

УДК 533.95:538.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСШИРЕНИЯ ВЕЩЕСТВА ПРИ РАЗЛЕТЕ ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МОЩНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

М. М. Русаков

Описаны результаты опытов по изучению разлета парафина и вольфрама после прохождения по ним ударных волн, сообщаящих веществу энергию в сотни раз выше теплоты испарения. Разлет происходил в воздухе при различном давлении или в расширяющемся канале. Опыты показали, что в некотором диапазоне изменения параметров вещества наблюдается расширение с постоянным давлением.

Для решения ряда научных и практических задач необходимо знать термодинамические свойства веществ в области объемов, большого порцевого объема конденсированного состояния. Изучение этих свойств можно проводить при разлете веществ после прохождения по ним мощных ударных волн [1, 2]. При таком разлете вещество в некотором диапазоне изменения параметров может представлять собой сильнонеидеальную

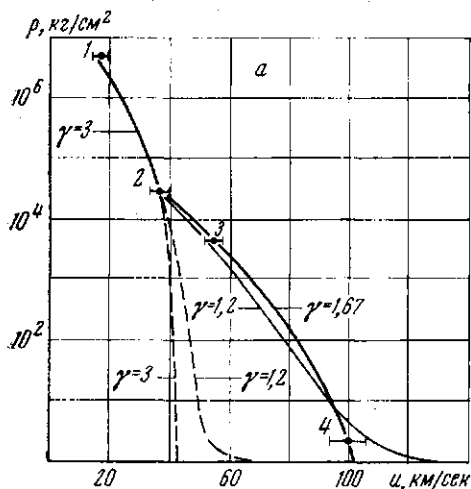
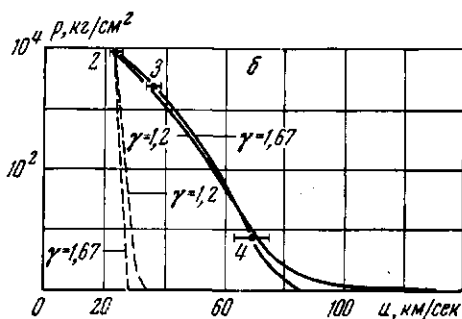


Рис. 1. Расчетные зависимости разлета веществ и результаты опытов:

а — парафин; б — вольфрам



плазму. Модельные уравнения состояния такой плазмы, имеющиеся в настоящее время, предсказывают возможность появления в ней различных фазовых переходов [2-4].

В работе [5] рассматривались опыты по разлету парафина после прохождения по нему ударной волны со скоростью 33 км/сек. Результаты опытов по разлету в воздухе при атмосферном давлении описаны изотропическим расширением с показателем $\gamma=3$. Процесс расширения до более низких давлений в [5] детально не анализировался.

Для изучения процесса расширения вещества проводились опыты, в которых разлет парафина и вольфрама после прохождения по ним ударной волны происходил в цилиндрический канал, заполненный воздухом при различных давлениях (760, 85 и 0,1 мм рт. ст. — точки 2, 3 и 4 соответственно, рис. 1). Результаты опытов в координатах p , u (давление, скорость) нанесены на рис. 1. Точка 1 соответствует определенной в опыте скорости ударной волны в пробке из парафина*.

Описание процесса разлета производилось с помощью уравнения изоэнтропы $p = A\rho^\gamma$ [1]. Для парафина исходными принимались параметры в точке 1. Рассчитанная зависимость с показателем $\gamma = 3$, проходящая через точку 2, показана на рис. 1, а сплошной линией. Вычислив значения плотности ρ_2 и скорости звука C_2 в точке 2, проводились попытки описать

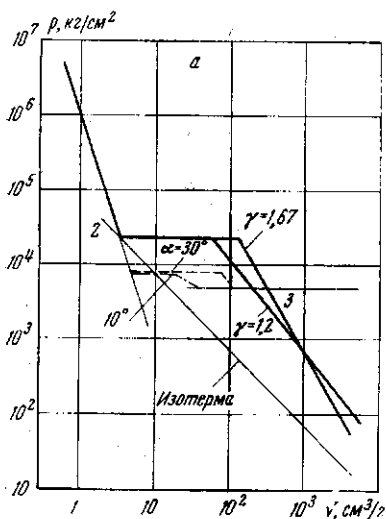
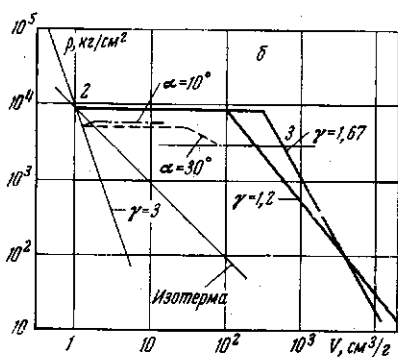


