

Козлов А.Н., Рыбаков А.П. Влияние фазовых переходов первого и второго рода на вид ударной адиабаты твёрдых тел на примере пересечения ударной адиабаты с кривой плавления и с критической изотермой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.– 2016. – № 3. – С. 76–96. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.05

Kozlov A.N., Rybakov A.P. Influence of first and second phase transitions on the form of shock adiabat in condensed bodies. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 3. Pp. 76-96. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.05



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.3.05

УДК 536.421.1:541.117:541.121/123

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА НА ВИД УДАРНОЙ АДИАБАТЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ УДАРНОЙ АДИАБАТЫ С КРИВОЙ ПЛАВЛЕНИЯ И С КРИТИЧЕСКОЙ ИЗОТЕРМОЙ

А.Н. Козлов¹, А.П. Рыбаков²

¹Пермская государственная сельскохозяйственная академия, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 8 июня 2016 г.
Принята: 8 августа 2016 г.
Опубликована: 30 сентября 2016 г.

Ключевые слова:

твёрдое тело, ударная адиабата твёрдого состояния, кривая плавления, ударная адиабата жидкого состояния, критическая изотерма

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена область вблизи пересечения ударной адиабаты твёрдого тела и кривой плавления. Последняя описана с помощью уравнения Симона. Влияние фазового перехода первого рода на вид ударной адиабаты проследим на примере пересечения ударной адиабаты твёрдого тела с его кривой плавления. Влияние перехода второго рода покажем на примере пересечения ударной адиабаты с критической изотермой рассматриваемого вещества.

Пересечение ударной адиабаты твёрдого тела с кривой плавления определяет состояние начала плавления. Пересечение адиабаты жидкости определяет состояние окончания плавления. Определение параметров состояния ударно-сжатого твёрдого тела произведено с помощью законов сохранения массы и импульса на фронте ударной волны и уравнения состояния в форме уравнения Ми-Грюнайзена. В области жидкой фазы в уравнении Ми-Грюнайзена учтено уменьшение тепловой составляющей жидкой фазы вследствие расхода её на плавление твёрдого тела. Развитая модель продемонстрирована для легкоплавких металлов Pb, Bi, Cd, Sn II. Проанализированы экспериментальные данные по изменению с температурой различных физико-химических свойств веществ, подвергнутых воздействию ударных волн. Отмечено, что при температурах, близких к критическим, проявляются особенности в ходе изменения этих свойств с температурой.

Модельные результаты, подтверждённые известными экспериментальными данными, показывают, что, во-первых, пересечение ударной адиабаты твёрдого тела с кривой плавления приводит к разрыву ударной адиабаты и последующему уменьшению наклона, например зависимости волновой скорости от массовой скорости. Во-вторых, пересечение ударной адиабаты с критической изотермой приводит к излому зависимости волновая-массовая скорости. Кроме того, при пересечении ударной адиабаты с критической изотермой имеют место особенности в поведении некоторых свойств ударно-сжатого твёрдого тела: излом, перегиб, минимум, максимум в изменении параметров состояния с температурой.

© ПНИПУ

© Козлов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: 112_22@rambler.ru
Рыбаков Анатолий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: anatyrb@yandex.ru

Alexey N. Kozlov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: 112_22@rambler.ru
Anatoly P. Rybakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: anatyrb@yandex.ru

INFLUENCE OF FIRST AND SECOND PHASE TRANSITIONS ON THE FORM OF SHOCK ADIABATE IN CONDENSED BODIES

A.N. Kozlov¹, A.P. Rybakov²

¹Perm State Agricultural Academy, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 8 June 2016

Accepted: 8 August 2016

Published: 30 September 2016

Keywords:

solid, shock adiabat
of solid, melting curve,
shock adiabat of melting
state, critical isotherme,
beyond critical states

ABSTRACT

The crossing range of a shock adiabat and a melting curve has been considered. The melting curve has been presented by Simon equation. The effect of a first kind phase transition on the form of the shock adiabat has been studied as in the case when the shock adiabat of the solid crosses its melting curve. The crossing of the adiabat of solid and the melting curve determines the beginning of melting state. The crossing of the adiabat of a liquid and melting curve determines the state of the melting termination.

The crossing of the shock adiabat and the critical isotherme of a date substance is the example of the effect related to the second kind phase transition on the form of the shock adiabat.

The generated model illustrates the behavior of low-melting metals: Pb, Bi, Cd and Sn II. The experimental data of the shocked substances has been analyzed. It is noted that the singularities in change of properties vs temperature possess place upon the critical temperature.

The model results have been confirmed by the well-known experimental data. The crossing of the shock adiabat of solid and the melting curve produces a discontinuity of the shock adiabat. A derivative of shock velocity on particle velocity in a liquid range decreases. The crossing of the shock adiabat and the critical isotherme produces a break of a relationship of the shock-particle velocities. The singularities in a change of the properties vs the temperature take place whenever the crossing of the shock adiabat and the critical isotherme is present. There following singularities occur: a break curve, a curve bend, a minimum and a maximum.

© PNRPU

Введение

Фазовые переходы до сих пор привлекают внимание исследователей. Фазовые переходы первого рода, происходящие при статических нагрузках, достаточно полно отображены в одном из первых ранних обзоров В.В. Евдокимовой [1]. В одной из первых обзорных работ, содержащей также и оригинальные собственные результаты [2], Л.В. Альтшулер дал описание фазовых переходов первого рода, происходящих при динамических, ударно-волновых нагрузках. Позднее авторы работы [3] отметили вклад различных исследователей и дали краткий, но довольно полный обзор их научных результатов, в том числе и в области фазовых переходов при ударно-волновом нагружении.

При ударно-волновом нагружении состояние вещества, обусловленное сжатием и нагревом в рассматриваемом в статье диапазоне значений параметров состояния, таково, что справедливо применение положений равновесной термодинамики и гидродинамической модели. Это доказано результатами исследований учёных из США (Walsh J.M. [45, 46], Asay J.R. [37], Kinslow R. [56]); из Великобритании (Skidmore J.C. [52]), из СССР (Альтшулер Л.В. [23], Забабахин Е.И. [44], Зельдович Я.Б. [53]).

При изменении состояния в термодинамической макросистеме происходит конечное изменение параметров состояния: энтропии ΔS , удельного объема ΔV , температуры ΔT и т.д. Из определения энтропии как функции состояния ее дифференциалом является

$$dS = \frac{\delta Q}{T},$$
 где δQ есть малое конечное количество теплоты, сообщаемое телу на бесконечно малом участке изотермического процесса.

