Ударное сжатие жидкого азота при давлении 320 ГПа

P. $\Phi.$ $Tрунин^{1)}, \ \Gamma.$ B. Борисков, A. И. Быков, A. Б. Медведев, $\Gamma.$ B. Симаков, A. H. Шуйкин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров, Нижегородская обл., Россия

Поступила в редакцию 24 июня 2008 г.

Приведены экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию жидкого азота в мегабарной области давлений. Опыты проведены с использованием измерительного устройства сферической геометрии, в котором давление создается ударом по исследуемым образцам стальной оболочки, разогнанной до скорости $\approx 23\,\mathrm{km/c}$. При реализованном в экспериментах давлении $\approx 320\,\mathrm{\Gamma II}$ а плотность ударно-сжатого азота составляет $\approx 3.4\,\mathrm{r/cm}^3$ (степень сжатия ≈ 4.2). Приводится описание совокупности экспериментальных данных модельным уравнением состояния.

PACS: 07.35.-e, 62.50.+p

Первые измерения ударного сжатия исходно жидкого азота были выполнены в [1] с целью получения данных по уравнению состояния (УРС) одного из основных компонентов продуктов детонации бризантных взрывчатых веществ (ВВ). Максимальные давления P, достигнутые в этих опытах, составили $\approx 40~\Gamma$ Па. Во время проведения исследований [1] существовала реальная возможность проведения экспериментов и при более высоких давлениях, но авторы ограничились теми значениями, которые необходимы для моделирования нормальной детонации ВВ.

В [2] диапазон исследований ударного сжатия жидкого азота был расширен до $P \approx 65\,\Gamma\Pi$ а. В этих экспериментах при $P > 40 \, \Gamma \Pi$ а было обнаружено значительное "смягчение" (увеличение плотности ρ) ударной адиабаты по сравнению с ее тенденцией, выявленной на "начальном" участке. В [3] давление ударной нагрузки было еще более увеличено - до $P \approx 80 \, \Gamma \Pi$ а. В этой же работе был обнаружен необычный ход адиабат двукратного сжатия, при котором они расположены в Pho-координатах выше адиабаты однократного сжатия. Это приводит к довольно редкой ситуации, когда значение параметра Грюнайзена $\gamma = (\partial P/\partial E)_{\rho}/\rho$ (E – удельная внутренняя энергия) становится отрицательным. Необычность поведения ударных адиабат согласуется с проведенными в [3] измерениями температур. Согласно [3], причиной аномалии поведения азота при высоких давлениях является диссоциация плотной молекулярной жидкости (так называемый "диссоциационный фазовый переход"), происходящая с затратой энергии на разрыв межмолекулярных связей и уплотнением атомарного состояния.

В настоящей работе выполнены эксперименты по однократному ударному сжатию азота при более высоких давлениях по сравнению с реализованными в [1-3], в частности, с целью прояснения дальнейших тенденций "мягкого" участка сжимаемости [2,3].

Для создания высоких давлений использовалось мощное взрывное устройство описанного в [4] типа. Его основой является полусферический заряд ВВ, одновременно инициируемый по всей внешней поверхности. Продукты взрыва сходящейся детонационной волны, через небольшой воздушный промежуток, плавно разгоняют стальную оболочку-ударник. При своем движении к центру системы оболочка ускоряется (из-за давлений продуктов взрыва и сферического схождения) и на малых радиусах (близких к радиусу измерений) приобретает скорость $\approx 23 \, \mathrm{km/c}$. Удар оболочки по алюминиевому экрану, прикрывающему исследуемый образец, формирует в экране ударную волну, которая после выхода в жидкий азот создает в нем ударное давление $\approx 300 \, \Gamma \Pi a$.

На рис.1 дана схема измерительного устройства с расположением датчиков, вакуумных областей, экрана и т.п.

