

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Ассонов, М. М. Докучаев, И. М. Кукунов. Буровзрывные работы. М., Госстройиздат, 1960.
2. Б. Н. Кутузов, Ю. К. Валухин и др. Проектирование взрывных работ. М., «Недра», 1974.
3. Г. И. Покровский.— В сб.: Действие взрыва в грунте и расчет зарядов. Под ред. С. И. Сильвестровича. М., Промстройиздат, 1957.
4. В. М. Кузнецов. Тр. МФТИ. № 3. М., Оборонгиз, 1959.
5. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. Под ред. Б. И. Каменки. М., «Энергия», 1972.
6. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 5.
7. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 2.
8. К. Е. Губкин, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ПМТФ, 1978, 2.
9. Л. И. Барон, С. Г. Левчик, Н. К. Терметчиков.— В сб.: Взрывное дело, № 44/1. М., «Недра», 1960.
10. В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
11. М. А. Садовский, В. В. Адушкин, В. Н. Родионов. Моделирование крупных взрывов на выброс. ДАН СССР № 6. М., 1966.
12. В. В. Адушкин, С. Г. Кривошеев.— В сб.: Взрывное дело, № 73/30, М., «Недра», 1974.

ОБОБЩЕННЫЕ УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ И НУЛЕВЫЕ ИЗОТЕРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Ф. Анисичкин

(Новосибирск)

К настоящему времени разными авторами получены адиабаты Гюгонио около восьмидесяти элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Такое большое число данных позволяет провести их статистическую обработку и обнаружить определенные закономерности. Обобщенные ударные адиабаты веществ предлагались неоднократно, например в [1, 2], но при этом они считались линейными в плоскости массовая скорость — скорость ударной волны. Ниже рассматриваются обобщенные ударные адиабаты элементов, свободные от этого предположения.

Нулевые изотермы веществ можно приближенно получить из ударных адиабат, если известна зависимость коэффициента Грюнайзена от объема. Более точно нулевые изотермы рассчитаны пока только для водорода и дейтерия [3, 4]. Экспериментально получены изотермы этих веществ при температуре, близкой к 4 К [5, 6]. Ниже показано, что достаточно знать ударную адиабату и нулевую изотерму одного вещества, чтобы найти изотермы при 0 К для многих других веществ.

Две группы ударных адиабат элементов. В плоскости массовая скорость — скорость ударной волны экспериментальные ударные адиабаты часто приближают отрезками прямых линий

$$D = a + bu. \quad (1)$$

где D — скорость ударной волны; u — массовая скорость; a , b — постоянные. Величину b в (1) можно рассматривать как производную $b = dD/du$ в некоторой промежуточной точке ударной адиабаты. Значение b меняется вдоль адиабаты Гюгонио с увеличением плотности вещества в ударной волне [7]. В работе [8] на основе анализа экспери-

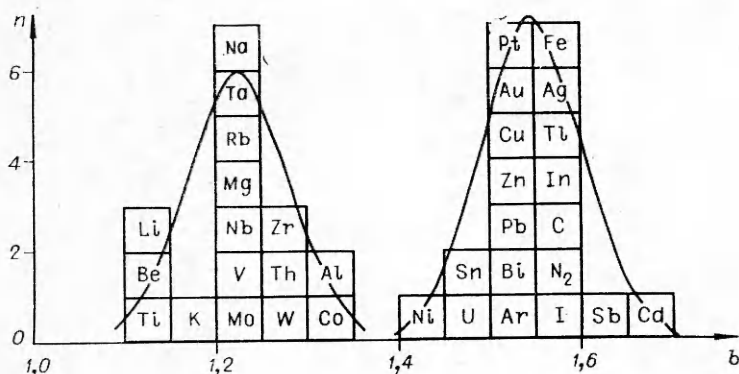


Рис. 1.

ментальных ударных адиабат, взятых в основном из [7], показано, что ударные адиабаты элементов составляют две группы с одинаково меняющимися со степенью сжатия вещества во фронте ударной волны величинами b .

