены при пропускании тока 2 (см. рис. 2) через медную фольгу толщиной 0,0625 мм в системе рис. 3, б с характерными размерами $r_1 = 0,7$ см, $r_2 = 1,5$ см, $\Delta = 2$ см, при этом погонная индуктивность нагрузки $L_l = 1,52$ нГн/см. Характерные профили представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, короткий импульс тока позволяет получить ТПВ при взрыве фольг тоньше скин-слоя с температурой в несколько эВ и плотностью $\sim 5\%$ от твердотельной, за счет того, что удастся разогреть плазму за времена, меньшие времени разлета. Величина скин-слоя определяется задаваемой токовым импульсом скоростью нарастания магнитного поля.

Одной из вариаций нагрузки в геометрии обратного пинча могут быть опыты с плоскими пластинами, физическая схема одной из постановок опытов приведена на рис. 5. Характерными чертами рассмотренных типов нагрузок являются малые начальная индуктивность и ее изменение по сравнению с параметрами установки, и, как следствие, малое влияние на эффективную токовую кривую от установки. Короткий токовый импульс установки дает возможность запустить сильную ударную волну через исследуемые материалы, при этом магнитное поле и джоулев нагрев не должны оказывать влияние на исследуемый образец. Расчет в такой геометрии показан на рис. 6. Ток установки, показанный на рис. 2, пропускался через плоские пластины шириной 10 мм. С использованием разнотолщинных образцов возникает возможность измерить скорость ударной волны, массовую скорость и восстановить параметры вещества на ударной адиабате. Выбранные нами материалы являются широко исследованными и эталонными для проведения опытов по ударному нагружению [14].

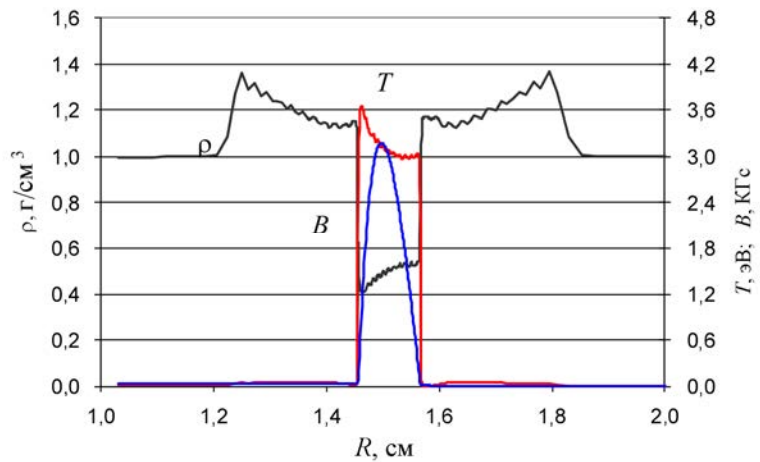


Рис. 4. Профили магнитогиродинамических величин на момент 0,5 мкс при взрыве медной фольги толщиной 0,0625 мм на радиусе 1,5 см током установки «Гамма» в 16-модульном варианте, зажатой между двумя слоями изолятора

