

**Л. В. Альтшулер.** Результаты и перспективы экспериментальных исследований экстремальных состояний вещества. Уравнения состояний для экстремальных состояний материи с высокой плотностью энергии находятся по результатам статических и динамических экспериментов и их экстраполяциям к периферии фазовых диаграмм, где справедливы простые теоретические модели, построенные из первых принципов.

Основные термодинамические характеристики сжатых и нагретых тел определяются потенциальными кривыми «холодного» взаимодействия частиц и «функциями Грюнайзена», отражающими тепловую упругость вещества. Экспериментальное отыскание этих зависимостей для широких диапазонов температур и плотностей стало возможным в результате применения в качестве инструмента физического исследования сильных ударных волн<sup>1,2</sup>. Динамические методы, независимо развитые в Советском Союзе и США в первые послевоенные годы, основаны на получении и регистрации состояний, на короткие промежутки времени возникающих в образцах-мишенях при столкновении с ними снарядов-ударников. Измеряемыми величинами в ударных экспериментах являются скорость ударной волны в мишени и скорость вещества за ее фронтом, определяемая по скорости ударяющего тела. Уравнениями законов сохранения кинематические характеристики волны фиксируют

термодинамические параметры сжатого вещества — давление, плотность и приобретенную при ударе удельную внутреннюю энергию. Измерения, проведенные при разной скорости удара, выделяют на фазовых диаграммах характеристические траектории ударного сжатия — адиабаты Гюгонио — с известными значениями термодинамических величин.

По методу ударных волн к началу шестидесятых годов на взрывных устройствах, плавно разгонявших железные ударники до скоростей  $\sim 15$  —  $18$  км/с, в Советском Союзе были достигнуты давления порядка 1 ТПа, определившие потолок абсолютных лабораторных измерений динамической сжимаемости. Половина этого диапазона пройдена сейчас в США, где для систематических исследований применяется легко-газовая двухступенчатая пушка, сообщающая танталовому ударнику скорости до  $8,5$  км/с<sup>3</sup>.

Дальнейшее продвижение к границам теоретического описания достигнуто в опытах с ударными волнами в ближней зоне сильных подземных

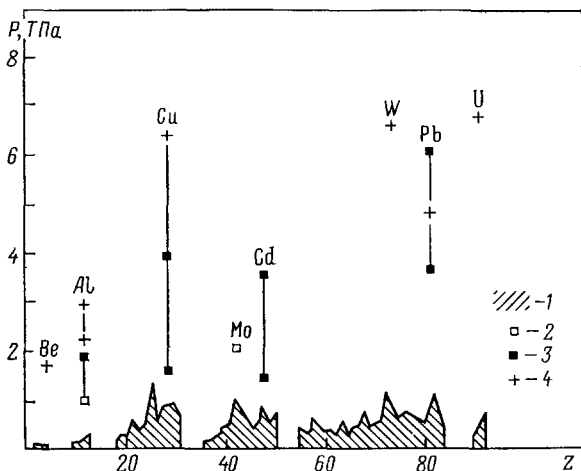


Рис. 1. Диапазоны абсолютных и сравнительных измерений динамической сжимаемости элементов.

1 — абсолютные лабораторные измерения, 2 — то же в условиях сильных подземных взрывов<sup>4,5</sup>, 3 — сравнительные измерения по данным<sup>6,7</sup>, 4 — то же по<sup>8</sup>

взрывов. В этих условиях с помощью встроенных в алюминиевый образец  $\gamma$ -излучателей в работе<sup>4</sup> были измерены волновые и массовые скорости и определена сжимаемость алюминия при 1 ТПа. Другим, менее точным методом в<sup>5</sup> параметры ударного сжатия молибдена найдены при 2 ТПа. Главным результатом<sup>6-8</sup> исследований в терапаскальном диапазоне давлений явилось определение для многих металлов их сравнительной сжимаемости. В поставленных в этих целях экспериментах скорости ударной волны регистрировались при ее последовательном прохождении через слои различных металлов. Интерпретация таких опытов предполагает знание ударной адиабаты одного из металлов. В исследованиях, выполненных в Советском Союзе, в качестве вещества-эталоны было принято железо с интерполяционной ударной адиабатой, соединяющей верхние точки лабораторного эксперимента и квантостатистические расчеты. В зарубежных работах<sup>8</sup> интерпретация опытов производилась с использованием расчетной квантовомеханической адиабаты молибдена.