На рис. 1 приведено распределение усредненных экспериментальных значений b при $V/V_0=0,675$. По вертикальной оси отложено число ударных адиабат, имеющих равные с точностью до 0,5 значения b . Здесь же приведена сумма двух кривых Гаусса, показывающая, каким должно быть распределение, если отклонения b от двух выделенных значений считать случайными. Подобные распределения получаются и при других относительных сжатиях веществ в ударной волне. Причиной отклонений b от двух выделенных значений могут быть как ошибки эксперимента, фазовые переходы во фронте ударной волны, прочность, так и несовпадение производных от ударных адиабат разных элементов как функций относительного объема. Важно отметить, что величина таких отклонений в среднем не превышает возможных экспериментальных ошибок при определении адиабат Гюгонио.

В пользу существования двух групп элементов, имеющих ударные адиабаты с одинаково меняющимися производными, говорит также место, которое они занимают в таблице Д. И. Менделеева. Элементы, составляющие первую группу, находятся в основном в первой половине каждого периода периодической системы, во вторую группу входят оставшиеся элементы. Это согласуется с предположением о том, что характер сжимаемости веществ зависит от степени заполнения внешних электронных оболочек атомов.

Геометрическое подобие ударных адиабат. Из полученных в [8] результатов следует, что в пределах ошибки эксперимента производные от ударных адиабат можно считать тождественными функциями относительного объема для каждой из двух выделенных групп элементов. Для каждой из групп производные от адиабат Гюгонио оказываются равными при одинаковых значениях V/V_0 , т. е. на прямых, выходящих из начала координат в плоскости u, D . Это означает, что ударные адиабаты одной группы геометрически подобны в плоскости u, D . В плоскости $V/V_0, p$ ударные адиабаты одной группы можно совместить, растягивая вдоль оси давлений.

Следовательно, чтобы получить одну ударную адиабату из другой, достаточно знать коэффициент их взаимного подобия k_{ij} . Этот коэффициент характеризует ударно-сжимаемое вещество по отношению к другому и может зависеть прежде всего от начальной плотности, молекулярного веса, а также от числа электронов у составляющих его атомов [9]. Анализ показал, что в плоскости u, D коэффициенты подобия адиабат Гюгонио с точностью, достаточной для описания большинства

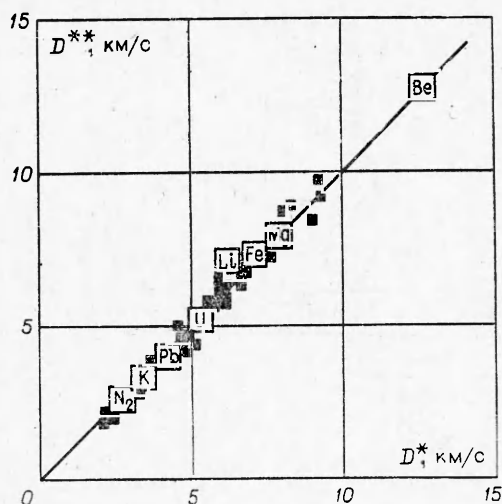


Рис. 2.

ние скоростей ударных волн при одинаковых степенях сжатия V/V_0 :

$$k_{ij} = \left(\frac{D_i}{D_j} \right) \frac{V}{V_0} \quad (4)$$

На рис. 2 сравниваются скорости ударных волн в веществах, рассмотренных на рис. 1, при $V/V_0=0,675$ найденные экспериментально (D^{**}) и рассчитанные (D^*) с помощью соотношений (2)–(4). Совпадение в большинстве случаев хорошее. Имеющиеся расхождения частично объясняются недостаточной точностью простых эмпирических формул (2) и (3).

Если воспользоваться аналитическим представлением ударных адиабат, предложенным в [10], то с помощью соотношений (2) и (3) обобщенную адиабату Гюгонио элементов первой группы приближенно можно записать следующим образом:

$$D = u + 3,4 \cdot (\rho_0/\mu)^{1/3} \times \\ \times z/\mu \cdot u^{1/2} + 98 (\rho_0/\mu)^{2/3} \cdot (z/\mu)^2, \quad (5)$$

а обобщенную ударную адиабату элементов второй группы — как

$$D = u + 3/4 \cdot (\rho_0/\mu)^{1/3} \cdot u^{1/2} + \\ + 9,1 (\rho_0/\mu)^{2/3}, \quad (6)$$

где u , D в км/с.

