

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ДАВЛЕНИЯ В ОБРАЗЦАХ ВЕЩЕСТВ, ИЗОЭНТРОПИЧЕСКИ СЖАТЫХ ДО СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ, ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОГРАФИРОВАНИЯ СЖИМАЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

### PLOTTING PRESSURE PROFILES IN SAMPLES OF ISENTROPICALLY COMPRESSED SUBSTANCES UP TO ULTRA-HIGH PRESSURES USING X-RAY RADIOGRAPHY DATA OF COMPRESSED SAMPLES

*Г. В. Борисков, Н. И. Егоров, В. И. Тимарева*  
*G. V. Boriskov, N. I. Egorov, V. I. Timareva*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
 пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
 Russian federal nuclear center RFNC-VNIIEF

Изложены постановка эксперимента и методики определения давления в исследуемых и эталонных образцах, изоэнтропически сжатых до давлений в несколько мегабар. При построении используются результаты обработки рентгеновских снимков сжимаемых образцов.

This paper presents description of methods for plotting pressure profiles in studied and reference samples of substances, which are isentropically compressed up to the pressures of several megabar. Analysis results of X-ray images of the compressed samples are used for plotting.

В работе [1] изучалась возможность экспериментального построения кривой холодного сжатия – нулевой изотермы – для веществ со средним и большим атомным номером ( $Z$ ) путём проведения опытов, в каждом из которых исследуемое вещество сжимается изоэнтропически с помощью давления сверхсильного магнитного поля. В [2] изложена постановка, результаты расчёта процесса сжатия и результаты обработки данных, полученных в серии таких опытов. В данной работе излагаются методы построения профиля давления, реализуемого в камере сжатия в момент её рентгенографирования. Зная этот профиль, можно определить давление и сжатие в исследуемом образце.

Экспериментальная установка содержит: устройство сжатия; рентгенографическое устройство; элементы электроизмерительных схем; устройства подрыва и синхронизации; источники питания. Рентгенографическое устройство состоит из бетатрона и системы регистрации. Основными элементами устройства сжатия являются (см. рис. 1): двухкаскадный генератор МК-1 [3]; камера сжатия [4]; криогенное устройство [5]. Камера сжатия образована толстостенной медной трубкой и торцевыми заглушками из сплава на основе вольфрама. В камере коаксиально располагаются слои исследуемого и эталонного веществ. Начальное давление в камере равно атмосферному. Криоустройство слу-

жит для охлаждения содержимого камеры сжатия до требуемой начальной температуры и удержания его в этом состоянии в течение времени, необходимого для проведения эксперимента.

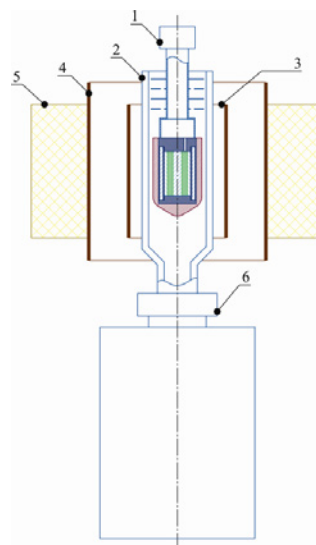


Рис. 1. Эскиз устройства сжатия: 1 – камера сжатия, заполненная эталонным, контрастирующим и исследуемым веществами, 2 – криопровод, 3 – второй каскад генератора, 4 – соленоид начального поля генератора (первый каскад), 5 – кольцевой заряд взрывчатого вещества, 6 – сосуд для хранения жидкого хладагента

В процессе работы генератора МК-1 созданное при запитки соленоида начальное магнитное поле  $B_0$  усиливается до мегагауссовых значений, оказывая на внешнюю поверхность камеры сжатия однородное, плавно изменяющееся во времени, магнитное давление. Под действием давления магнитного поля трубка камеры схлопывается без образования ударных волн и сжимает расположенные внутри неё вещества до мегабарных давлений.