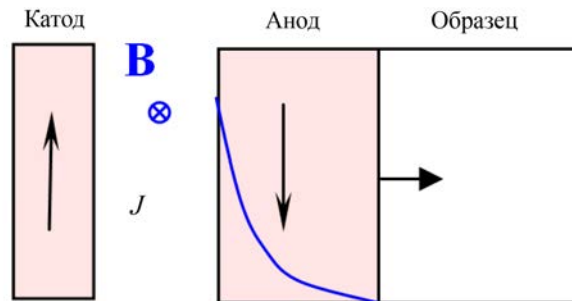


Рис. 5. Физическая схема плоской нагрузки для изучения свойств материалов

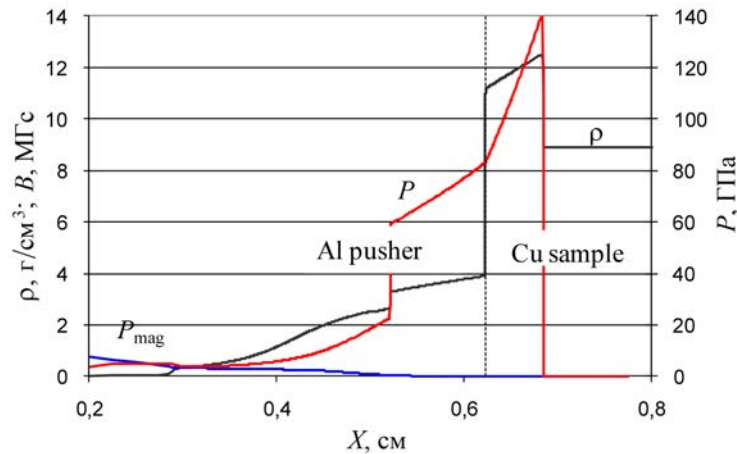


Рис. 6. Профили магнитогиродинамических величин на момент 0,4 мкс в процессе работы нагрузки для изучения свойств материалов, нагружаемой током установки «Гамма» в 16-модульном варианте

Возможные нагрузки для проведения исследований с использованием профилированного импульса установки

При обеспечении возможности одновременного включения различных модулей установки можно создать профиль импульса тока для обеспечения изэнтропического сжатия материалов

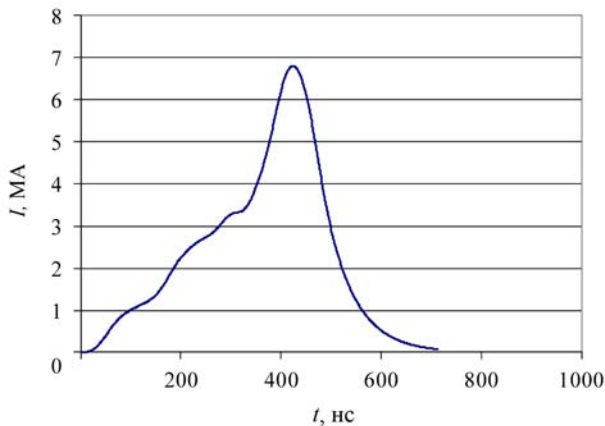


Рис. 7. Кривая тока при одновременном разряде 16-ти модулей установки «Гамма» на нагрузку с малой индуктивностью

в мишени. Основная цель состоит в растягивании фронта импульса и обеспечении плавного его нарастания, это достигается постепенным включением модулей установки. Подбор токовой кривой осуществлялся приближением к плавной токовой кривой в виде суммы синусов, не создающей ударных волн в исследуемом образце, форма возможной токовой кривой показана на рис. 7.

В качестве геометрии была выбрана геометрия рис. 3,а с размерами образца от $r_1 = 0,19$ см до $r_2 = 0,23$ см, который примыкает к алюминиевому лайнеру толкателю с внешним радиусом $r_0 = 0,31$ см.

Кривые скорости внутренней границы образца показаны на рис. 8. Кривые распределения давления по образцу на характерный момент 450 нс после прохождения импульса тока показаны на рис. 9.

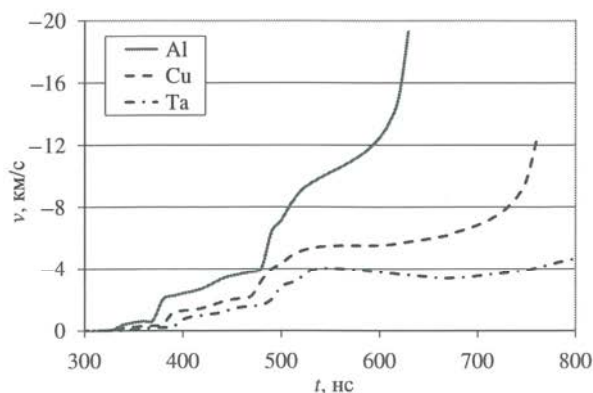


Рис. 8. Кривая скорости внутренней границы образца тока при нагружении током, показанном на рис. 7, при разряде 16-ти модулей установки «Гамма»

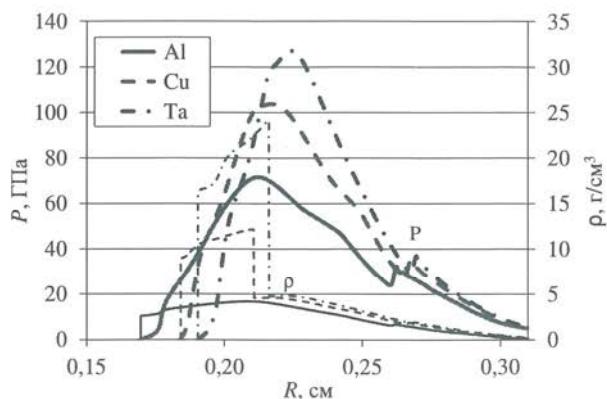


Рис. 9. Профили давления и плотности в образце и лайнере толкателе на момент 0,47 мкс при нагружении током, показанном на рис. 7, при разряде 16-ти модулей установки «Гамма»