На рис. 3, 4 сравниваются некоторые экспериментальные ударные адиабаты первой и второй групп с рассчитанными по формулам (5) и (6) соответственно, в частности ударные адиабаты лития и бериллия.

имеющихся экспериментальных данных, можно в частности, задать с помощью простых аналитических зависимостей:

$$k_{ij} = (\rho_{0i}/\rho_{0j} \cdot \mu_j/\mu_i)^{2/3} \cdot (\mu_j/\mu_i \cdot \\ \cdot z_i/z_j)^2. \quad (2)$$

— для первой группы элементов и

$$k_{ij} = (\rho_{0i}/\rho_{0j} \cdot \mu_j/\mu_i)^{2/3} \quad (3)$$

— для второй. Здесь ρ_0 — начальная плотность вещества; μ — молекулярный вес; z — число электронов у молекулы вещества. Коэффициент подобия двух ударных адиабат можно также выразить через отноше-

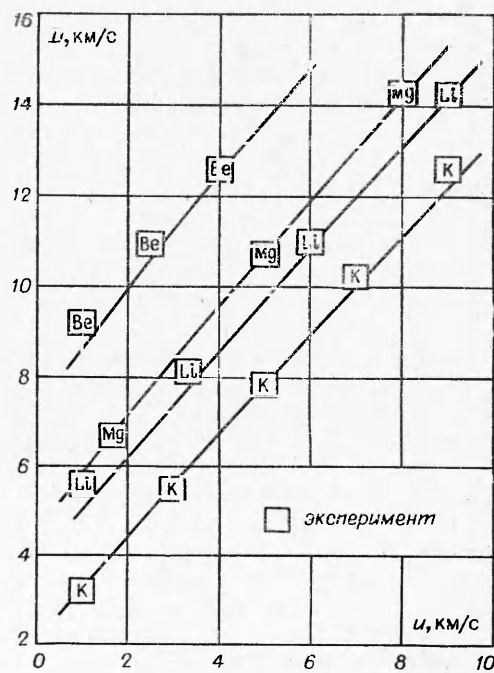


Рис. 3.

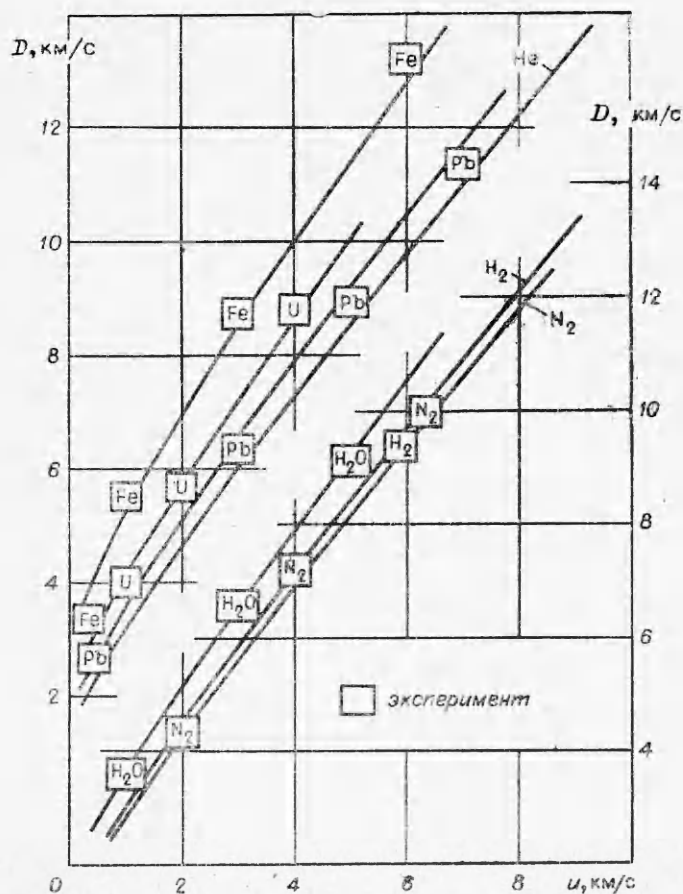


Рис. 4.

