

**Выводы.** В докладе представлены результаты экспериментальных исследований ударно-волновой сжимаемости газообразного дейтерия, изначально находившегося при давлении 15 атм. и температуре  $T_0 = +10^\circ\text{C}$ , в диапазоне волновых скоростей от 2,9 до 6,6 км/с.

В каждом опыте методикой гетеродин-интерферометра PDV регистрировались зависимости скорости движения металлического экрана от времени и моменты выхода ударной волны в дейтерий на поверхность оптического окна, а также скорость границы раздела экран-окно. Зависимости скорости движения экрана от времени, зарегистрированные методикой микроволновой диагностики, согласуются с результатами измерений методикой гетеродин-интерферометра, при этом в проведенных опытах не зарегистрировано превышения проводимости ударно-сжатого дейтерия выше 0,001 См/см.

Полученные в экспериментах данные по ударно-волновой сжимаемости плотного газообразного дейтерия согласуются с результатами расчета с использованием уравнения состояния Копышева-Хрусталева.

### Список литературы

1. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
2. Копышев В.П., Хрусталева В.В. Уравнение состояния водорода до 10 Мбар // ПТМФ. 1980, №1, С. 122-128.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ СПЛАВА ВМ 3-2 ДО СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

*Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров, А.С. Коршунов, В.Н. Павлов,  
И.С. Стрелков, О.М. Сурдин, В.И. Тимарева, С.И. Белов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Изложены постановка и результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию в устройстве на основе магнитокумулятивного генератора «тяжёлого» сплава марки ВМ 3-2 (на основе вольфрама) с нормальной плотностью 17,29 г/см<sup>3</sup> и 18,22 г/см<sup>3</sup>. Полученные на  $P$ - $r$  диаграмме точки сопоставляются с нормальными изоэнтропами, построенными ранее по данным ударно-волновых экспериментов методом Альтшулера-Брусникуина-Кузьменкова. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных точек и указанных полуфемениологических кривых.

### Введение

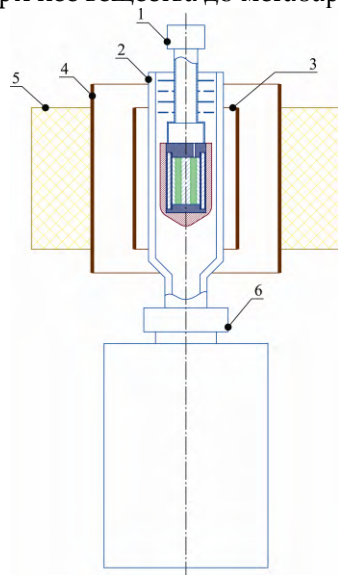
В работе [1] обсуждались результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию тяжёлого сплава марки ВМ-3-2 (содержит 95 % W, 3 % Ni, 2 % Cu) с нормальной плотностью 17,29 г/см<sup>3</sup> в устройстве на основе взрывомагнитного генератора (ВМГ) типа МК-1 с целью построения кривой холодного сжатия (нулевой изотермы) данного сплава в области сверхвысоких давлений. В данной работе изложена постановка и результаты двух дополнительных экспериментов по исследованию нулевой изотермы сплава ВМ-3-2. Нормальная плотность исследуемых образцов, используемых в проведённых экспериментах, равнялась 18,22 г/см<sup>3</sup>.

### 1 Постановка эксперимента

Экспериментальная установка содержит: устройство сжатия; рентгенографическое устройство; элементы электроизмерительных схем; устройства подрыва и синхронизации; источники питания. Рентгенографическое устройство, в свою очередь, состоит из бетатрона (в