Заключение

Рассмотрены возможности использования мощной электрофизической установки «Гамма», которая создается РФЯЦ-ВНИИЭФ, для исследования свойств материалов в области высоких плотностей энергии в случае дополнения конструкции общим токосборником. Это позволит проводить те же опыты, что и на установках со сходной энергетикой, таких как PTS. Рассмотрены возможные постановки экспериментов для получения ТПВ, ударного и изэнтропического нагружения материалов. В качестве исследуемых материалов в расчетах использовались хорошо исследованные материалы (Ta, Cu, Al). Показана возможность генерации плавного импульса тока, необходимого для создания изэнтропического сжатия образцов. В работе приведены расчеты некоторых из возможных экспериментов, в которых достигаются давления в диапазоне 100 ГПа при различных режимах нагружения исследуемых образцов. Дальнейшее уточнение параметров установки в процессе разработки позволит уточнить постановку и результаты расчетов.

Список литературы

1. Басманов В. Ф., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. Обзор сильнотоочных импульсных ускорителей электронов, созданных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе ступенчатых линий // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2015. Вып. 20. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. New schemes for high-voltage pulsed generators based on stepped transmission lines // Proc. of IX Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS 92), Washington DC, 1992. Vol. 1. P. 511–516.
2. Zavyalov V. N., Gordeev V. S., Punin V. T. et al. High-current pulsed electron accelerator “Gamma-1” with output power up to 1.5 TW // Proc. of International Conference on Plasma Science (ICPSA-2013), Singapore, 2013.

3. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В. Проект сильноточного импульсного ускорителя электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. Вып. 3.
4. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Пунин В. Т. и др. Проект электрофизической установки «Гамма-4» // Сб. тр. XVI Харитоновских тематических научных чтений. 2014. С. 32–37.
5. Selemir V. D., Zaviyalov N. V., Gordeev V. S. et al. Obtaining Ultrahigh Pressures in Configuration of Multi-Wire Z- θ Pinch on Gamma Facility. 20. 2016.
6. Alexandrov V. V., Frolov I. N., Fedulov M. V. et al. Prolonged plasma production at current-driven implosion of wire arrays on Angara-5-1 facility // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. Vol. 30. P. 559.
7. Ning Ding. Theoretical and numerical research of wire array and dynamic hohlraum at IAPCM // Matter and Radiation at Extremes. 2016. Vol. 1, 3.
8. Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G. et al. Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // Journal of Applied Physics. 2016. 119. 015904.
9. 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. New York: Nova Science Publishers, 1990. P. 743.
10. Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Reinovsky R. E. Study of the prospect of using the PHELIX facility to create warm dense matter by electrical explosion of aluminum and copper foils // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2015. Vol. 56, N 1. P. 10–15.
11. Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Reinovsky R. E. Study of the feasibility of Warm Dense Matter generation using metal foil electrical explosion under megaampere current drive // Dig. Tech. Papers, 20-th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Austin, TX, USA, 2015. P. 622–627.
12. Reass W. A., Baca D. M., Griego J. R. et al. Electrical design and operation of the PHELIX pulsed power system // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, N 10. Part II. P. 2934.
13. 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. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. № 3(4). С. 11–14.
14. Nellis W. J., Mitchell A. C., Young D. A. Equation-of-state measurements for aluminum, copper, and tantalum in the pressure range 80–440 GPa 0.8–4.4 Mbar // Journal of Applied Physics. 2003. 93. 1.

Capabilities of Gamma Facility to Study Material Properties in the Range of Warm Dense Matter and Pressure up to 100 GPa

S. F. Garanin, S. D. Kuznetsov

Some computational modeling of experiments for WDM generation, shock and quasi-isentropic compression of some materials (Ta, Cu, Al) with the Gamma machine currents are presented. Application of this installation at full in the 16-module variant (the maximal current to the load up to 10 MA) and the initial 4-module variant (the maximal current to the load 3 MA) was investigated. The current curves in the load were obtained with the parameters of the installation and its transmission lines and results of experiments with a single working module. Physical schemes of possible experiments to study the material equations of state and the ranges of velocity, pressure and temperature attainable in these experiments are presented.