В каждом из проведенных трех опытов регистрировалось (с помощью 9 расположенных на "верхнем" и 12 на "нижнем" уровнях электроконтактных датчиков) время прохождения ударной волны $\Delta \tau$ по выбранной базе (толщине) образца азота S. Во всех опытах $S\approx 4$ мм. Средняя скорость ударной волны $D_S=S/\Delta \tau$ несколько отличается от истинной (мгновенной) скорости D, реализуемой на середине радиуса измерений R_M . Переход к мгновенной скорости осуществлялся из сопоставлений расчетных средних и мгновенных скоростей с последующим внесением в экспериментальное значение D_S соответствующей

¹⁾ e-mail: root@gdd.vniief.ru

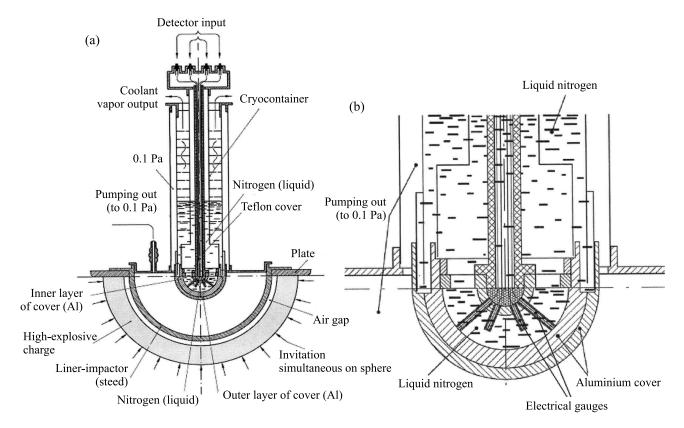


Рис.1

поправки. Вторая поправка к волновой скорости связана с расчетным переносом границы раздела азоталюминий (экран), где выполняется условие равенства давлений и массовых скоростей в Al и N_2 , на радиус R_M . Обе эти поправки невелики (как правило, не превосходят долей процентов от скорости). В нашем случае их величины оказались к тому же разного знака и близкими по абсолютной величине, так что суммарная поправка при интерпретации измеряемых величин не учитывалась.

В соответствие с методом отражения [5] массовая скорость за фронтом ударной волны в азоте U определяется точкой пересечения волнового луча $\rho_0 D$ ($\rho_0=0.81\,\mathrm{r/cm^3}$ — начальная плотность азота) и изэнтропы расширения алюминия (изэнтропа исходит из состояния на ударной адиабате Al, отвечающего R_M). Изэнтропа расширения Al была взята по [6] (где она использовалась для определения состояний ударного сжатия конденсированного водорода в аналогичных настоящим экспериментах). Исходные состояния в алюминиевом экране на радиусе R_M составляют [6]:

$$D_{\rm Al} = 21.15 \, {\rm km/c}, \ \ U_{\rm Al} = 12.53 \, {\rm km/c},$$

$$P_{\rm Al} = 725 \ \Gamma \Pi \text{a} \ (
ho_{0 \, {
m Al}} = 2.74 \, {
m г/cm}^3).$$

В трех проведенных независимых опытах были получены следующие значения волновых скоростей в азоте:

$$D_1 = 22.6 \,\mathrm{km/c}, \ D_2 = 22.8 \,\mathrm{km/c}, \ D_3 = 23.3 \,\mathrm{km/c},$$

чему отвечает среднее значение $D=22.9\,\mathrm{km/c}$. Обычно при проведении подобных измерений с целью увеличения достоверности результатов нами выполняется 4-5 одинаковых (на одном измерительном устройстве) опытов. Здесь же мы были вынуждены ограничиться тремя измерениями (отсутствие значительного взаимного разброса полученных результатов говорит о приемлемости такого сокращения в данном случае).

Значению D и приведенному выше состоянию в алюминиевом экране отвечают следующие параметры ударного сжатия азота:

$$U=17.4\, {
m KM/c},~~P=323\, \Gamma \Pi {
m a},$$
 $ho=3.37\, {
m \Gamma/cm}^3,~~\sigma=
ho/
ho_0=4.16,$ $ho_0=0.81\, {
m \Gamma/cm}^3~~$ при $~T_0=77\, {
m K}.$

Полученная экспериментальная точка показана в $P-\rho$ -координатах на рис.2. Величина сжатия а

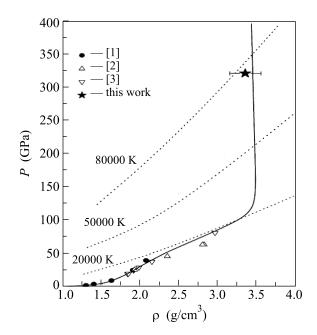


Рис.2. Зависимость давления от плотности вдоль ударной адиабаты исходно жидкого азота $\rho_0=0.81\,\mathrm{г/cm}^3$. Сплошная линия — расчетная ударная адиабата, пунктирные линии — расчетные изотермы

приблизительно соответствует предельному сжатию идеального одноатомного газа. Этот результат в совокупности с данными [1-3], приведенными на том же рисунке, говорит в пользу завершенности диссоциации азота при достигнутых здесь параметрах.