качестве генератора импульсов рентгеновского излучения) и системы регистрации. Основными элементами устройства сжатия являются (см. рисунок 1): магнитокумулятивный генератор МК-1 [2]; цилиндрическая камера сжатия; криогенное устройство (Криоустройство, необходимое для охлаждения содержимого камеры сжатия до требуемой начальной температуры и удержания его в этом состоянии в течение времени, необходимого для проведения эксперимента. Оно включает в себя сосуд для хранения жидкого хладагента и вакуумируемый криопровод, изготовленный из стальных тонкостенных трубок и предназначенный для подачи хладагента из криососуда к месту расположения камеры сжатия. В проведённых опытах начальная температура  $T_0 \approx 295$  К поэтому криогенное устройство в них не применялось). Двухкаскадный генератор МК-1 сверхсильного магнитного поля служит источником сверхвысокого давления и включает в себя соленоид начального магнитного потока (он же – первый каскад генератора), дополнительную токнесущую оболочку (второй каскад) и кольцевой заряд взрывчатого вещества в качестве основного источника энергии. Камера сжатия образована толстостенной медной обжимающей трубкой и массивными торцевыми заглушками из сплава на основе вольфрама. В камере коаксиально располагаются слои исследуемого и эталонного веществ, отделённые друг от друга и от обжимающей трубки контрастирующими оболочками, а сама камера размещена коаксиально с генератором таким образом, что её центр совпадал с центром области однородности магнитного поля, создаваемого генератором (Показанная на рис. 1 ребристая стальная трубка, припаянная к камере, применяется лишь в опытах с криоустройством и служит для ввода в камеру элементов электрической цепи измерения температуры, а кольцеобразные рёбра на её наружной поверхности обеспечивают эффективное охлаждение камеры сжатия парами хладагента). Начальное давление в камере равно атмосферному.

В процессе работы генератора МК-1 созданное при запитки соленоида начальное магнитное поле  $B_0$  усиливается до мегагауссных значений, оказывая на внешнюю поверхность камеры сжатия однородное, плавно изменяющееся во времени, магнитное давление. (Начальное поле генератора регистрировалось осциллографическим способом по показаниям индукционных датчиков, его значение оказалось равным 156 кГс в первом опыте и 153 кГс – во втором.) Под действием давления магнитного поля трубка камеры схлопывается без образования ударных волн и сжимает расположенные внутри неё вещества до мегабарных давлений.



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

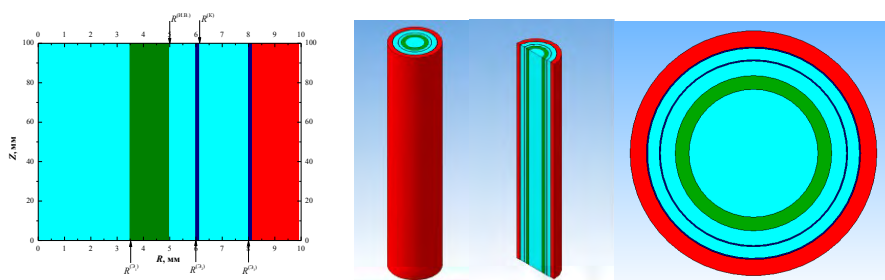
Рисунок 1. Эскиз устройства сжатия

При проведении опыта производилось рентгенографирование центральной части экспериментального устройства в начальный момент (предварительный снимок) и в тот момент процесса сжатия, когда в камере сжатия достигалось сверхвысокое давление (основной снимок). Предварительный снимок необходим для юстировки рентгенографического устройства.

Извлечённая из основного 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 [3-6]. Используемая нами изоэнтропа алюминия построена в соответствии с работой [6], в основе которой лежат данные, полученные авторами [6] на алмазных наковальнях до давления 2,2 Мбар, а также данные ударно-волнового сжатия вплоть до 10 Мбар [3-5]. Для того чтобы определить по рентгеновскому снимку размеры сжатых образцов с приемлемой точностью, на границах, отделяющих эталонные образцы друг от друга и от обжимающей трубки, должен располагаться тонкий слой из высокоплотного материала (т.н. контрастирующий слой, или контрастер). В его состав входят вещества с большими порядковыми номерами в таблице Менделеева. Для экспериментов по изоэнтропическому сжатию контрастирующие слои обычно изготавливаются из тяжёлого сплава на основе вольфрама (марки ВНМ или ВНЖ).