При изменении состояния вследствие фазового перехода δQ есть теплота фазового перехода, численно равная количеству теплоты, сообщаемой массе вещества для осуществления фазового перехода. При ударно-волновом сжатии δQ есть часть количества энергии, сообщаемого в виде теплоты массе вещества в результате ударно-волнового сжатия. Известно, что изменение энтропии связано с изменениями параметров состояния [4, 5]:

$$dS = dE/T + (P/T)dV = c_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dV.$$

Для твердого вещества, подчиняющегося, например, уравнению Ми-Грюнайзена, величина производной $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = 3\Gamma R/V$, где Γ – коэффициент Грюнайзена.

В таком случае для конечных разностей имеем

$$\Delta S \sim \left[c_v \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right) + 3\Gamma R \ln \left(1 + \frac{\Delta V}{V} \right) \right],$$

где c_v – теплоемкость; R – универсальная газовая постоянная.

Фазовые переходы первого рода характеризуются постоянством температуры $\Delta T \equiv 0$ и изменениями как энтропии $\Delta S \neq 0$, так и объема $\Delta V \neq 0$ [5–7].

При осуществлении фазового перехода первого рода при ударно-волновом сжатии из условия конечности изменения удельного объема следует, что ударная адиабата будет иметь разрыв в значениях параметров. То есть ударная адиабата, представленная в координатах: волновая D и массовая u скорости; давление P – удельный объем V ; температура T – давление P , будет разрывной линией. Это подтверждают экспериментальные результаты для воды [8], а также результаты анализа в работах [9–13]. Строго говоря, тонкая структура области разрыва адиабаты должна соответствовать смесевой области с изменением доли одной из фаз от 0 до 1.

Для описания фазовых переходов первого рода, происходящих при статических испытаниях, используют представления о кинетике процесса перехода. При этом подразумевают появление зародышей новой фазы, достаточных по размерам и количеству для развития новой фазы. То есть этот процесс развивается во времени (например, [5–7]). Эти представления были оправданы для самых различных по природе фазовых переходов первого рода: от объяснения изменения кристаллической решетки [1] до объяснений процесса разрыва, то есть развития нарушения сплошности при разрушении во время, например, растяжения материалов как в статике [14], так и в динамике [15], то есть при отколе.

При ударно-волновых испытаниях материалов в лабораторных условиях время нахождения испытываемого материала в состояниях с высокими параметрами не превышает нескольких микросекунд. Скорее всего именно поэтому некоторые исследователи пришли к мысли, что фазовые переходы первого рода осуществляются мгновенно на фронте ударной волны [3]. Авторы утверждали, что «наработка новых фаз происходит на фронте ударной волны» [3]. Однако результаты по воде приводят к иной точке зрения [9–11]. Фазовый переход вода-лёд VII происходит в объеме сжатой воды за фронтом волны [9–11]. Причем последовательность перехода аналогична процессу в статических условиях с конечной скоростью роста новой фазы [16].

Фазовые переходы второго рода характеризуются постоянством объема $\Delta V \equiv 0$ и энтропии $\Delta S \equiv 0$, но скачкообразным изменением теплоемкости $\Delta C_v \neq 0$. Это определение справедливо в одном из частных случаев. В более общей трактовке считается, что при фазовом проходе второго рода первые производные от термодинамических потенциалов, то есть давление и удельный объем, непрерывны [4, 17]. Однако скачком изменяются вторые производные, называемые термодинамическими коэффициентами, характеризующие теплоемкости, тепловое расширение и сжимаемость¹. Таким образом, при осуществлении фазового перехода второго рода в ударно-сжатом веществе параметры состояния P , V не претерпят изменения. Однако изменяется сжимаемость, то есть значения производных $\frac{\partial P}{\partial V}$, $\frac{\partial D}{\partial u}$. По современным представлениям фазовый переход второго рода происходит одновременно во всём объеме испытываемого материала [5].

Влияние фазового перехода первого рода на вид ударной адиабаты проследим на примере пересечения ударной адиабаты твердого тела с его кривой плавления. Влияние перехода второго рода покажем на примере пересечения ударной адиабаты с критической изотермой рассматриваемого вещества.

1. Влияние плавления на вид ударной адиабаты

Ударная адиабата твердого тела. Для ударной волны закон сохранения массы, закон сохранения импульса и закон сохранения энергии соответственно имеют следующий вид:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{V_0}{V} = \frac{D}{D-u};$$

$$P - P_0 = \rho_0 u D; \quad (1)$$

$$E - E_0 = -\frac{1}{2}(P + P_0)(V - V_0),$$

где ρ – плотность; $V = 1/\rho$ – удельный объем; P – давление; E – внутренняя энергия; u – массовая скорость за фронтом ударной волны; D – скорость фронта ударной волны. Индекс “0” означает принадлежность параметра к начальному состоянию. Считается, что $u_0 \equiv 0$.

Многочисленные экспериментальные данные по ударно-волновой сжимаемости конденсированных тел аппроксимированы зависимостью

$$D = C_0 + \beta u, \quad (2)$$

где C_0 и β – коэффициенты, причем C_0 имеет значение, близкое к гидродинамической объемной скорости звука. Значение коэффициентов C_0 и β затабулированы (например, [18–23]).

Уравнения (1) и (2) по задаваемым значениям массовой скорости u , как по параметру, позволяют определить пары соответствующих друг другу значений – давление P и плотность ρ (либо удельный объем V) – на ударной адиабате. Для определения третьего параметра состояния ударносжатого тела – температуры T – необходимо уравнение состояния твердого тела. В диапазоне температур от Дебаевских до значений меньших, $T < 11600$ К,

¹ В соответствии с темой нашей статьи обратим внимание на последнее.

что соответствует произведению постоянной Больцмана на температуру, $\kappa T < 1$ эВ, справедливо уравнение состояния в форме уравнения Ми-Грюнайзена:

$$P - P_x = \rho \Gamma (E - E_x), \quad (3)$$

где Γ – коэффициент Грюнайзена; индекс “ x ” означает принадлежность параметра к состояниям на кривой холодного сжатия.

Запишем уравнение состояния твердого тела в виде

$$P = P_x + \rho \Gamma \frac{3R}{M} T; \quad (4)$$

$$E = E_x + \frac{3R}{M} T$$

где R – газовая постоянная; M – молярная масса.