Рис. 2. $p - V$ -диаграммы расширения веществ ($V = 1/\rho$ см³/г):

а — парафин; б — вольфрам



разлет через точки 3 и 4 изоэнтропой с меньшим показателем γ . Ни при каких значениях показателя получить необходимую зависимость не удалось (пунктирные линии на рис. 1, а). Описать разлет парафина через точки 3 и 4 удалось только при условном увеличении скорости звука в точке 2 до значения C_2^1 (сплошные линии). Такое увеличение скорости звука предполагает соответствующее увеличение тепловой доли внутренней энергии вещества ($E = (p/\rho)(\gamma - 1)^{-1} = C^2/\gamma(\gamma - 1)$ [1]). Значения C_2 и C_2^1 , E_2 и E_2^1 в точке 2 составили соответственно 3,02 и 12 км/сек, 38 и 600 кдж/г при $\gamma = 1,2$; 3,58 и 22 км/сек, 12 и 342 кдж/г при $\gamma = 1,67$. Кинетическая энергия парафина в точке 2 равнялась 670 кдж/г (теплота сублимации холодного парафина $0,6 \div 1,0$ кдж/г).

Расширение вольфрама изучалось при разлете относительно тонкого диска. Расширяющееся вещество двигалось в виде четко ограниченного сгустка. Параметры в точке 1 не определялись. Для точки 2 импульсным рентгенографированием были определены размеры сгустка; плотность его составила 1 г/см³. Расчет процесса разлета проводился так же, как и для парафина. В точке 2 потребовалось условно увеличить скорость звука (обозначение кривых на рис. 1, б то же, что и для парафина). Значения C_2 и C_2^1 , E_2 и E_2^1 составили соответственно 1,04 и 10,8 км/сек, 4,5 и 452 кдж/г при $\gamma = 1,2$; 1,23 и 20 км/сек, 1,34 и 357 кдж/г при $\gamma = 1,67$. Кинетическая энергии вольфрама в точке 2 равнялась 288 кдж/г (теплота испарения вольфрама 1 кдж/г).

* Описание методики определения параметров дано в [5].

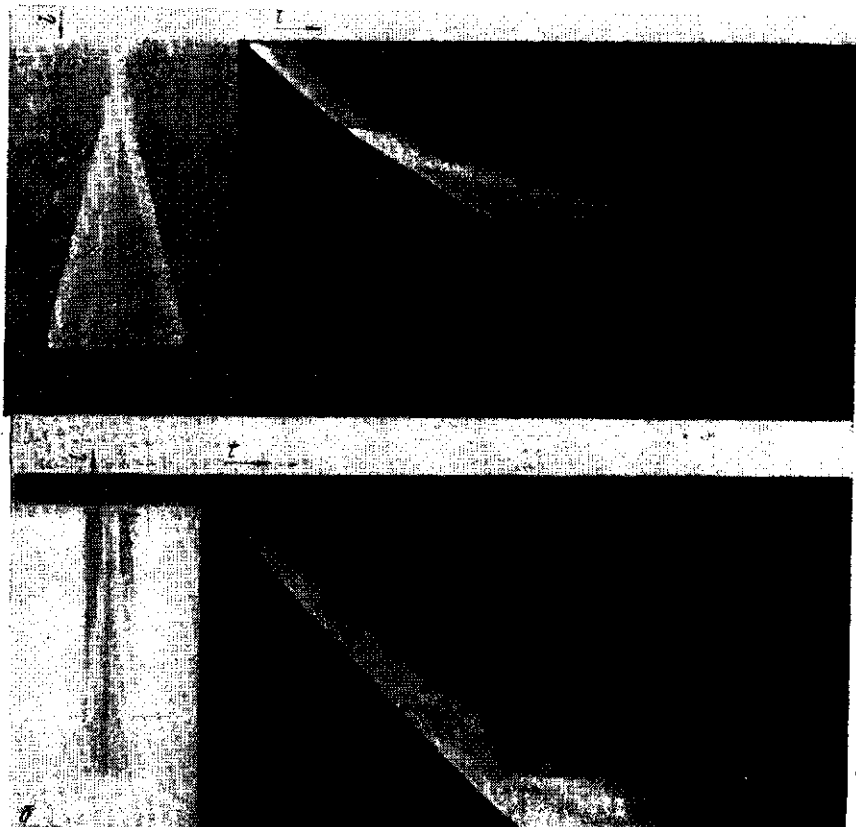


Рис. 3. Хронограммы движения ударной волны в конусах при расширении вольфрама:

а — угол конуса 30° ; б — 10°

При таком описании процесса разлета вещества увеличение тепловой доли внутренней энергии в точке 2 приводит согласно уравнению энергии к увеличению отношения p/ρ . В рассмотренных случаях при сохранении давления в точке 2 плотность парафина уменьшается в 16 и 32 раза при $\gamma=1,2$ и $1,67$ соответственно и плотность вольфрама в 100 и 300 раз.

