

## РАСШИРЕНИЕ ВЕЩЕСТВ ПОСЛЕ СИЛЬНОГО НАГРЕВА В МОЩНЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ

*М. М. Русаков, В. Н. Ногин*  
(Челябинск)

При исследовании уравнений состояния веществ в области плотностей, меньших нормальной, широко используется метод изоэнтронического расширения [1, 2]. В работах [3, 4] после нагрева веществ в мощных ударных волнах наблюдались аномалии в процессе расширения; в [5] аналогичное явление обнаружено для воды.

В настоящих экспериментах исследуемое вещество в виде пробки диаметром 5 и высотой 5,5 мм (гидрид лития) или в виде диска (вольфрам) диаметром 5 и толщиной 0,5 мм вплотную к пробке из парафина высотой 5,5 мм размещалось в начале цилиндрического канала диаметром 5 и длиной 60—200 мм. Канал заполнялся ксеноном, воздухом или дейтерием при различных давлениях. В веществе с помощью генератора сильных ударных волн (УВ) создавалась УВ, после прохождения которой по веществу оно разлеталось в цилиндрический канал. Движение УВ, распространяющейся в газе перед разлетающимся веществом, регистрировалось СФР-2М. По определенной в опытах скорости УВ  $D$  с помощью данных работ [6, 7] определялись массовая скорость  $u$  и давление  $p$  в разлетающемся веществе. Для ксенона зависимости рассчитаны по модели Саха.

Величина  $D$  в пробке из гидрида лития измерялась в специальных опытах с генератором сильных УВ и составила 32,5 км/с. Параметры УВ в вольфрамовом диске не определялись. Его разгон происходил в 2-ударных волнах. Вещество разлетавшегося вольфрамового диска двигалось в виде четко ограниченного сгустка. Импульсным рентгенографированием найдены размеры сгустка, и плотность его на расстоянии 125 мм от начального положения диска составила  $\rho \approx 1$  г/см<sup>3</sup> при атмосферном давлении воздуха в канале.

Результаты опытов по разлету веществ представлены в таблице и на рис. 1. Начальное состояние для гидрида лития (точка 1) находилось по экспериментально измеренной скорости ударной волны в пробке по использованию зависимости  $D(u)$  из [8]. Точки 2 соответствуют разлету в ксенон, 3 — в воздух при атмосферном давлении, 4—6 — в воздух при пониженном давлении. Погрешности у точек соответствуют максимальным погрешностям измерения скоростей в опытах. Из точки 1 на рис. 1, а и точки 3 на рис. 1, б проведены изоэнтропы расширения идеального газа. Через экспериментальные точки (см. рис. 1) проведены

**Результаты опытов по разлету гидрида лития и вольфрама**

Точка на рис. 1	Среда в канале	$D$ , км/с	$p$ , бар	$u$ , км/с	$p_{кан}$ , Торр
<i>Гидрид лития</i>					
2	Ксенон	37	$7,3 \cdot 10^4$	33,4	760
3	Воздух	45,5	$2,5 \cdot 10^4$	40,3	760
4	Дейтерий	54	$4,6 \cdot 10^3$	49	760
5	Воздух	—	$4,5 \cdot 10^2$	61,7	4,5
6	»	—	11,5	93	0,1
<i>Вольфрам (сгусток)</i>					
2	Ксенон	21,2	$2,4 \cdot 10^4$	19,2	760
3	Воздух	26,9	$9 \cdot 10^3$	23,9	760
4	Дейтерий	41	$3,2 \cdot 10^3$	36	760
5	Воздух	—	$2,4 \cdot 10^2$	50	5
6	»	—	8	69	0,15

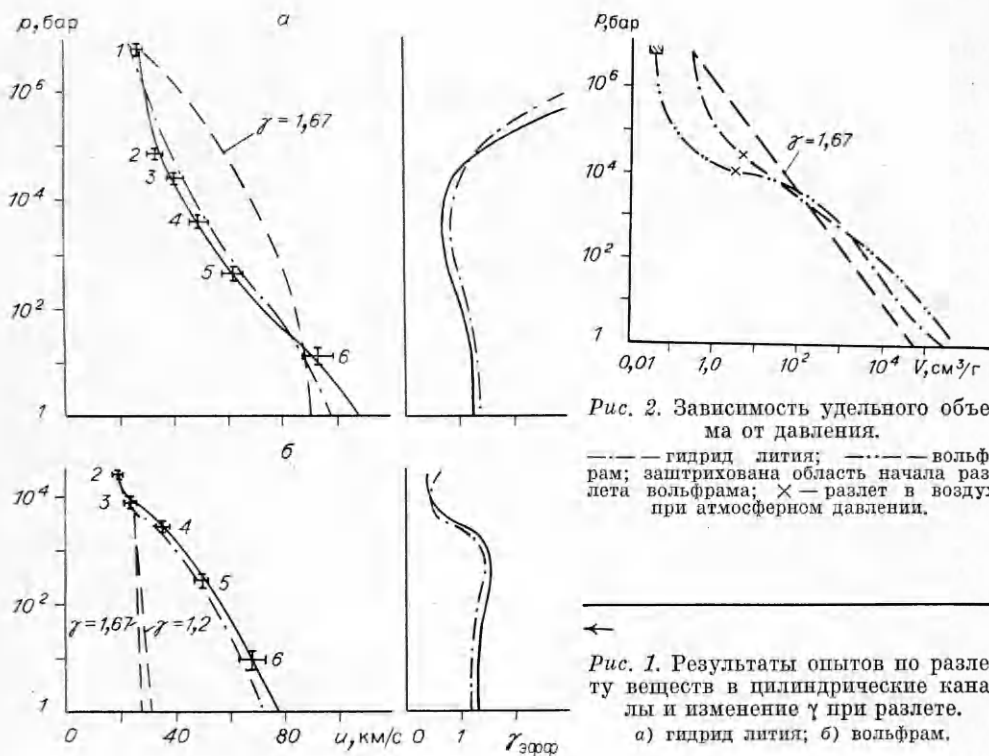


Рис. 2. Зависимость удельного объема от давления.  
 — гидрид лития; — вольфрам; заштрихована область начала разлета вольфрама; × — разлет в воздух при атмосферном давлении.

Рис. 1. Результаты опытов по разлету веществ в цилиндрические каналы и изменение  $\gamma$  при разлете.  
 а) гидрид лития; б) вольфрам.

плавные кривые  $p(u)$  по номинальным значениям параметров (сплошные линии) и через крайние значения с учетом предельных отклонений (штрихпунктирные). С них снимались значения  $p(u)$ , и численным интегрированием соотношения  $du = \sqrt{-dp \cdot dV}$  находилась зависимость удельного объема от давления  $V(p)$  и эффективного показателя адиабаты  $\gamma$  от давления:

$$\gamma_{\text{эфф}}(p) = - \frac{V}{p} \cdot \frac{dp}{dV}.$$

Для гидрида лития в начале процесса расширения вещества показатель  $\gamma_{\text{эфф}} > 3$ , затем он уменьшается до 1 и  $\sim 0,8$  и потом возрастает до 1,25—1,35. Зависимость  $V(p)$  для гидрида лития (рис. 2) показывает, что на начальном этапе расширения плотность вещества падает значительно слабее, чем для идеального газа с  $\gamma = 1,67$  (штриховая линия), в дальнейшем уменьшение плотности ускоряется.

Для вольфрама величины  $p(\gamma)$  и  $p(V)$  получились аналогичными зависимостям для гидрида лития (см. рис. 1, б и 2). Показатель  $\gamma_{\text{эфф}}$  изменяется более резко и снижается примерно до 0,5. Полученные результаты показывают, что в области  $p \leq 10^4$  бар адиабаты расширения гидрида лития и вольфрама имеют аномальные участки с  $\gamma_{\text{эфф}} < 1$  ( $\frac{d^2 p}{dV^2} < 0$ ).