Воспользуемся для P_x и E_x следующими выражениями из работы [24], основанными на экспериментальной зависимости (2);

$$P_x = \frac{\rho_0 C_0^2}{4\beta} \left[e^{4\beta \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)} - 1 \right], \quad E_x = \frac{P_x}{4\beta \rho_0} - \frac{C_0^2}{4\beta} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right). \quad (5)$$

Таким образом, выражения (1)–(5) позволяют определить параметры состояния (P , V , T) в любой точке ударной адиабаты твердого тела.

Кривая плавления. Кривую плавления в координатах «давление-температура» будем описывать с помощью уравнения Симона, которое он предложил еще в 1927 году [25], но строгое обоснование было дано позднее Солтером [26]. К настоящему времени это уравнение признано [27], и для нескольких сотен веществ табулированы коэффициенты [28], используемые в этом уравнении. Будем использовать уравнение Симона в виде

$$\frac{P - P'}{a} = \left(\frac{T}{T'} \right)^c - 1, \quad (6)$$

где P' и T' – давление и температура в тройной точке фаз; a и c – коэффициенты, зависящие от вещества. Обычно величиной давления P' пренебрегают, поскольку она составляет несколько миллиметров ртутного столба, то есть на 7–8 порядков меньше давлений при ударном сжатии.

Теплота плавления E_m на кривой (6) определяется с помощью выражения [27]

$$E_m = T \Delta S - P \Delta V. \quad (7)$$

Здесь ΔS – изменение энтропии при плавлении. Величина ΔS слабо зависит от давления [27]. Поэтому нами были использованы значения ΔS для начальной точки плавления при $P = 10^5$ Па из работы [29]. Почти для всех твердых тел при плавлении $\Delta V > 0$, за редким исключением, например, для льда $\Delta V < 0$. Скачок удельного объема $\Delta V = V_{ж} - V_{т}$ на кривой плавления определяется из совокупности уравнения Клаузиуса-Клапейрона

$E_m = T \frac{dP}{dT} \Delta V$ и уравнения Симона.

Ударная адиабата жидкости. В свое время В.Д. Урлин отметил, что ударная адиабата в области сосуществования фаз (твердой и жидкой) определяется только уравнениями состояния твердой фазы и кривой плавления [30]. Непосредственно после плавления теплоемкость жидкости можно принять равной теплоемкости твердого тела [31]. Следует учесть уменьшение тепловой составляющей внутренней энергии, идущей на нагрев, вследствие того, что часть ее расходуется на плавление твердого тела. В таком случае уравнение состояния принимает вид

$$P = P_x + \rho\Gamma\left(\frac{3R}{M}T + E_m\right); \quad (8)$$

$$E = E_x + \frac{3R}{M}T + E_m.$$

В уравнениях (8) величина E_m определяется по формуле (7).

Пересечение ударных адиабат с кривой плавления. На рис. 1, *a* изображены: 1 – кривая плавления по уравнению (6); 2 – ударная адиабата твердого тела по уравнениям (3)–(5); 3 – ударная адиабата жидкого тела по уравнениям (8). Пунктир выше кривой плавления соответствует перегретому твердому телу. Пунктир ниже кривой плавления соответствует переохлажденной расплавленной жидкости. В точке *A* начинается плавление, в точке *B* оно заканчивается.

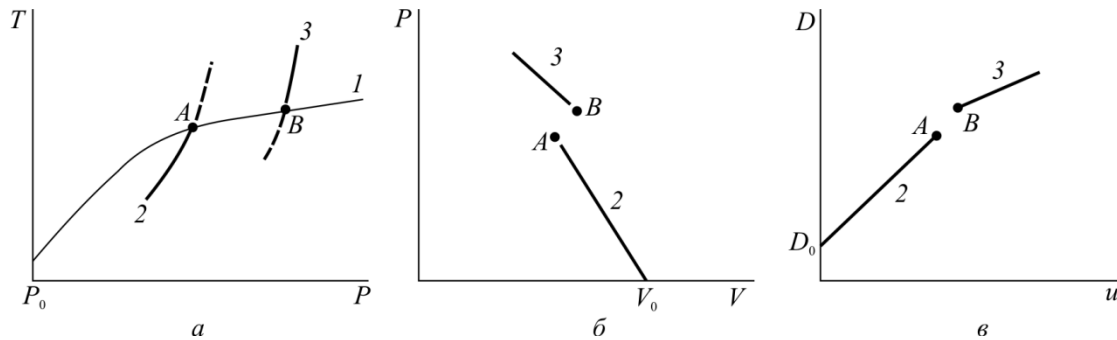


Рис. 1. Разрыв (*A-B*) на ударной адиабате при плавлении твердого тела: *a* – в координатах «давление P – температура T »; *b* – в координатах «давление P – удельный объем V »; *c* – в координатах «волновая скорость D – массовая скорость u »; 1 – кривая плавления; 2 – ударная адиабата твердого тела; 3 – ударная адиабата жидкого тела; *A* – начало плавления; *B* – конец плавления

Fig. 1. The gap (*A-B*) on the shock adiabat under a solid body melting: *a* – in the coordinates “pressure P is temperature T ”; *b* – in the coordinates is “P pressure is specific volume V ”; *c* – in the coordinates “the D wave velocity – the mass velocity u ”; 1 – Melting curve; 2 – the shock adiabat of a solid body; 3 – shock adiabat of a liquid body; *A* – is a melting start; *B* – is melting end

На рис. 1, *b* изображены ударные адиабаты твердого тела и жидкого тела в координатах «давление P – удельный объем V ». Следует отметить, что в окрестностях области плавления (точки *A* и *B*) одному значению V соответствуют два значения давления: одно на участке твердого тела, другое на участке жидкого. Такая ситуация была впервые отмечена С.В. Першиным при ударном сжатии пористых веществ [32]. Более полные представления даны в недавней работе [33].

На рис. 1, в ударная адиабата изображена в координатах «волновая скорость D – массовая скорость u ». На ударной адиабате при давлении выше состояния точки B ($P > P_B$) реализуется жидкое состояние, которое является более сжимаемым, чем твердое:

$$\left| \frac{dP}{dV} \right|_{V > V_A} > \left| \frac{dP}{dV} \right|_{V < V_B},$$

$$\left| \frac{dD}{du} \right|_{u < u_A} = \beta_T > \beta_J = \left| \frac{dD}{du} \right|_{u < u_A}.$$

Следовательно, участки ударной адиабаты в координатах P – V и D – u выше точки B являются более пологими, чем для твердой фазы ниже точки A .