Процесс расширения парафина и вольфрама в координатах (давление, удельный объем) показан на рис. 2 сплошной линией.

Для подтверждения полученных результатов проводились опыты в другом виде. Расширение вещества в них обеспечивалось не снижением давления воздуха в канале, а увеличением сечения канала. Разлетающийся парафин и вольфрам двигались в расширяющихся конусах из оргстекла с углом 30 и 10° . Ударная волна, движущаяся в воздухе перед веществом, регистрировалась с помощью фотохронографа СФР-2М. Хронограммы, полученные при движении вольфрама, показаны на рис. 3. На хронограммах после некоторого затухания скорости ударной волны при движении в конусе можно выделить участки с постоянной скоростью. На этих участках давление в воздухе за ударной волной и в разлетающемся веществе будет постоянным. Относительное затухание скорости ударных волн, полученное в опытах, показано на рис. 4.

При разлете других веществ (тантал, свинец, парафин в другом диапазоне скоростей) также зарегистрированы участки с постоянной скоростью ударной волны.

Увеличение объема вещества при движении в конусе происходило за счет расширения его по длине и увеличения поперечного сечения. Так как

определить расширение по длине в опытах не представлялось возможным, увеличение объема принималось соответствующим увеличению сечения канала. Расширение от точки 2 до участка с постоянной скоростью рассчитывалось по изоэнтропе с $\gamma=3$. Полученные зависимости нанесены на рис. 2 (пунктирные и штрих-пунктирные линии).

Сравнение результатов обеих серий опытов показывает идентичность их по характеру расширения.

Как известно, процесс расширения с постоянным давлением (изобарический) идеального газа происходит с подводом тепла и с повышением температуры. В рассмотренных случаях расширение между точками 2 и 3 также должно происходить с повышением температуры. На рис. 2 из точки 2 проведены изотермы расширения. Они проходят левее полученных зависимостей расширения и указывают, что температура вещества в процессе расширения должна повышаться.

Таким образом, при экспериментальном исследовании разлета конденсированных тел после прохождения по ним мощных ударных волн, сообщаящих веществу энергию в сотни раз выше теплоты испарения, обнаружено свойство веществ расширяться в некотором диапазоне изменения параметров с увеличением тепловой энергии. При этом тепловая доля энергии вещества возрастает на величину, соизмеримую с кинетической энергией. Обнаруженное изобарическое расширение вещества, по-видимому, соответствует фазовому переходу, предсказываемому в работах [2-4].

Автор выражает благодарность Б. К. Шайдуллину, Р. И. Ивипову, А. М. Калугину за помощь в проведении опытов и обработку результатов.

Челябинск

Поступила в редакцию
9 VIII 1973

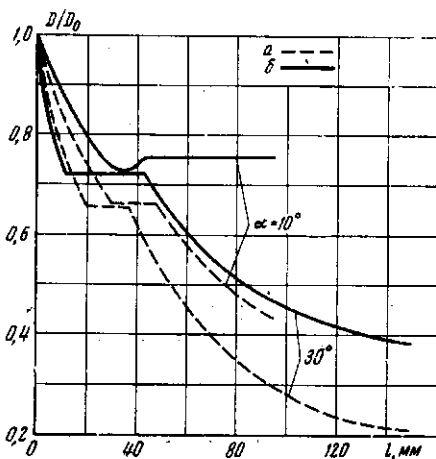


Рис. 4. Падение скорости ударной волны при движении в конусах:
а — парафин; б — польфрам

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. «Наука», 1966.
2. В. Е. Фортгов. Теплофизика высоких температур, 10, 168, 1972.
3. Г. Э. Норман, А. Н. Старостин. Теплофизика высоких температур, 8, 413, 1970.
4. Г. Э. Норман. В сб. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы (под ред. Л. С. Полака). «Наука», 1971.
5. М. М. Русаков. ПМТФ, № 2, 77, 1969.

Примечание при корректуре. Микрофотометрирование хронограмм расширения веществ (рис. 3б) показывает возрастание яркости свечения вещества при расширении, что свидетельствует о возрастании его температуры. Температура вольфрама в конце расширения составляет $\sim 5 \cdot 10^4$ К.