Для описания экспериментальных данных с жидким и газообразным азотом была использована модифицированная модель УРС Ван-дер-Ваальса с учетом химических реакций и ионизации [7-9]. Ранее модель успешно применялась для воспроизведения свойств ударно-сжатых металлов [7,8], продуктов взрыва конденсированных ВВ [10] и др. Конкретизация модельного УРС требует определения коволюмных функций рассматриваемых компонентов смеси, Ван-дер-Ваальсова притяжения и внутренних статистических сумм индивидуальных (в состоянии идеального газа) частиц. Равновесный состав смеси в заданных термодинамических условиях определяется из условия минимума свободной энергии смесевой системы. В пределе малой плотности модель переходит в УРС идеально-газовой смеси.

В расчетах учитывались пять сортов частиц $-N_2$, N, N_2^+, N^+ и электроны. При определении внутренних статсумм частиц учитывалось только основное электронное состояние, сложные частицы описывались моделью жесткий ротатор — гармонический осциллятор. Использовалось предположение об отсутствии влияния ионизации на коволюмы (в этом слу-

чае конкретизация модели требует задания только коволюмов N_2 и N). Притяжение смеси считалось неизменным при реакциях. Коволюмы и притяжение представлялись относительно простыми функциями, свободные параметры которых выбирались на основе, по возможности, оптимального описания эксперимента.

Расчетная ударная адиабата для жидкого азота приведена на рис.2. Там же изображены три модель-

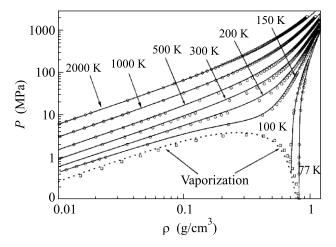


Рис.3. Зависимость давления от плотности при изотермическом (указаны значения температуры) сжатии и на кривой испарения для азота. Значки — данные [12]. Линии — расчет

ные изотермы. В целом модель соответствует эксперименту, отражая его характерные особенности. Расчетом хорошо воспроизводятся и результаты измерения температуры [3,11] вдоль основной ударной адиабаты. Модельным образом также в целом удовлетворительно воспроизводятся $P-\rho$ и $T-\rho$ данные [3] при двукратном сжатии, в том числе качественно описывается ситуация "аномального" взаиморасположения адиабат одно- и двукратного сжатия. Пример описания эксперимента при сравнительно низких плотностях приводится на рис.3.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант #08-02-00476).

^{1.} В.Н. Зубарев, Г.С. Телегин, ДАН СССР **142**, 309 (1962).

^{2.} W. J. Nellis and A. C. Mitchell, J. Chem. Phys. **73**, 6137 (1980)

W. J. Nellis, H. B. Radousky, D. C. Hamilton et al., J. Chem. Phys. 93, 2244 (1991).

^{4.} Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, К.К. Крупников, Н.В. Панов, УФН **166**, 575 (1996).

- Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник, ЖЭТФ 34, 886 (1958).
- Р. Ф. Трунин, Г. В. Борисков, А. И. Быков и др., ЖТФ 76, 90 (2006).
- А.Б. Медведев, Вопросы атомной науки и техники.
 Сер.: Теор. и прикл. физика 1, 12 (1992).
- 8. В. П. Копышев, А. Б. Медведев, *Термодинамическая* модель сжимаемого коволюма, Саров, 1995.
- 9. А.Б. Медведев, Сб. Ударные волны и экстремаль-
- ные состояния вещества, под ред. В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова, М.: Наука, 2000, с. 315-341.
- 10. В. П. Копышев, А. Б. Медведев, В. В. Хрусталев, ФГВ **42**, 87 (2006),
- 11. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гогуля, Ю. А. Долгобородов, ДАН СССР **246**, 579 (1979).
- 12. Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST Webbook, http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid.