Письма в ЖЭТФ, том 88, вып. 3, с. 220 – 223 © 2008 г. 10 августа

Ударное сжатие жидкого азота при давлении 320 ГПа

Р. Ф. Трунин[1], Г. В. Борисков, А. И. Быков, А. Б. Медведев, Г. В. Симаков, А. Н. 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 ≈ 23 км/с. При реализованном в экспериментах давлении ≈ 320 ГПа плотность ударно-сжатого азота составляет ≈ 3.4 г/см^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 ≈ 40 ГПа. 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 $P \approx 65$ ГПа. В этих экспериментах при $P > 40$ ГПа 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 $P \approx 80$ ГПа. В этой же работе был обнаружен необычный ход адиабат двукратного сжатия, при котором они расположены в $P-\rho$-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 ≈ 23 км/с. Удар оболочки по алюминиевому экрану, прикрывающему исследуемый образец, формирует в экране ударную волну, которая после выхода в жидкий азот создает в нем ударное давление ≈ 300 ГПа.

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

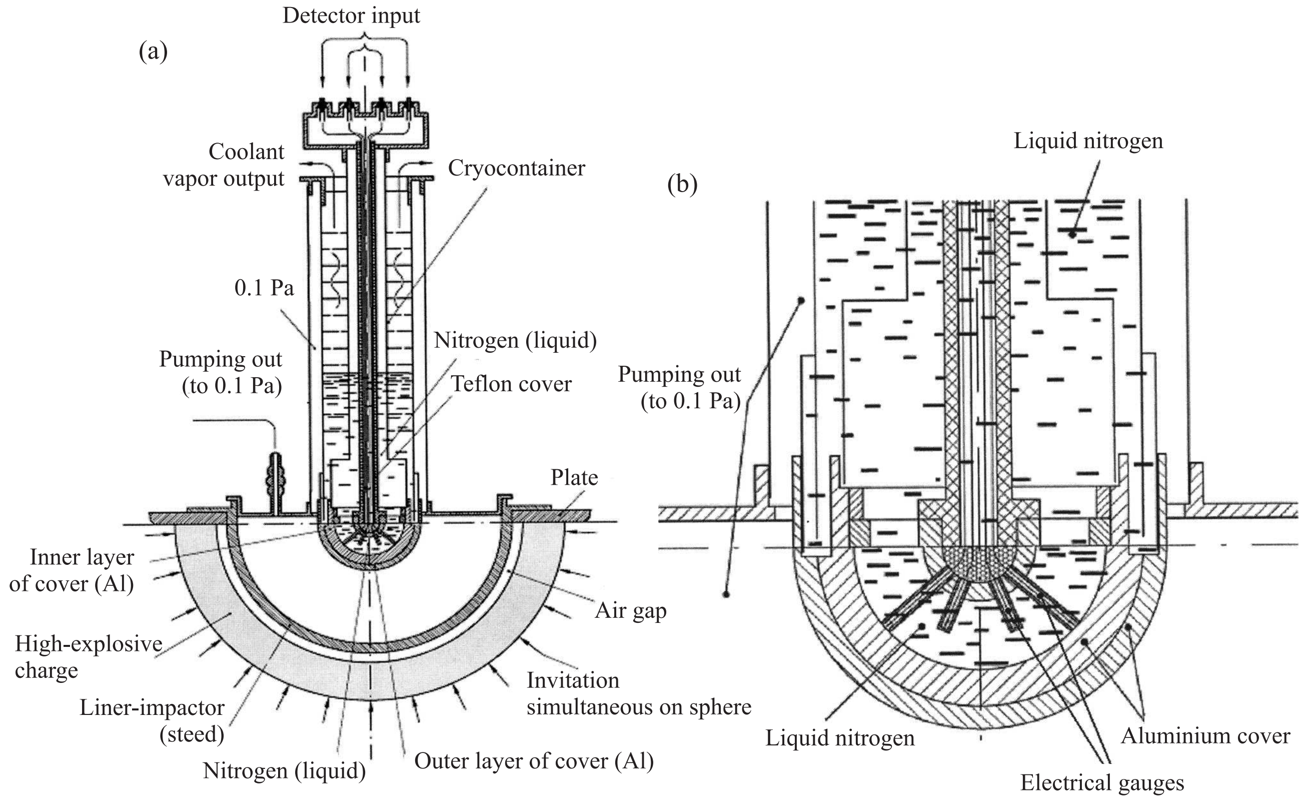

Рис.1

поправки. Вторая поправка к волновой скорости связана с расчетным переносом границы раздела азот–алюминий (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 $\rho_0 D$ ($\rho_0 = 0.81$ г/см^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]:

$$D_{\rm Al} = 21.15\,\text{км/с},\quad U_{\rm Al} = 12.53\,\text{км/с},$$

$$P_{\rm Al} = 725\,\text{ГПа}\ (\rho_{0\rm Al} = 2.74\,\text{г/см}^3).$$

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

$$D_1 = 22.6\,\text{км/с},\quad D_2 = 22.8\,\text{км/с},\quad D_3 = 23.3\,\text{км/с},$$

чему отвечает среднее значение $D = 22.9$ км/с. 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:

$$U = 17.4\,\text{км/с},\quad P = 323\,\text{ГПа},$$

$$\rho = 3.37\,\text{г/см}^3,\quad \sigma = \rho/\rho_0 = 4.16,$$

$$\rho_0 = 0.81\,\text{г/см}^3\ \text{ при }\ T_0 = 77\,\text{К}.$$

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

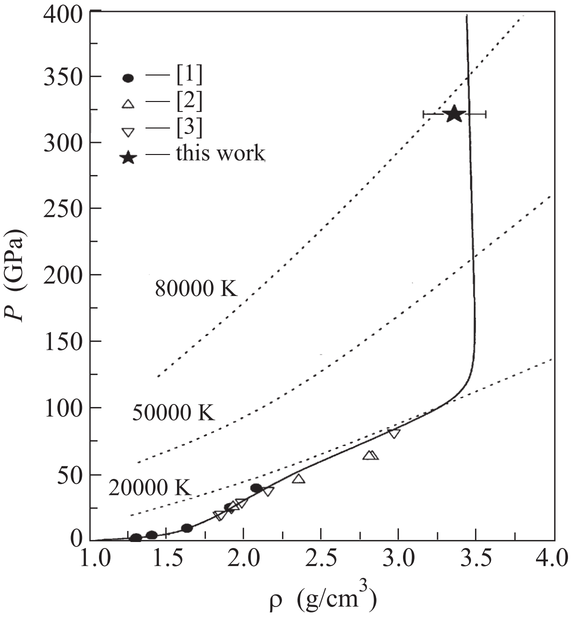

Рис.2. Зависимость давления от плотности вдоль ударной адиабаты исходно жидкого азота $\rho_0 = 0.81\,г/см^3$. Сплошная линия – расчетная ударная адиабата, пунктирные линии – расчетные изотермы

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 ковolюмных 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 случае 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-

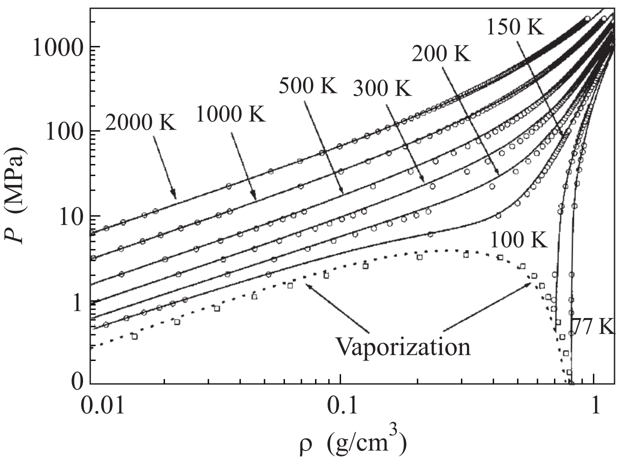

Рис.3. Зависимость давления от плотности при изотермическом (указаны значения температуры) сжатии и на кривой испарения для азота. Значки – данные [12]. Линии – расчет

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).
3. 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).

5. Л. В. Альтшулер, К. К. Крупников, М. И. Бражник, ЖЭТФ **34**, 886 (1958).
6. Р. Ф. Трунин, Г. В. Борисков, А. И. Быков и др., ЖТФ **76**, 90 (2006).
7. 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 экстремальные 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.