Объем динамических исследований по определению абсолютной и относительной сжимаемости элементов иллюстрирует гистограмма рис. 1. Вне рамок графика находятся оценки сжимаемости алюминия при гигабарных давлениях, полученные авторами<sup>4</sup>.

За прошедшие десятилетия динамические исследования доставили уникальную информацию о потенциальных кривых взаимодействия атомов в металлах<sup>9-11</sup>, жидкостях<sup>12</sup> и инертных газах<sup>13</sup>, о сжимаемости минералов при давлениях нижней мантии Земли<sup>14</sup>, температурах диэлектриков за фронтом ударных волн<sup>15</sup> и об их постепенном приближении к металлическому состоянию<sup>16,17</sup>. Были обнаружены многочисленные, ранее неизвест-

ные электронные переходы<sup>18</sup> и определены параметры продуктов взрыва. Результаты динамических исследований стали критериями теоретических моделей и определили в метрологии высоких давлений эталонные кривые динамической и статической сжимаемости.

По инициативе и программе, намеченной Я. Б. Зельдовичем, с начала возникновения динамических методов усилия советских исследователей были направлены на определения в широком диапазоне параметров тепловых

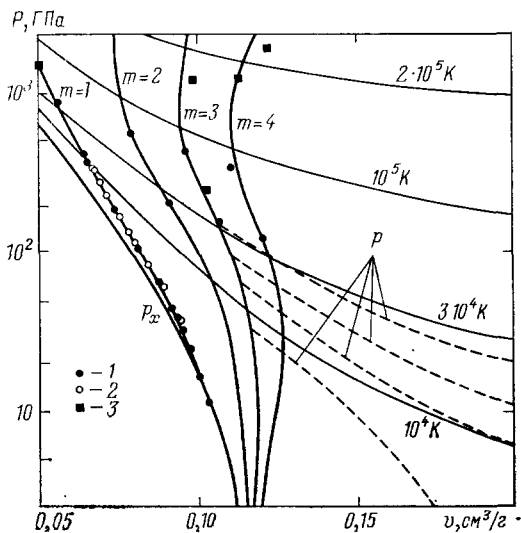


Рис. 2. Ударная и изэнтропическая сжимаемость меди<sup>21</sup>.

$m$  — адиабаты Гюгонио для разной степени пористости  $m = 1, 2, 3, 4$ ;  $p_x$  — изотерма при  $T = 0$  К.  $p = p_s$  — изэнтропы. 1 — данные<sup>9,20</sup>, 2 —<sup>3</sup>, 3 — результаты сравнительных измерений<sup>22</sup>

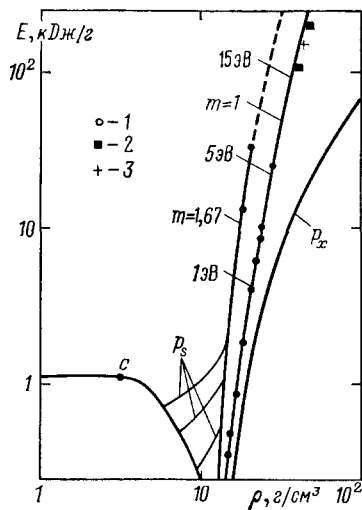


Рис. 3. Фазовая диаграмма свинца.

Обозначения  $m$ ,  $p_x$  и  $p_s$  те же, что и на рис. 2.  $c$  — критическое состояние. 1 — лабораторные измерения по<sup>9,20</sup>; 2 — данные сравнительных измерений по<sup>3</sup>; 3 — то же по<sup>8</sup>