При проведении опыта производилось рентгенографирование центральной части экспериментального устройства в тот момент процесса сжатия, когда в камере сжатия достигалось сверхвысокое давление. Извлечённая из снимка информация о размерах образцов используется для определения их сжатия. Зная сжатие, коэффициент термического расширения и плотность образца при нормальных условиях, легко определить его плотность в момент рентгенографирования. По плотности эталонов, с помощью их известной изоэнтропы, можно определить давление в эталонах и, с учётом градиентов, в исследуемом веществе. В качестве эталона лучше всего подходит алюминий [6-9]. Для определения по рентгеновскому снимку размеров сжатых образцов с приемлемой точностью, на границах, отделяющих эталонные образцы друг от друга и от обжимающей трубки, располагался тонкий слой из высокоплотного материала (т.н. контрастирующий слой, или контрастер), изготавливаемый из тяжёлого сплава на основе вольфрама (марки ВНМ или ВНЖ).

В качестве исследуемого вещества в проведённых опытах использовался сплав ВНМ-3-2.

Размещение образцов внутри камеры было таким, как предлагалось в работе [1] (см. рис. 2): на оси – стержень из алюминия (т.н. центральный, эталон), далее по радиусу – исследуемый образец цилиндрической формы, над ним – второй образец из алюминия (т.н. периферийный эталон) также в виде толстостенной трубки. Выше коаксиально располагался т.н. датчик давления – эталонный слой алюминия, отделённый от периферийного эталона и от обжимающей трубки тонкими контрастирующими слоями из сплава ВНМ. (Внешний контрастирующий слой необходим для повышения качества рентгеновского изображения.)<sup>1</sup> С помощью датчика давления

можно определить давление, а по нему сжатие периферийного эталона. Зная последнее, можно найти внешний радиус исследуемого образца, необходимый для определения его сжатия. Внутренний радиус исследуемого образца, тоже необходимый для определения сжатия этого образца, а также сжатия, а, следовательно, и давления в центральном эталоне, измеряется по рентгеновскому снимку. По этому же снимку находятся и внутренние радиусы контрастирующих слоёв, определяющие размеры датчика давления. Их знание необходимо для определения давления в самом датчике. Здесь и далее под давлением слоя подразумевается величина, усреднённая по объёму слоя.

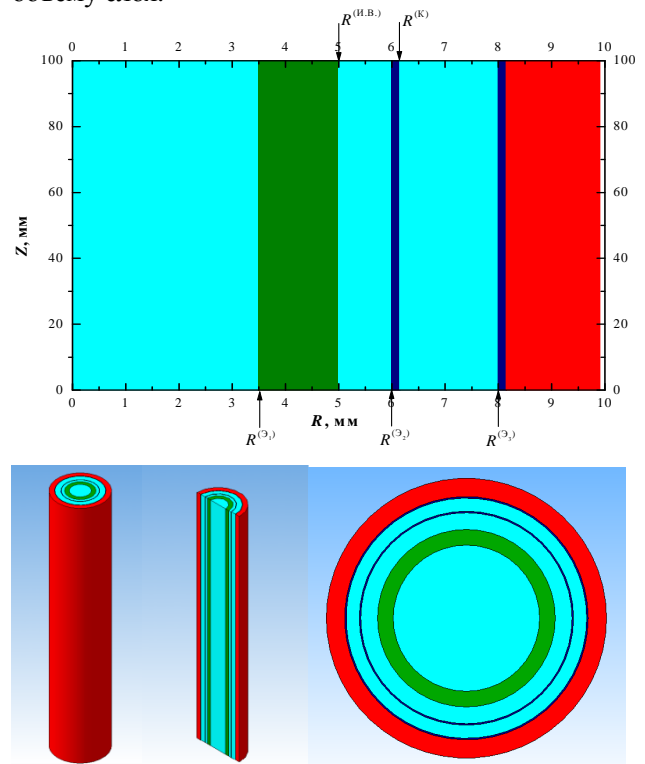


Рис. 2. Способ взаимного расположения образцов в камере сжатия с двумя эталонами и дополнительным датчиком давления

Процесс, происходящий в описанном выше устройстве сжатия, рассчитывался с помощью одномерного магнитогидродинамического кода «Hz», описание которого вместе с прилагающейся к нему библиотекой определяющих соотношений приведено в [1]. Представленные ниже рисунки показывают расчётные временные и радиальные зависимости основных интересующих нас величин для проведённых экспериментов. (Время отсчитано от начала запитки генератора МК-1.)

На рис. 3 для одного из проведённых опытов приведены расчётные зависимости от времени для

<sup>1</sup>Начальные размеры камеры сжатия и её содержимого близки к приведённым в [1]: радиус центрального эталона  $R^{(Ц)}$  равен 3,50 мм, внешний радиус исследуемого образца  $R^{(И.В.)}$  – 5,00 мм, периферийного эталона  $R^{(О.2)}$  – 7,35 мм, контрастирующего слоя  $R^{(К)}$  – 7,50 мм, третьего алюминиевого слоя  $R^{(О.1)}$  – 9,00 мм, толщина внешнего контрастирующего слоя равна 0,15 мм и, наконец, толщина медной обжимающей трубки равна 1,75 мм. Точность измерения начальных поперечных размеров исследуемого и эталонных образцов и контрастеров составляет 5 мкм.

среднего<sup>2</sup> давления в различных слоях внутри камеры сжатия: в центральном эталоне (сплошная голубая линия), исследуемом образце (темно-зелёная линия), периферийном эталоне (штриховая голубая линия), контрастере (сплошная фиолетовая линия), эталонном слое датчика давления (штрихпунктирная голубая линия) и втором контрастирующем слое (штриховая фиолетовая линия).

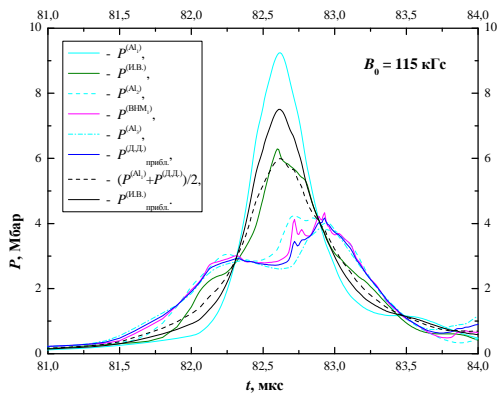


Рис. 3. Расчётные зависимости среднего давления от времени

На рис. 4 для показан (в эйлеровых координатах) радиальный профиль давления внутри камеры на расчётный момент времени, близкий к моменту, соответствующему времени рентгенографирования, и находящийся на переднем фронте импульса сжатия. (Профиль захватывает также часть обжимающей трубки, примыкающую к внешнему контрастирующему слою.) Цветные линии соответствуют таковым на двух предыдущих рисунках.

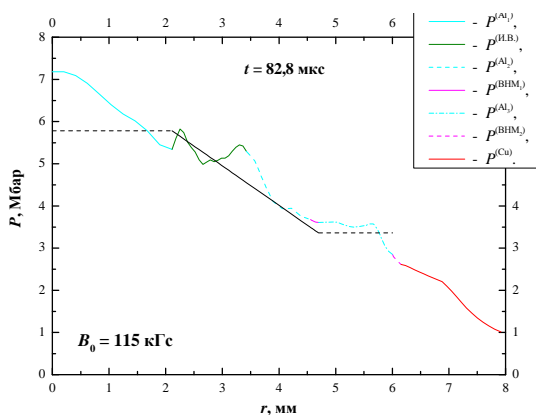


Рис. 4. Расчётный профиль давления внутри камеры сжатия на момент времени, близкий к расчётному моменту рентгенографирования сжатых образцов

Полученное на снимке рентгеновское изображение сканировалось на денситометре, после чего подвергалось математической обработке. В результате обработки были измерены: 1) радиус  $r^{(Э1)}$  центрального эталона (совпадающий с внутренним радиусом исследуемого образца), 2) внешний радиус  $r^{(Э2)}$  периферийного эталона (совпадающий с внутренним радиусом контрастирующего слоя датчика давления), 3) внешний радиус  $r^{(Э3)}$  эталонного слоя датчика давления (совпадающий с внутренним радиусом второго контрастирующего слоя).

Давление в исследуемом веществе, соответствующее его сжатию, вычисляется по формуле:  $P^{(И.В.)} = P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}} / (1 + \epsilon_P)$ , где  $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$  – приближённое значение, вычисляемое только с использованием полученных в эксперименте данных (в данном случае – значений радиусов  $r^{(Эi)}$  ( $i = 1; 2; 3$ )) и известных изоэнтроп эталона и контрастера, а  $\epsilon_P$  – рассчитываемая с помощью кода «Hz» поправка, учитывающая отличие  $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$  от точного значения  $P^{(И.В.)}(\sigma^{(И.В.)})$ . Здесь  $\sigma^{(И.В.)}$  – сжатие исследуемого вещества по отношению к нормальной плотности.