Конкретные примеры

Для конкретной реализации развитой модели выбраны следующие легкоплавкие металлы: свинец, висмут, кадмий, олово. Причиной такого выбора является то, что данная работа является продолжением экспериментально-теоретических исследований [8–13, 34–36] с этими материалами, для которых выполнена экспериментальная диагностика состояний этих металлов на ударной адиабате: твердое или жидкое. Диагностика выполнена путем регистрации с помощью импульсной теневой рентгенографии процесса разлёта отколовшегося слоя (откольной тарелочки), основной части тела, от которой отделился откол, и расплывленного материала в пространстве между ними. В работах [34–36] убедительно показано, что с помощью такого метода можно однозначно определить состояние, в котором находится материал при осуществлении откольного разрыва: в твёрдом или жидком. Если откол произошёл в материале, пребывающем в твёрдом состоянии, то обе границы разрыва: тыльная поверхность откольного слоя и поверхность разрыва на основной части тела «организованные». Высота выступов и впадин не превышает 10^{-2} – 10^{-3} мм. В пространстве между ними нет расплывленного материала. Подтверждением этого являются полученные в работах [34–36] импульсные рентгеновские снимки для легкоплавких металлов и замороженной воды (льда I). На снимках границы разрыва на отколе и на оставшейся части тела чёткие. Если откол произошёл в материале, находящемся в жидком состоянии, то поверхности разрыва на отколовшейся части – и на основной части материала существенно неровные, высота неровностей – выступов и впадин составляет 10^{-1} – 10^0 мм, их границы весьма размыты. Часть пространства между ними заполнена расплывленным материалом. В табл. 1 приведены данные, являющиеся исходными для расчетов. Там же указаны литературные источники.

Таблица 1

Исходные данные для легкоплавких металлов

Table 1

Initial data for low-melting point metals

| Металл | Данные для расчета ударной адиабаты [19] | | | | | Данные для расчета кривой плавления [27, 28] | | |
|--------|--|-----------------------------------|---------|------------------------------------|---------------|--|-------|--|
| | $\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $C_0, \frac{\text{км}}{\text{с}}$ | β | $M, \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ | $T, \text{К}$ | $A, \text{ГПа}$ | C | $\Delta S, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ |
| Pb | $11,34 \times 10^3$ | 2,03 | 1,52 | 0,20719 | 600,2 | 3,23 | 2,405 | 38,42 |
| Bi | $9,79 \times 10^3$ | 2,00 | 1,34 | 0,20898 | 462 | 6,66 | 6,2 | 95,84 |
| Cd | $8,64 \times 10^3$ | 2,44 | 1,67 | 0,1124 | 594,1 | 4,5 | 2,4 | 90,96 |
| Sn II | $7,28 \times 10^3$ | 2,64 | 1,48 | 0,11869 | 591 | 1,47 | 5,2 | 120,38 |

Результаты расчетов по модели (1)–(8) приведены в табл. 2 (индексы *A* и *B* – точки на кривой плавления на рис. 1).

В качестве примера для свинца и кадмия представлены графические изображения результатов расчетов (рис. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов по модели (1)–(8), а также экспериментальные данные для легкоплавких металлов [34–36]

Table 2

Results of model computations (1)–(8), as well as experimental data for low-melting point metals

| Металл | Параметры состояния в точках пересечения ударной адиабаты с кривой плавления. Расчёт по модели (1)–(8) | | | | Параметры состояний, из которых начинаются линии разгрузки, по данным работ [34–36] | | Параметры состояний, в которых заканчиваются линии разгрузки, по данным работ [34–36] | | Зафиксированное экспериментально состояние откола по данным работ [34–36] |
|--------|--|------------|----------|------------|---|--------------------|---|-------------------|---|
| | T_A, K | $P_A, ГПа$ | T_B, K | $P_B, ГПа$ | T, K | $P, ГПа$ | T, K | $P, МПа$ | |
| Pb | 1643 | 33,2 | 1767 | 39,6 | 1300 2110 3200 | 28,5 43 57 | 870 1270 1860 | 0,1 0,1 0,1 | твёрдое жидкое жидкое |
| Cd | 1511 | 38,4 | 1679 | 49,7 | 2050 1685 930 | 52 40,6 26,5 | 1210 1770 670 | 0,1 0,1 0,1 | жидкое жидкое частично расплавленное |
| Bi | 1556 | 53,2 | – | – | 470 1390 | 24,5 51,5 | 320 720 | 0,1 0,1 | твёрдое частично расплавленное |
| Sn II | 900 | 25,4 | 978 | 38,7 | 1110 1890 | 37,9 48,5 | 695 1140 | 0,1 0,1 | жидкое жидкое |

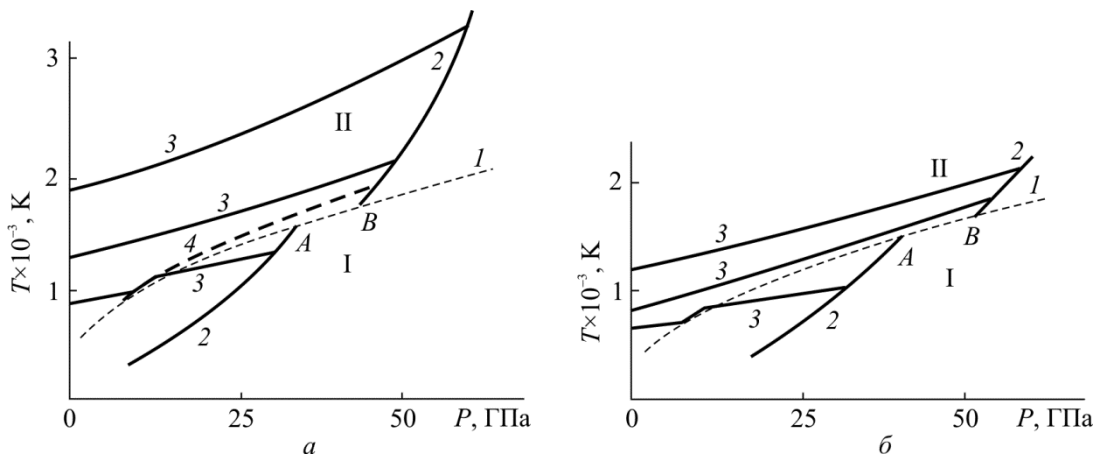


Рис. 2. Кривая плавления (1) и ударная адиабата (2), рассчитанные по модели (1)–(8) для: *a* – свинца; *b* – кадмия; I – твердое состояние; II – жидкое состояние; 3 – кривые разгрузки; 4 – кривая плавления свинца по данным работы [31]

Fig. 2. Melting curve (1) and shock adiabat (2) computed according to model (1)–(8): *a* – for copper; *b* – for cadmium; I – for solid state; II – for liquid state; 3 – for unloading curves; 4 – for copper melting curve according to data in [31]

В табл. 2 также указаны значения давления для тех состояний на ударных адиабатах выбранных металлов, для которых в работах [34–36] выполнена экспериментальная диагностика состояний: либо твердого, либо жидкого. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает адекватность представленной модели.