компонент уравнений состояния. С этой целью для ряда металлов были измерены скорости звука за фронтом ударных волн<sup>2</sup>, зарегистрированы их пористые адиабаты<sup>19,20</sup> с пониженной начальной плотностью образцов и изэнтропы расширения из высокоэнергетических состояний<sup>21</sup>. Результаты комплексного изучения меди до давлений в 2,5 ТПа и в интервалах двукратного увеличения и двукратного уменьшения ее плотности представлены на рис. 2. Обращает внимание хорошее совпадение данных по сжимаемости меди, полученных в работе<sup>9</sup> 1962 г. и недавней зарубежной публикации<sup>3</sup>. До 0,2 ТПа адиабата меди с нормальной начальной плотностью после вычитания тепловых давлений однозначно определяет потенциальную кривую холодного сжатия  $p_x$ . Своеобразная конфигурация пористых адиабат, полученных в<sup>20,22</sup>, отражает изменение с температурой тепловой упругости — ее уменьшение при 0,4 ТПа и последующее возрастание при давлениях порядка 2 ТПа. Новая информация о термодинамике меди при плотности, меньшей нормальной, получена в исследованиях<sup>21</sup> по методу изэнтропического расширения.

Ситуацию, сложившуюся сейчас в изучении экстремальных состояний металлов, дополнительно иллюстрирует фазовая диаграмма свинца (рис. 3), построенная в логарифмическом масштабе в переменных плотность — удельная внутренняя энергия. Как показывает график, положение ударной адиабаты свинца при экстремальных давлениях в 2—5 ТПа зафиксирована в сравнительных экспериментах с большой достоверностью. Об этом свидетельствует согласованность данных<sup>7,8</sup> при различных способах их интер-

претации. Как и для меди, сведения о соотношении теплового давления и тепловой энергии получены в опытах по сжатию пористых образцов и при регистраторах их последующего расширения.

И у свинца, и у других металлов незатронутыми в экспериментальных исследованиях остались высокоэнергетические состояния сильно-неидеальной плазмы, занимающие по оси абсцисс два порядка изменения плотности — от сотых долей грамма до нескольких граммов.

Экспериментальное изучение этих состояний динамическими методами в их традиционных и модифицированных вариантах так же, как и создание для них адекватных теоретических моделей, представляет в физике высоких плотностей энергии одно из основных направлений <sup>23</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматгиз, 1966.
2. Альтшулер Л. В. — УФН, 1965, т. 85, с. 197.
3. Mitchell A. C., Neillis W. I. — J. Appl. Phys., 1981, v. 52, p. 3363.
4. Волков Л. П. и др. — Письма ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 623; ЖЭТФ, 1985, т. 88, с. 1452.
5. Ragan E. — J. Appl. Phys., 1977, v. 48, p. 2860.
6. Трунин Р. Ф. и др. — ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 1044.
7. Альтшулер Л. В., Калиткин Н. Н. и др. — ЖЭТФ, 1977, т. 72, с. 317.
8. Ragan E. — Phys. Rev. Ser. A, 1982, v. 25, p. 3360; 1984, v. 29, p. 1391.
9. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. — ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 91.
10. Кормер С. Б. и др. — ДАН СССР, 1960, т. 131, с. 542.
11. Жарков В. Н., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. — М.: Наука, 1968.
12. Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В., Шарипджанов И. И. Препринт ИИМ АН СССР № 43. — Москва, 1976.
13. Ross M., Ree F. H. — J. Chem. Phys., 1980, v. 73, p. 6149.
14. Альтшулер Л. В., Шарипджанов И. И. — Изв. АН СССР. Сер. «Физика Земли», 1971, № 3, с. 11.
15. Кормер С. Б. и др. — УФН, 1968, т. 94, с. 641.
16. Neillis W. J., Ventiel M., Mitchell A. C. — Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 816.
17. Ragon sky I. V., Ross M., Mitchell A. C., Neillis W. J. — Phys. Rev. Ser. B, 1985, v. 31, p. 1457.
18. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. — УФН, 1968, т. 96, с. 193.
19. Крупников К. К., Бражник М. И., Крупникова В. П. — ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 675.
20. Кормер С. Б., Фунтиков Л. И. и др. — ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 686.
21. Альтшулер Л. В., Бушман А. Е. и др. — ЖЭТФ, 1980, т. 77, с. 761.
22. Зубарев В. Н. и др. — В кн.: Детонация. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978, с. 61.
23. Алексеев В. А., Фортов В. Е., Якубов И. Т. — УФН, 1983, т. 139, с. 193.