Во втором и третьем опытах проведённой серии применялся наиболее простой, описанный в [1] метод, в котором величина  $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$  определяется как среднее арифметическое давлений в центральном и периферийном эталоне (см. чёрную штриховую линию на рис. 3). В первом эксперименте давление  $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}}$  определялось по другому – методом линейного профилирования (ему соответствует чёрная сплошная линия на рис. 3а), когда в исследуемом веществе и в периферийном эталоне строится линейный профиль давления. Два коэффициента, определяющих профиль, находятся приравниванием крайних значений профиля давлению в центральном эталоне и в датчике давления (см. рис. 4).

Итак, записываем:  $P(r) = Ar + B$ , а коэффициенты  $A$  и  $B$  находим из условий:  $P(r^{(Э1)}) = P^{(Al)}(\sigma^{(Э1)})$  и  $P(r^{(K)}) = P^{(Al)}(\sigma^{(Э3)})$ . Таким образом, получаем:  $A = -(P^{(Al)}(\sigma^{(Э1)}) - P^{(Al)}(\sigma^{(Э3)})) / (r^{(K)} - r^{(Э1)})$ ,  $B = (r^{(K)} \cdot P^{(Al)}(\sigma^{(Э1)}) - r^{(Э1)} \cdot P^{(Al)}(\sigma^{(Э3)})) / (r^{(K)} - r^{(Э1)})$ .

Используя этот линейный профиль для усреднения давления по объёму исследуемого образца, получаем:  $P^{(И.В.)}_{\text{прибл.}} = a \cdot P^{(Al)}(\sigma^{(Э1)}) + b \cdot P^{(Al)}(\sigma^{(Э3)})$ .

Здесь  $a = [(r^{(K)} - r^{(И.В.)}) / (2r^{(И.В.)} + r^{(Э1)}) + (r^{(K)} - r^{(Э1)}) / (r^{(И.В.)} + 2r^{(Э1)})] / 3(r^{(K)} - r^{(Э1)})(r^{(И.В.)} + r^{(Э1)})$ ,  $b = (r^{(И.В.)} - r^{(Э1)}) / (2r^{(И.В.)} + r^{(Э1)}) / 3(r^{(K)} - r^{(Э1)})(r^{(И.В.)} + r^{(Э1)})$ .

Значение внешнего радиуса исследуемого образца  $r^{(И.В.)}$ , необходимое для вычисления коэффициентов  $a$ ,  $b$  и сжатия исследуемого вещества,

<sup>2</sup>Усреднение проводится по объёму той части образца, в которой он сжат однородно в осевом направлении.

находится из равенства  $P^{(\text{Э}2)}_{\text{прибл.}} \cong P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}2)})$ . Выражение для давления  $P^{(\text{Э}2)}_{\text{прибл.}}$  получается путём усреднения давления по объёму периферийного эталона с помощью построенного профиля  $P(r)$ :

$$P^{(\text{Э}2)}_{\text{прибл.}} = c \cdot P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}1)}) + d \cdot P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}3)}), \text{ где}$$

$$c = [(r^{(\text{К})} - r^{(\text{Э}2)}) (2r^{(\text{Э}2)} + r^{(\text{И.В.})}) + (r^{(\text{К})} - r^{(\text{И.В.})}) (r^{(\text{Э}2)} + 2r^{(\text{И.В.})})] / 3(r^{(\text{К})} - r^{(\text{Э}1)}) (r^{(\text{Э}2)} + r^{(\text{И.В.})}),$$

$$d = [(r^{(\text{Э}2)} - r^{(\text{Э}1)}) (2r^{(\text{Э}2)} + r^{(\text{И.В.})}) + (r^{(\text{И.В.})} - r^{(\text{Э}1)}) (r^{(\text{Э}2)} + 2r^{(\text{И.В.})})] / 3(r^{(\text{К})} - r^{(\text{Э}1)}) (r^{(\text{Э}2)} + r^{(\text{И.В.})}).$$

Сжатие исследуемого вещества вычисляется по формуле:  $\sigma^{(\text{И.В.})} = \sigma^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}} / (1 + \varepsilon_{\sigma})$ . Здесь  $\sigma^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$  – приближённое значение, вычисляемое с использованием  $r^{(\text{Э}1)}$  и приближённого значения внешнего радиуса исследуемого образца  $r^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$ , а  $\varepsilon_{\sigma}$  – рассчитываемая с помощью кода «Hz поправка, учитывающая отличие  $\sigma^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$  от значения, соответствующего точному значению радиуса  $r^{(\text{И.В.})}$ . В том случае, когда давление  $P^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$  определяется первым способом, приближённое значение внешнего радиуса исследуемого образца находится из условия:  $P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}2)}) = P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}3)})$ . При втором способе определения  $P^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$  значение  $r^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$  находится из условия:  $P^{(\text{А}1)}(\sigma^{(\text{Э}2)}) \cong P^{(\text{Э}2)}_{\text{прибл.}}$ . А выражение для  $P^{(\text{Э}2)}_{\text{прибл.}}$  получается путём усреднения давления по объёму периферийного эталона с помощью построенного профиля давления.

Отметим, что средние значения давления и сжатия, найденные более простым способом среднеарифметического суммирования и приравнивания давлений в датчике и периферийном эталоне, при переходе к способу, основанному на построении профиля давления, практически не меняются (различие составляет ~0,5 %), как и ожидалось. При этом погрешности измерения несколько уменьшаются (с ~12 % до ~9 % для давления и с ~19 % до ~13 % для сжатия). Становится немного меньше и градиентная поправка к давлению (7 % вместо –8,5 %). А вот градиентная поправка к сжатию уменьшается более, чем на два порядка: с ~12 % до ~0,1 %. Однако столь малые поправки будут получаться лишь на заднем фронте импульса сжатия (см. чёрную сплошную кривую на рис. 3, показывающую зависимость от времени для давления  $P^{(\text{И.В.})}_{\text{прибл.}}$ , найденного вторым методом)<sup>3</sup>. Для остальных моментов импульса сжатия

поправки по давлению и сжатию не малы (по абсолютной величине могут превышать измерительные погрешности), что говорит о неприменимости линейного профилирования давления для этих моментов.

Таким образом, одной из задач дальнейших исследований будет поиск такого способа построения радиального профиля давления в камере сжатия, который бы давал столь малые поправки на переднем фронте и вблизи максимума сжатия, либо, что ещё лучше, – давал малые поправки на любой момента процесса сжатия.

## Список литературы

1. Борисков Г. В., Егоров Н. И., Коршунов Ф. С. и др. О возможности исследования веществ с большими и средними атомными номерами в опытах по изоэнтропическому сжатию давлением сверхсильного магнитного поля. В кн.: Мощная импульсная электрофизика. XIV Харитоновские чтения. Саров, 11–16 марта, 2012, стр. 513.
2. Борисков Г. В., Быков А.И., Егоров Н. И. и др. Результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию вещества с большим атомным номером. XVII Харитоновские чтения. Саров, 22–27 марта, 2015. Тезисы докладов.
3. Павловский А. И. Природа № 8 39 (1990).
4. Boriskov G. V., Timareva V. I., Panov A. I., Sokolov S. S. “Simulation of Isentropic Compression Process in a Device Based on Magneto-Cumulative Generator”. In: “Megagauss-XI”. Proc. of the Eleventh Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. London, 10-14 September 2006 /Ed. by Ivor Smith and Bucur Novac, London, UK, 2007, p. 219. [These proceedings were printed at the VNIIEF, Sarov, Russia.]
5. Boriskov G. V., Bykov A. I., Egorov N. I., and Pavlov V. N. “Cooling and Condensation of Hydrogen Isotopes in Isentropic Compression Device”. In: 2006 Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. November 5-10, 2006, Santa Fe, New Mexico, USA./Ed. by Gerald F. Kiuttu, Robert E. Reinovsky, and Peter J. Turchi, IEEE, 2007, p. 465.
6. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, № 3. С. 790-798.
7. Симоненко В. А., Волошин Н. П., Владимиров А. С. и др. Абсолютные измерения ударной сжимаемости алюминия при давлениях  $P \tau$  1 ТПа // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. С. 1452-1459.

<sup>3</sup> Момент, когда был сделан основной снимок, приходится как раз на начало заднего фронта импульса сжатия.

8. Nellis W. J., Moriarty J. A., Mitchell A. C. et al. Metals physics at high pressure: aluminum, copper and lead as prototypes // *Phys. Rev. Let.* 1988. Vol. 60, No 14. P. 1414-1417.

9. Greene R. G., Lue H., and Ruoff A. L. Al as a simple solid: high pressure study to 220 GPa (2.2 Mbar) // *Phys. Rev. Let.* 1994. Vol. 73, No 15. P. 2075-2078.