Как видно из рис. 1, производные от ударных адиабат этих элементов наиболее заметно отклоняются от среднего значения. Адиабата Гюгонио лития, кроме того, наименее точно описывается и формулой (2), что следует из рис. 2. Однако и для лития, и для бериллия расхождения в среднем не превышают максимально возможных ошибок при экспериментальном нахождении ударных адиабат. Ударные же адиабаты большинства других элементов описываются уравнениями (5) и (6) так же хорошо, как на рис. 3, 4 ударные адиабаты магния и железа. Обнаруженные закономерности позволяют рассчитывать адиабаты Гюгонио элементов, пока не полученные экспериментально. В качестве примера на рис. 4 показана ударная адиабата жидкого гелия, начинающаяся из состояния с плотностью $0,15 \text{ г/см}^3$.

Ударные адиабаты сложных веществ. Соотношение (6) хорошо описывает ударные адиабаты инертных газов аргона и ксенона, имеющих атомы с заполненными внешними электронными оболочками. В этом смысле многоатомные молекулы имеют сходное с атомами инертных газов строение электронных оболочек. Поэтому понятно совпадение показанных на рис. 4 экспериментальных и рассчитанных по формуле (6) адиабат Гюгонио жидких азота, водорода и воды. Следовательно, ударные адиабаты рассмотренных сложных веществ также могут быть отнесены ко второй группе ударных адиабат.

Нулевые изотермы элементов. Пренебрежем внутренними степенями свободы молекул вещества. В этом случае теорема вириала классической механики позволяет выразить давление вещества через нулевую

изотерму, объем и внутреннюю энергию

$$p = p[p_{T=0}(V/V_0), V, E]. \quad (7)$$

Внутренняя энергия вещества за фронтом ударной волны

$$E = (p_H + p_0)/2 \cdot (V_0 - V) + E_0,$$

где p_H — давление на ударной адиабате. Пренебрежем p_0 и E_0 как малыми величинами. Тогда из (7) получаем

$$p_H = p_H[p_{T=0}(V/V_0), V, V_0]. \quad (8)$$

Согласно теории размерностей, из выражения (8) следует

$$p_{T=0}/p_H = f(V/V_0). \quad (9)$$

Здесь $f(V/V_0)$ — функция относительного объема. Из соотношения (9) видно, что ударные адиабаты двух веществ взаимно пропорциональны в плоскости $V/V_0, p$, если только пропорциональны их нулевые изотермы. Поэтому нулевые изотермы элементов каждой из двух выделенных выше групп должны быть взаимно пропорциональны. (Близкий по смыслу вывод сделан в [11]). Причем коэффициент пропорциональности между нулевыми изотермами можно приближенно найти с помощью соотношений (2) и (3).

Следовательно, чтобы найти нулевую изотерму любого элемента, необходимо кроме его ударной адиабаты знать ударную адиабату и нулевую изотерму хотя бы одного элемента той же группы. Во второй группе в качестве такого основного элемента может быть выбран водород, ударная адиабата которого подобна другим ударным адиабатам группы.

На рис. 5 в качестве примера приведены рассчитанные описанным способом нулевые изотермы железа и свинца, которые сравниваются с расчетными данными [12, 13]. Для свинца результаты заметно расходятся. Хорошее подобие экспериментальных адиабат Гюгонио железа и свинца позволяет утверждать, что одна из двух нулевых изотерм, приведенных в [12, 13], найдена с погрешностью. Согласно результатам настоящей работы, менее точна нулевая изотерма свинца. Для веществ второй группы соотношение (9), связывающее нулевые изотермы и

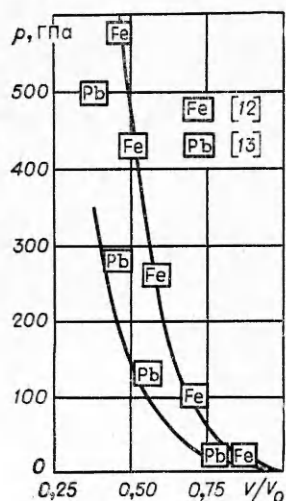


Рис. 5.