Расчеты проведены для гидрида лития в точке 1 с  $\rho = 3; 4; 4,5$  и  $5 \text{ г/см}^3$ , для вольфрама в точке 3 с  $\rho = 1,0; 0,75; 0,5$  и  $0,1 \text{ г/см}^3$ . Существенной разницы в величине и характере изменения  $\gamma_{\text{эфф}}$  не проявилось.

В результате обработки и анализа опытов по разлету конденсированных веществ после воздействия на них мощных ударных волн, построены изоэнтропы разгрузки гидрида лития и вольфрама в ранее неизученной области давлений и плотностей (давление  $p = 6 \cdot 10^6 \div 10$  бар,  $u \leq 90 \text{ км/с}$ , плотности  $\rho = 4 \div 10^{-5} \text{ г/см}^3$ ). При этом установлено, что

а) расширение веществ при разлете происходит с большим отклонением от законов расширения идеального газа с постоянным показателем адиабаты;

б) изменение мгновенного эффективного показателя  $\gamma$  в процессе расширения происходит в сторону уменьшения, а на отдельных участках — в сторону возрастания;

в) на начальном этапе расширения наблюдается значительно более слабое падение плотности разлетающихся веществ, чем при расширении идеального газа с  $\gamma = 1,67$ . Такая закономерность открывает возможность получения достаточно плотных (близких по плотности к конденсированным веществам) потоков и сгустков веществ. Используя это явление, получили сгусток частиц вольфрама с  $\rho \sim 1 \text{ г/см}^3$  и  $u = 24 \text{ км/с}$ , воздействие которого на преграды описано в [9, 10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
2. Фортв В. Е. ТВТ, 1972, 10, 168.
3. Русаков М. М. ТВТ, 1975, 13, 1, 20.
4. Русаков М. М., Иванов Р. И., Шайдуллин Б. К. и др. ТВТ, 1977, 15, 3, 449.
5. Шарипджанов П. П., Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е. ФГВ, 1983, 19, 5, 149.
6. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха.— М.: Машгиз, 1965.
7. Холев С. Р. Изв. вузов. Физика, 1959, 4, 28.
8. Last Shock Hugoniot data/Ed. S. P. Marsh.— Univ. California press.
9. Русаков М. М. ПМТФ, 1966, 4, 167.
10. Русаков М. М., Шайдуллин Б. К. Космич. исслед., 1979, 17, 1, 172.

Поступила в редакцию 4/II 1987

УДК 536.424

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕЛАКСАЦИИ УПРУГОГО ПРЕДВЕСТНИКА В Ст. 3 И ТИТАНЕ

А. А. Горновой, Е. А. Козлов, А. К. Музыря,  
Е. В. Шорохов  
(Челябинск)

Согласно существующим представлениям [1], пластическое (макро) деформирование материала при импульсном (взрывном) нагружении начинается во фронте пластической волны. Ниже предлагается модель, учитывающая более раннюю стадию зарождения локальных пластических деформаций еще до прихода в заданную точку образца фронта пластической волны. Для описания кинетики затухания амплитуды упругого предела Гюгонио  $P_{xx}^y$  при взрывном нагружении металлов получено уравнение

$$P_{xx}^y = \frac{1-\mu}{1-2\mu} E \left( \frac{V_d}{c^3 \tau^3} \right)^{\frac{1}{\alpha_u}} \left( \epsilon_* - \frac{\alpha RT}{c_p} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right), \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $E$  — модуль нормальной упругости;  $V_d$  — объем дилатона;  $c$  — скорость распространения продольной упругой волны;  $\epsilon_* = 0,2$  — критическая деформация дилатона, соответствующая реализации теоретического значения предела текучести кристаллической решетки при одноосной деформации;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — абсолютная температура тела;  $\tau_0 = 10^{-13} \text{ с}$  — период тепловых колебаний атомов кристаллической решетки;  $\tau$  — временной интервал между последовательным приходом в заданную точку образца фронтов упругой и пластической волн;  $\alpha_u$  — коэффициент гомогенности