В качестве исследуемого вещества с большим атомным номером в проведённых опытах, как и в работе [1], использовался сплав ВНМ-3-2. Такой выбор обусловлен двумя обстоятельствами. Во-первых, сжимаемость этого сплава при сверхвысоких давлениях близка к сжимаемости веществ, которые предполагается исследовать в дальнейшем (Ta, U); а во-вторых, он неоднократно использовался в качестве контрастера в выполненных ранее опытах с изотопами водорода [7], а также в качестве утяжелителя и контрастера в экспериментах по исследованию проводимости инертных газов [8].

Размещение образцов внутри камеры было таким же как и в [1] (см. рисунок 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 (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).



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

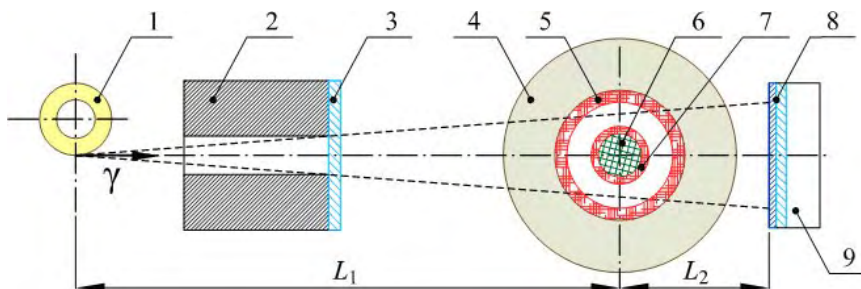
Эталоны изготовлены из алюминиевого сплава высокой чистоты (не менее 99,5 % Al). Контрастеры изготовлены из сплава ВНМ-3-2 с нормальной плотностью 17,29 г/см<sup>3</sup>, исследуемый образец – из того же сплава, но с нормальной плотностью 18,22 г/см<sup>3</sup>. Начальные размеры камеры

сжатия и её содержимого близки к приведённым в [1]: радиус центрального эталона  $R^{(31)}$  равен 3,50 мм, внешний радиус исследуемого образца  $R^{(1,2)}$  – 5,00 мм, периферийного эталона  $R^{(32)}$  – 7,35 мм, контрастирующего слоя  $R^{(K)}$  – 7,50 мм, третьего алюминиевого слоя  $R^{(33)}$  – 9,00 мм, толщина внешнего контрастирующего слоя равна 0,15 мм и, наконец, толщина медной обжимающей трубки равняется 1,75 мм.

Точность измерения начальных поперечных размеров исследуемого и эталонных образцов и контрастеров в проведённых экспериментах составляла 5 мкм.

## 2 Рентгенографическая методика

Применяемая схема радиографической регистрации процесса приведена на рисунке 3. Данные получают путём просвечиванием объекта коротким импульсом тормозного излучения бетатрона БИМ-234 [9, 10] с регистрацией теневого изображения на фотохромной пластине.

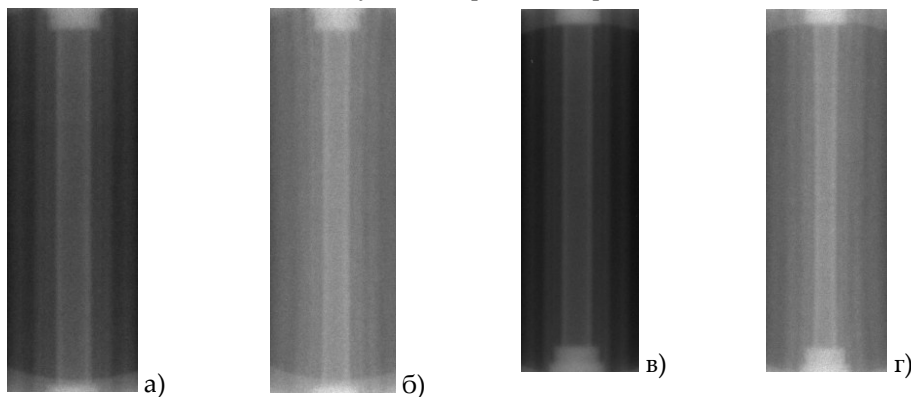


1 – бетатрон, 2 – канал вывода излучения с коллиматором, 3 – защита от продуктов взрыва, 4 – заряд ВВ, 5 – соленоид МК генератора (второй каскад не показан, чтобы не загромождать рисунок), 6 – содержимое камеры сжатия, 7 – обжимающая трубка, 8 – кассета, 9 – контейнер;  
 $L_1 = 5$  м,  $L_2 = 1,25$  м

**Рисунок 3.** Схема радиографической регистрации (вид сверху)

Регистратор представляет собой размещаемый на врытой в грунт бетонной плите взрывозащищённый контейнер (см. рис. 4), внутри которого расположена кассета с конвертирующими и фоточувствительными элементами. В качестве фоточувствительных элементов используются фотохромные пластины (5 ÷ 7 шт.) в комбинации с конвертирующими танталовыми экранами. Основным преимуществом фотохромных пластин по сравнению с плёнками является их большая чувствительность и возможность многократного использования каждой пластины для записи изображения.

Относящиеся к проведённым опытам рентгеновские снимки показаны на рисунке 4. Отметим достаточно высокое качество полученных рентгенограмм.



**Рисунок 4.** Экспериментальные рентгенограммы: а) – предварительный снимок (образцы в начальном состоянии) первого эксперимента, б) – основной снимок (момент сжатия) первого эксперимента, в) – предварительный снимок второго эксперимента, г) – основной снимок второго эксперимента

Полученные рентгеновские изображения сканировались, после чего подвергались математической обработке. Для каждого из снимков строилась денситограмма – зависимость плотности почернения плёнки от радиального расстояния. По расположению её минимумов определялись необходимые размеры. Изображения обрабатывались с помощью нелинейной фильтрации. Используемая нами методика позволяет измерять требуемые геометрические размеры с точностью до сотых долей миллиметра, при этом значения самих измеряемых радиусов сжатых образцов оказались лежащими в интервале 2÷7 мм.

В опытах в результате обработки снимков измерялись следующие величины: 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). Получены следующие значения измеряемых радиусов:  $r^{(Э1)} = (2,66 \pm 0,03)$  мм,  $r^{(Э2)} = (5,57 \pm 0,02)$  мм,  $r^{(Э3)} = (6,68 \pm 0,03)$  мм – в первом эксперименте;  $r^{(Э1)} = (2,15 \pm 0,02)$  мм,  $r^{(Э2)} = (5,10 \pm 0,04)$  мм,  $r^{(Э3)} = (6,25 \pm 0,02)$  мм – во втором.

### 3 Определение параметров сжатых образцов

Давление в исследуемом веществе, соответствующее его сжатию, вычисляется по формуле:  $P^{(И.В.)} = P^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}/(1 + \varepsilon_P)$ , где  $P^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}$  – приближённое значение, вычисляемое только с использованием полученных в эксперименте данных (В случае сплава такими данными являются значения радиусов  $r^{(Эi)}$  ( $i = 1; 2; 3$ ), а в случае гидрида – значения радиусов  $r^{(LiH)}$  и  $r^{(Alj)}$  ( $j = 1; 2$ ) и известных изоэнтроп эталона и контрастера, а  $\varepsilon_P$  – рассчитываемая с помощью кода «Н<sub>2</sub>» [11] 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. Для сплава ВНМ-3-2 давление  $P^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}$  находится путём усреднения по объёму исследуемого образца с помощью радиального профиля, аппроксимирующего истинное распределение давления в интересующих нас сжатых образцах. Метод построения такого профиля в эйлеровых координатах изложен в [12].

Сжатие сплава вещества вычисляется по формуле:  $\sigma^{(И.В.)} = \sigma^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}/(1 + \varepsilon_\sigma)$ , где  $\sigma^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}$  – приближённое значение, вычисляемое с использованием  $r^{(Э1)}$  и приближённого значения внешнего радиуса  $r^{(И.В.)}$  исследуемого образца, найденного по изложенной в [12] методике,  $\varepsilon_\sigma$  – рассчитываемая с помощью кода «Н<sub>2</sub>» поправка, учитывающая отличие  $\sigma^{(И.В.)_{\text{прибл.}}}$  от значения, соответствующего точному значению радиуса  $r^{(И.В.)}$ . Способ нахождения поправок  $\varepsilon_P$  и  $\varepsilon_\sigma$  изложен в [12].

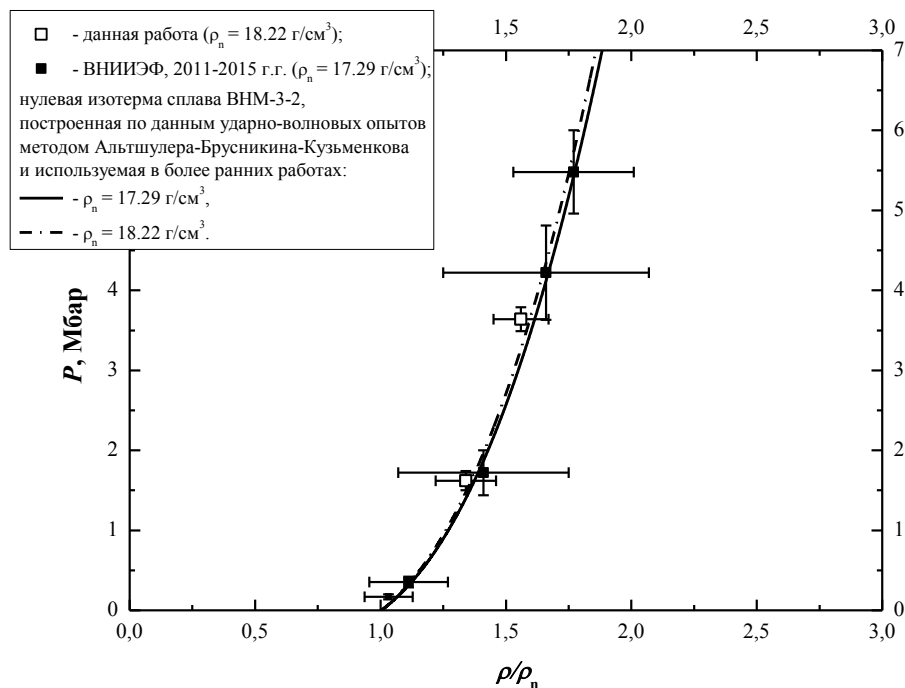
Точность определения сжатия и давления определяется, прежде всего, точностью измерения внешних радиусов эталонных образцов в начальном (при нормальных условиях) и в сжатом состоянии. Погрешности измерения радиусов сжатых оболочек на порядок превышают погрешность измерения начальных размеров, поэтому последней мы пока пренебрегаем. Погрешность измерения давления и сжатия вычислялась в соответствии с правилом вычисления погрешности функции от нескольких переменных по изложенной в [1] процедуре. В данном случае такими переменными являются радиусы  $r^{(Эi)}$  ( $i = 1; 2; 3$ ).

### 4 Результаты экспериментов

После обработки данных, полученных в описываемых опытах со сплавом ВНМ-3-2, на его фазовой диаграмме в координатах «сжатие-давление» построены две дополнительных точки. Обе принадлежит изоэнтропе, соответствующей начальной температуре исследуемого образца, равной  $T_0 \approx 295$  К. Начальное давление в образце было близко к атмосферному ( $P_0 \approx 1$  бар). Вследствие малости тепловой составляющей давления отличие этой изоэнтропы от кривой холодного сжатия намного меньше минимальной погрешности, с которой может быть определено давление или плотность исследуемого вещества. (Указанное различие в исследуемой нами области составляет менее процента, в то время как минимальная достижимая в настоящее время погрешность превышает 3 %.) Поэтому можно считать, что обе точки относятся к нулевой изотерме сплава ВНМ-

3-2. Они имеют следующие координаты:  $P = (1,62 \pm 0,12)$  Мбар,  $\sigma = (1,34 \pm 0,12)$  (первый эксперимент);  $P = (3,64 \pm 0,15)$  Мбар,  $\sigma = (1,56 \pm 0,11)$  (второй эксперимент).

Точки показаны на рисунке 5 в сопоставлении с нулевой изотермой, построенной нами ранее для сплава ВНМ-3-2 методом Альтшулера-Брусникина-Кузьменкова (АБК) [13] и используемыми при моделировании работы устройства сжатия. Наблюдается хорошее согласование всех полученных точек с изотермой АБК.



**Рисунок 5.** Расчётная кривая "холодного" сжатия сплава ВНМ-3-2 в сопоставлении с экспериментальными результатами

## Заключение

Проведены эксперименты по изоэнтропическому сжатию вещества с большим атомным номером (сплав ВНМ-3-2) до сверхвысоких давлений. В результате обработки полученных в опытах данных построены точки на фазовой диаграмме указанных веществ. Для сплава положение всех точек согласуется с используемой в расчётах полуфеноменологической кривой его холодного сжатия.

## Список литературы

- 1 Г.В. Борисков, А.И. Быков, Н.И. Егоров и др., ФГВ **54** (№ 5), 18 (2018).
- 2 Г.В. Борисков, А.И. Быков, М.И. Долотенко и др., УФН **181**, (№ 4) 37 (2011).
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.

- 7 Boriskov G.V., Bykov A. I., Egorov N. I. et al. // Contrib. Plasma Phys. 51, No.4, 339-348 (2011); Egorov N. I., Boriskov G.V., Bykov A. I., et al. // Contrib. Plasma Phys. 51, No.4, 333-338 (2011).
- 8 Bykov A., Boriskov G., Dolotenko M. et al. "Isentropic Compression of Argon and Krypton Using MC-1 Flux Compression Generator". In: Megagauss Magnetic Field Generation, Its Application to Science and Ultra-High Pulsed-Power Technology. Proc. of the VIII-th Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Tallahassee, Florida, USA, 18-23 October 1998. / Ed. by Hans J. Schneider-Muntau, World Scientific, 2004, p. 237.
- 9 Павловский А.И. и др. ДАН СССР 160 68 (1965).
- 10 Kuropatkin Y. P. et al. Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron BIM – M. In: 11<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference // Digest of technical papers / Eds. G. Cooperstein and I. Vitkovitsky. Piscataway NJ USA, IEEE, 1998. P. 1663-1668.
- 11 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.]
- 12 Борисков Г.В., Быков А.И., Егоров Н.И., и др. Результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию вещества с большим атомным номером. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Мощная импульсная электрофизика. XVII Харитоновские чтения. Саров, 23-27 марта. — 2015. — С. 201-212.
- 13 Альтшулер Л.В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А. Изотермы и функции Грюнейзена 25 металлов // ЖПМТФ. 1987. № 1. С. 134-146.

## МОДЕЛЬ ПЛАВЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВА НА УДАРНОЙ ВОЛНЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ. ПЛАВЛЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ

*И.В. Кузьмицкий*

РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

В работах автора был развит новый подход к описанию фазового превращения, как в инертных материалах, так и применительно к описанию детонации как процесса ФП [1,2]. Отличительной особенностью этого подхода являются такие детали:

- На основании известных экспериментальных данных для зависимостей на ударной волне  $D(U)$ ,  $P(U)$ , которые получены с помощью классической методики «Отражения», строятся зависимости волновой скорости вещества от волновой скорости ударной волны в экране, и определяется область существования экспериментальных точек, которые можно отнести к области появления второго фазового состояния.

Эти точки на самом деле определяют координаты метастабильного состояния первой фазы вещества. Для получения из этих данных координат точек вещества в состоянии второй фазы координаты метастабильных точек первой фазы пересчитываются с помощью метода «Нескольких виртуальных экранов» [3]. Новые правила представляют собой законы сохранения, которые содержат начальные координаты точки старта ударной адиабаты второй фазы. И потому вид уравнений, определяющих законы сохранения (ударная адиабата и прямая Михельсона-Релея) отличается от вида аналогичных зависимостей, которые имеют точку старта в начале координат для первой фазы.

- Ударная адиабата второго фазового состояния и модифицированная прямая Михельсона-Релея стартуют из новой точки в плоскости давление  $P_{sw}$ , удельный объём  $V_{sw}$ , массовая