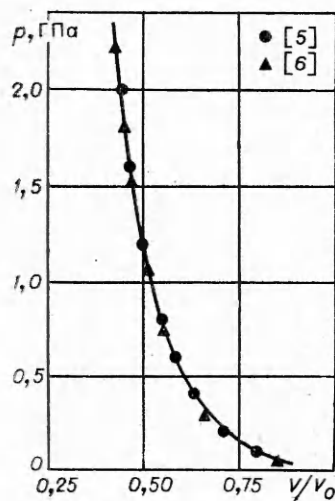


Рис. 6.

ударные адиабаты, может быть записано приближенно в простом виде

$$p_{T=0}/p_H = V/V_0. \quad (10)$$

На рис. 6 видно, насколько хорошо совпадают нулевая изотерма водорода, найденная из его ударной адиабаты с помощью соотношения (10), и экспериментальные изотермы при 4 К [5, 6]. Следовательно, с помощью простого соотношения (10) можно с такой же точностью находить нулевые изотермы и других веществ второй группы. К сожалению, ни одна из нулевых изотерм элементов первой группы не получена пока экспериментально в достаточно широком диапазоне плотностей, чтобы проверить справедливость эмпирического соотношения (10).

Геометрическое подобие ударных адиабат и нулевых изотерм веществ одной группы позволяет восстанавливать их по одной экспериментальной точке. Так могут быть построены адиабаты Гюгонио и нулевые изотермы трудносжимаемых элементов до больших относительных плотностей, достигнутых в эксперименте только для легкосжимаемых веществ.

Подобие ударных адиабат веществ одной группы позволяет говорить также о подобии их уравнений состояния. Из этого следует, в частности, возможность моделирования ударно-волновых процессов с помощью веществ одной группы.

В заключение следует отметить некоторые трудности, возникающие при построении обобщенных ударных адиабат и нулевых изотерм веществ. В работе не учитывалась динамическая прочность ударно-сжимаемых веществ. Из-за отсутствия литературных данных рассмотрены не все элементы периодической системы. Результаты имеют статистический характер, поэтому отклонения от обнаруженных закономерностей, превышающие среднюю ошибку экспериментов, возможны.

Соотношениям (2) — (5) отдано предпочтение из-за их простоты и в то же время хорошего согласия с большинством экспериментальных данных. Однако для более полного описания экспериментальных адиабат Гюгонио необходимо пользоваться более точными интерполяционными формулами или графическими зависимостями. В частности, при нахождении нулевой изотермы водорода по формуле (10) использовалась его ударная адиабата, проходящая точно через экспериментальную точку [14].

Автор благодарен В. М. Титову за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
24/XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Коряков. ПМТФ, 1964, 5.
2. F. E. Prieto, C. Renero. J. Phys. Chem. Solids, 1976, 37, 2.
3. В. П. Трубицын. ФТТ, 1965, 7, 11.
4. M. Ross, F. H. Ree, R. N. Keeler. Proceedings of the fourth international conference on high pressure, Kyoto, 1974.
5. J. W. Stewart. J. Phys. Chem. Sol., 1956, 1.
6. M. S. Anderson, C. A. Swenson. Phys. Rev. B., 1974, 10, 12.
7. M. van Thiel, A. S. Kusubov a. o. UCRL-50108, Compendium of shock wave data, Lawrence Radiation Lab., Univ. of California, Livermore, 1966.
8. В. Ф. Анисичкин. ПМТФ, 1978, 3.
9. Н. Н. Калиткин, Л. В. Кузьмина. Тр. III Всесоюзного семинара по моделям механики сплошной среды. Новосибирск, 1976.
10. В. Ф. Анисичкин. ПМТФ, 1975, 1.
11. Ф. Ф. Воронов. Докл. АН СССР, 1976, 226, 5.
12. В. Н. Жарков, В. П. Трубицын, И. А. Царевский. Докл. АН СССР, 1974, 214, 3.
13. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, Р. Ф. Трунин. ЖЭТФ, 1962, 42, 1.
14. M. van Thiel, B. J. Alder. Mol. Phys., 1966, 10.