Замечания

1. Экспериментально получаемыми параметрами при исследовании ударно-волновой сжимаемости конденсированных тел являются кинематические параметры: волновая D и массовая скорости. Как правило $D(u)$ зависимость представляет собой кривую выпуклую от оси u . Это побуждало к кусочно-линейным аппроксимациям $D = C_0 + \beta u$ с постепенным уменьшением величины коэффициента β [18, 19–23]. Попытки аппроксимировать эту зависимость квадратным или кубическим полиномом не вполне корректны, поскольку приводят к большей погрешности.

Для тех материалов, для которых ударная адиабата $D(u)$ исследовалась наиболее скрупулёзно, отчётливо зафиксированы разрывы в точках A и B (см. рис. 1). В качестве иллюстрации этого факта на рис. 3 приведена $D(u)$ зависимость для воды, полученная в работах [8–11]. Эта зависимость получена на основе аппроксимации большого числа экспериментальных данных, первоисточники которых указаны в работах [8–11].

Разрыв между участками 1 и 2 обусловлен пересечением ударной адиабаты с кривой плавления и последующим фазовым переходом жидкой воды в твёрдое состояние лёд VII. Разрыв $A-B$ между участками 2 и 3 обусловлен пересечением ударной адиабаты льда VII с кривой плавления и переходом льда VII в жидкое состояние. Количественные значения параметров состояний A и B представлены в [8–11].

На рис. 4 показана аппроксимированная зависимость $D(u)$ для одного из наиболее подробно исследованных металлов – алюминия. Эта зависимость построена на основе экспериментальных данных, приведённых в работах [18, 20–23]. На рис. 4 отмечены состояния A и B плавления Al на ударной адиабате. В частности, давление $P_A = 121$ ГПа, что практически совпадает с данными Калеля для начала плавления алюминия в ударной волне $P_A = 125$ ГПа [41].

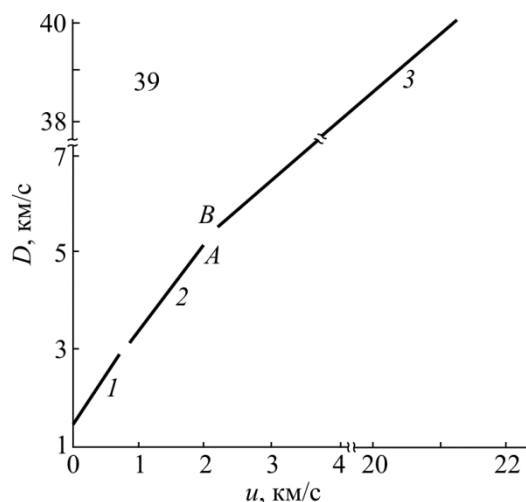


Рис. 3. Зависимость для ударно-сжатой воды: D – волновая скорость; u – массовая скорость; 1, 3 – жидкие состояния воды; 2 – твёрдое состояние лёд VI
Fig. 3. Dependence for shock-compressed water: D is wave velocity; u is mass velocity; 1, 3 – are liquid states of water; 2 is solid state of ice VI

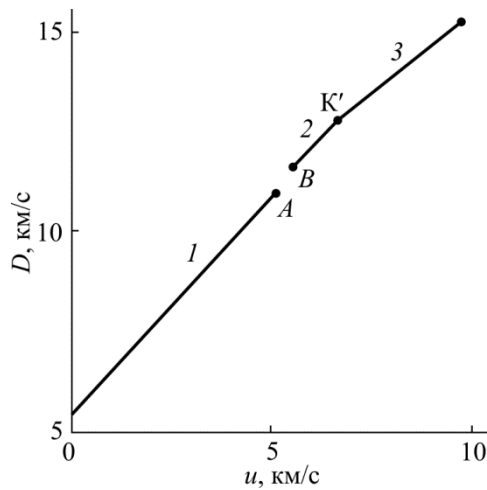


Рис. 4. Зависимость для ударно-сжатого алюминия:

D – волновая скорость; u – массовая скорость; 1 – твёрдое состояние;

2 – жидкое состояние; 3 – закритические состояния;

K' – точка пересечения ударной адиабаты с критической изотермой

Fig. 4. Dependence for shock-compressed aluminium: D is wave velocity;

u – is mass velocity; 1 – is solid state; 2 – is liquid state; 3 – is postcritical state;

K' – is the intersection point of the shock adiabat curve with the critical isotherm

2. Кроме уже отмеченных в данной статье авторов и их работ, различные стороны явления плавления, в частности, металлов изучали и многие другие исследователи. Так, давление начала плавления при ударном сжатии экспериментально определяли McQueen для алюминия [37] и Brown для таллия [38], железа [39], Nixon для молибдена [40] и других металлов.

3. При ударно-волновом сжатии данного вещества есть только одно значение давления плавления P_A . Но при множестве кривых разгрузки ударно-сжатого твёрдого состояния есть множество значений давления плавления. Разные кривые разгрузки из твёрдого состояния при $P < P_A$ пересекают кривую плавления при разных давлениях. И некорректно говорить о каком-то фиксированном, конкретно постоянном значении давления плавления в волне разгрузки, как это делается, например, в работах [41–43] и др.

2. Влияние закритического перехода на вид ударной адиабаты

Ударная адиабата, адиабата и изотерма. Взаимное расположение ударной адиабаты $P_H(V)$, называемой адиабатой Гюгонио, адиабаты $P_A(V)$ и изотермы $P_T(V)$ в координатах давление P и удельный объём V наиболее наглядно можно показать для начальной точки P_0, V_0 (рис. 5). В этой точке ударная адиабата и адиабата имеют общую касательную и кривизну. Этот факт исследован Е.И. Забабахиным [44].

Такой характер взаимного расположения ударной адиабаты, адиабаты и изотермы и их пересечения в одной точке ударной адиабаты свойствен любой произвольной точке на ударной адиабате при $\Gamma > 0$. Это свойство было использовано американскими исследователями [45, 46] для тестирования температур ударно-сжатых металлов, рассчитанных по уравнению состояния в форме уравнения Ми-Грюнаизена.

Авторами в [45, 46] для тестирования использованы серии как изотерм, так и адиабат, пересекающих в различных точках ударные адиабаты. В точках пересечения эти кри-

вые и ударная адиабата имеют одинаковые значения температур, по значениям которых подтверждались значения температур на ударной адиабате, рассчитанные по уравнению состояния. Ударную адиабату $P_H(V)$ строят по значениям кинематических параметров: волновой D и массовой u скоростей с помощью соотношений

$$P_H = \frac{Du}{V_0},$$

$$V_H = V_0 \frac{D-u}{D},$$

следующих из законов сохранения массы и импульса на ударном фронте.

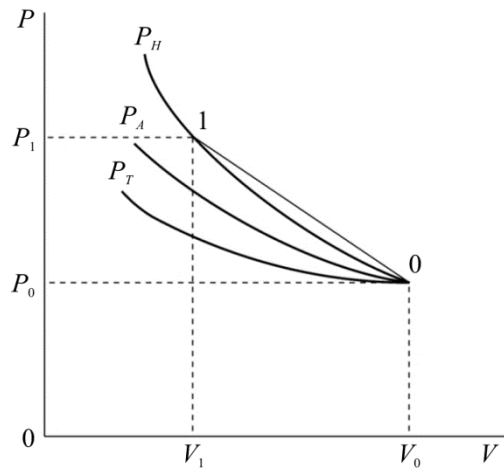


Рис. 5. Ударная адиабата P_H , адиабата P_A , и изотерма P_T , соответствующие одному и тому же начальному состоянию “0”
 Fig. 5. Shock adiabat P_H , adiabat P_A , and isotherm P_T corresponding to the same initial state “0”

Кривая холодного сжатия $P_x(V)$ является адиабатой $P_A(V)$ нулевой энтропии и нулевой изотермой $P_T(V)$ при $T = 0$ К и зависит только от удельного объема V . Величина $P_{TP}(V, T)$ есть тепловое давление, обусловленное тепловым возбуждением частиц в решетке и зависит как от удельного объема V , так и от температуры T .

Ударная адиабата и критическая изотерма. При пересечении ударной адиабаты конкретного вещества с критической изотермой этого вещества (см. рис. 4) характер ударной адиабаты изменится. Уменьшается коэффициент β в соотношении между кинематическими параметрами. В зависимости $(D - u)$ наблюдается излом и прямая $D(u)$ идёт с меньшим наклоном. Вещество становится более сжимаемым, ударная адиабата $P_H(V)$ становится более пологой, степень предельного сжатия увеличивается. Наиболее наглядно это отмечается для металлов Al, Ru, Cu, Fe, Ni, Zn, Sn и W и для ионных кристаллов NaCl, KCl, KBr, CsBr. Для этих веществ имеется информация как по их ударно-волновому сжатию, так и по параметрам в критической точке, взятая из работы [47] и помещенная в табл. 3 и 4. Ссылки на оригинальные работы даны в [47]. Критическая температура для Al получена по данным работы [48].

Излом ударной адиабаты в D - u -координатах при пересечении ею критической изотермы в точке K' (рис. 7) покажем на примере Al. На рис. 4 излом адиабаты происходит в точке K' . Координаты состояния на ударной адиабате в точке K' следующие: $u = 5,3$ км/с; $D = 12,7$ км/с; $P_H = 183$ ГПа. Температура, оценённая по модели (1)–(8), составляет 7736 К.

Критическая температура для Al оценена по данным табл. 5, взятой из работы [48]: $T_{кр} = 7313$ К с коэффициентом вариации 17 %.

Таблица 3

Данные о температурах, при которых происходят изломы в зависимостях $D(u)$ и $n(T)$

Table 3

Temperature data at which breaks in dependences and occur

| Вещество | $T_{к}, K$ | Излом в соотношении волновой D и массовой u скоростей | Излом в зависимости показателя преломления n от температуры T |
|----------|------------|---|---|
| NaCl | 3220 | 3350 | 3200 |
| KCl | 3130 | 3300 | – |
| KBr | 3000 | 3200 | 3300 |
| CsBr | 3300 | 3400 | 3500 |
| Al | 7310 | 7740 | – |
| Pb | 5400 | 5500 | – |
| Cu | 8600 | 8400 | – |
| Fe | 5000 | 5300 | – |
| Ni | 6000 | 5800 | – |
| Zn | 3380 | 3500 | – |
| Cd | 2970 | 3000 | – |
| Sn | 7000 | 7400 | – |
| W | 11500 | ~ 10000 | – |

Таблица 4

Данные о температурах (К), при которых имеют место особенности в поведении некоторых свойств при ударном сжатии конденсированных тел

Table 4

Temperatures data (K), at which some peculiarities in properties behavior under shock compression of condensed bodies occur

| Характер особенности исследуемого свойства | NaCl | KCl | KBr | CsBr | Al | Pb | W |
|--|------|------|------|------|------|------|-------|
| Перегиб в экспериментальной зависимости $T(P)$ на ударной адиабате | 3500 | 3700 | 3700 | 4000 | – | – | – |
| Минимум в зависимости подвижности свободных носителей от температуры | 3350 | – | – | – | – | – | – |
| Перегиб в зависимости коэффициента поглощения от температуры | 3300 | – | – | – | – | – | – |
| Перегиб в зависимости проводимости от температуры | 3300 | – | – | – | – | – | – |
| Максимум в зависимости вязкости от температуры | – | – | – | – | 7700 | 5500 | – |
| Минимум в зависимости скорости звука от температуры | – | – | – | – | – | – | 10000 |

Перегиб в зависимости температуры от давления в точке K' при пересечении ударной адиабатой критической изотермы покажем на примере ионных кристаллов NaCl, KCl, KBr, CsBr. На рис. 6 экспериментальные значения пар температура–давление взяты из работы Кормера [49], где такое поведение зависимости $T(P)$ объяснено плавлением.

Таблица 5

Значения критической температуры для Al по данным работы [48]
с указанием первоисточников в нумерации Morel, автора [48]

Table 5

Values of critical temperature for Al according to data in [48]
specifying sources in Morel numeration, author [48]

| Value(K) | Year | Reference |
|----------|------|------------------|
| 7400 | 1964 | Morris [6] |
| 7740 | 1967 | Kopp [7] |
| 7151 | 1971 | Young [8] |
| 6900 | 1973 | Jones [9] |
| 8000 | 1975 | Fortov [10] |
| 6040 | 1976 | Martynyuk [12] |
| 5410 | 1976 | Boissiere [13] |
| 9502 | 1977 | Hohenwarter [14] |
| 7543 | 1977 | Lang [15] |
| 8560 | 1977 | Young [16] |
| 8550 | 1977 | Blairs [17] |
| 5654 | 1993 | Celliers [18] |
| 8556 | 1993 | Celliers[18] |
| 5726 | 1993 | Likaltre [19] |
| 8860 | 1996 | Hess [20] |
| 5754 | 1998 | Hess [20] |
| 8232 | 1998 | Hess [20] |
| 7499 | 1998 | Hess [20] |
| 8944 | 1998 | Hess [20] |
| 5115 | 2006 | Blairs [21] |
| 6557 | 2006 | Blairs [21] |
| 7917 | 2008 | Gordeev [22] |

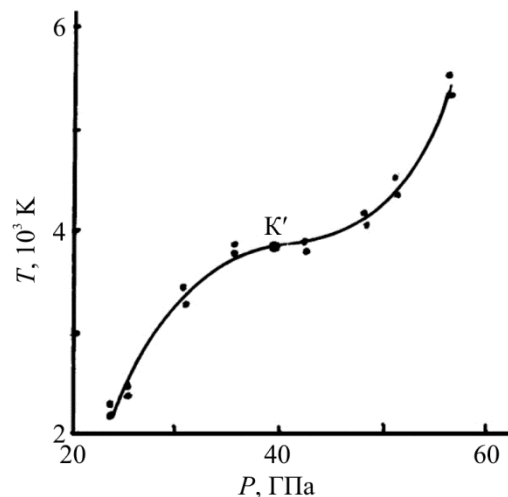


Рис. 6. Перегиб в точке K' зависимости температуры от давления ударно-сжатого ионного кристалла KCl. Экспериментальные точки взяты из работы [49]

Fig. 6. Inflection at point K' related to dependence of temperature and pressure of the shock-compressed ionic crystal KCl. The experimental points are taken from [49]

В закритической области, (на рис. 7 – выше критической изотермы) значение коэффициента β уменьшается до значений, характерных для жидкостей и пластмасс, то есть для веществ более сжимаемых, чем металлы. При пересечении ударной адиабаты с критической изотермой происходит закритический фазовый переход II рода, происходят структурные изменения. Вещество из твердого состояния переходит в состояние, близкое к жидкому, к газу высокой плотности. Связи между атомами, молекулами существенно ослабляются. Ранее Кикоины [50], Ландау, Лифшиц [51] отмечали, что, начиная с критической температуры в закритической области, все вещества должны находиться в однородном состоянии независимо от сжатия.

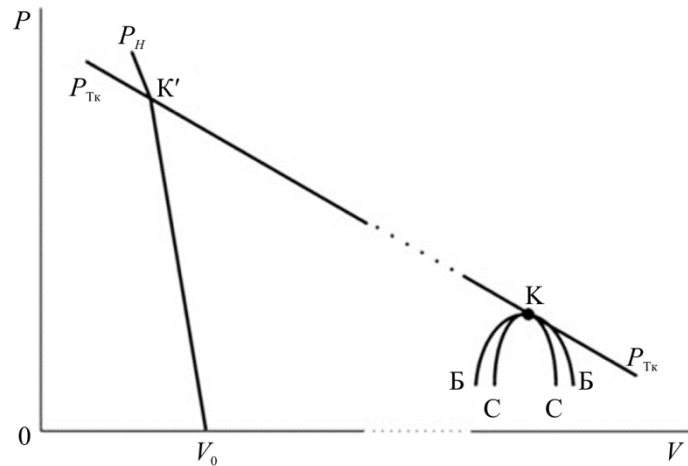


Рис. 7. Пересечение в точке K' ударной адиабаты P_H с критической изотермой $P_{Тк}$ в плоскости давление P и удельный объём V : K – критическая точка между газом и жидкостью; $B-B$ – бинодаль; $C-C$ – спинодаль

Fig. 7. The intersection at the point K' of the shock adiabat P_H with critical isotherm $P_{Тк}$ in the plane of pressure P and the specific volume V : K – critical point between the gas and liquid; $B-B$ is bimodal; $C-C$ is spinodal

Подтверждением структурной перестройки вещества при осуществлении закритического фазового перехода является также излом в зависимости $n(T)$ показателя преломления света от температуры T для ударно-сжатых ионных кристаллов при пересечении их ударных адиабат и критических изотерм.

Термодинамическая устойчивость и закритические явления. Теория закритических явлений, разработанная Семенченко [4], первоначально применялась для объяснения термодинамической устойчивости. На рис. 7 это участки выше точки K . Теория основана на существовании участков пониженной устойчивости, например, в $(P-V)$ плоскости) и оперирует понятиями термодинамических обобщенных сил X и обобщенных координат x . Если линия, отображающая какой-либо процесс, пересекает участок пониженной устойчивости, то параметры процесса при своём изменении могут иметь следующие особенности: излом (рис. 8, *a*); перегиб (рис. 8, *б*); минимум (рис. 8, *в*); максимум (рис. 8, *з*).

Например, в системе жидкость–газ выполняются условия, определяющие границу устойчивости в докритической области $\left(\frac{\partial X_i}{\partial x_i}\right)_{x_j} = 0$, в закритической $\left(\frac{\partial^2 X_i}{\partial x_i^2}\right)_{x_j} = 0$. Так, в докритической области границей полной неустойчивости участка является спинодаль,

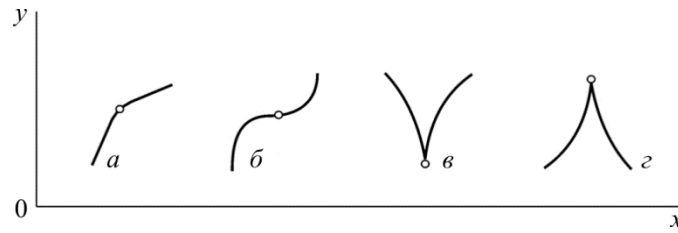


Рис. 8. Особенности в ходе изменения параметров процесса
 Fig. 8. Peculiarities in the course of measuring process parameters

определяемая изодинамическим механическим коэффициентом устойчивости $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = 0$ и термическим коэффициентом устойчивости $\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_P = \frac{T}{C_P} = 0$. Вершиной спинодали является критическая точка К (см. рис. 2). В закритической области границей участка полной неустойчивости является квазиспинодаль, определяемая условиями $\left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_T = 0$, $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial S^2}\right)_P = 0$ и имеющая вершиной сверхкритическую точку (на рис. 4 квазиспинодаль и сверхкритическая точка не показаны). Поскольку критическая точка К принадлежит обеим областям неустойчивости, как докритической, так и закритической, то в этой точке выполняются условия обеих областей

$$\left(\frac{\partial X_i}{\partial x_i}\right)_{x_j} = 0; \quad \left(\frac{\partial^2 X_i}{\partial x_i^2}\right)_{x_j} = 0.$$

Аналогично критическая изотерма является пограничной линией между докритической и закритической областями, принадлежащей обеим этим областям, и на ней также должны выполняться условия для докритической и для закритической областей. Эти положения теории закритических фазовых переходов первоначально применены к системе жидкость–газ. Затем они с успехом использованы для описания закритических переходов в кристаллических полимерах, для $\alpha - \beta$ перехода в кварце, для переходов в ферромагнетиках, для перехода металлов в сверхпроводящее состояние [4]. Приведем цитату из книги Семенченко «Оказываются весьма распространенными закритические переходы, то есть фазовые превращения, состоящие в непрерывном изменении свойств, происходящих на некотором, иногда весьма значительном, интервале температур и давлений и сопровождаемые прохождением через область пониженной устойчивости» [4].

В окрестностях точки К' пересечения ударной адиабаты и критической изотермы наблюдаются все признаки закритических фазовых переходов в конденсированных веществах. Известные данные приведены в табл. 4.

По-видимому, объяснение этих явлений вполне возможно в рамках рассмотренных положений термодинамической устойчивости. Ударные адиабаты одного и того же вещества, но с разной начальной плотностью, т.е. адиабаты пористых веществ, располагаются «веером» в плоскости давление P – удельный объем V . Это дает возможность перекрывать большие участки в докритической и закритической областях.

Заключение

Модельные результаты, подтверждённые известными экспериментальными данными, показывают, что, во-первых, пересечение ударной адиабаты твёрдого тела с кривой плавления приводит к разрыву ударной адиабаты и последующему уменьшению наклона, например зависимости волновой скорости от массовой скорости. Во-вторых, пересечение ударной адиабаты с критической изотермой приводит к излому зависимости волновая–массовая скорости. Кроме того, при пересечении ударной адиабаты с критической изотермой имеют место особенности в поведении некоторых свойств ударно-сжатого твёрдого тела: излом, перегиб, минимум, максимум в изменении параметров состояния с температурой.

Библиографический список

1. Евдокимова В.В.. Некоторые особенности закономерности фазовых Р-Т диаграмм и полиморфные превращения элементов при высоких давлениях // Успехи физических наук. – 1966. – Т. 88, вып. 1. – С. 93–124.
2. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 89, вып. 2. – С. 197–258.
3. Начало физики мегабарных давлений / Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников, В.Е. Фортов, А.Н. Фунтиков // Вестник РАН. – 2004. – Т. 74, № 11. – С. 1011–1022.
4. Семенченко В.К. Избранные главы теоретической физики. – М.: Просвещение. – 1966. – 396 с.
5. Глаголев К.В., Морозов А.Н. Физическая термодинамика: учебник. Гл. 7. Равновесие фаз и фазовые превращения [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – URL: <http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch7/texthtm/ch7.4.htm> (дата обращения: 25.12.2014).
6. Разумов В.Ф. Кинетика фазовых переходов [Электронный ресурс]. – URL: <http://lion.isr.ac.ru/e-learn/razumov/lecture07> (дата обращения: 25.12.2014).
7. Теоретическая физика. Т. X. Физическая кинетика. Гл. XII. Кинетика фазовых переходов. §99. Кинетика фазовых переходов первого рода. Образование зародышей [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.scask.ru/booktphys10.php.id=116> (дата обращения: 25.12.2014).
8. Богданов Г.Е., Рыбаков А.П. Аномалии ударной сжимаемости воды // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1992. – № 3. – С. 23–26.
9. Rybakov A.P., Rybakov I.A. Polymorphism of shocked water // Eur. Journal of Mechanics, B/Fluids. – 1995. – Vol. 14. – No. 3. – P. 323–332.
10. Рыбаков А.П. Особенности фазового превращения воды при ударном сжатии // Прикладная механика и техническая физика. – 1996. – Т. 37, № 5. – С. 17–23.
11. Rybakov A.P. Phase transitions of water under shock compression // Latvian Journal of physics and technical sciences. – 1993. – № 5. – P. 23–28.
12. Закритические и соответственные состояния ударно-сжатых конденсированных тел / М.В. Шимановская, М.А. Кочкина, А.Н. Козлов, Н.А. Рыбаков, А.П. Рыбаков // Химическая физика и мезоскопия. – 2011. – Т. 13, № 3. – С. 437–443.
13. Влияние фазового перехода первого рода на форму ударной адиабаты твердого тела / В.А. Шишкина, Н.А. Рыбаков, А.Н. Козлов, А.П. Рыбаков // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 188–182.
14. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 66–82.
15. Беляев В.В. Моделирование кинетики накопления и разрушения твёрдых тел в ударных волнах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ин-т прикл. математики АН СССР. – М., 1991. – 21 с.

16. Шимановская М.В., Рыбаков Н.А., Рыбаков А.П. Превращение воды в лед-VII при ударном сжатии // Химическая физика и мезоскопия. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 276–280.
17. Разумов В.Ф. Термодинамика фазовых переходов [Электронный ресурс]. – URL: <http://lion.iop.ac.ru/e-learn/razumov/lecture03/> (дата обращения: 25.12.2014).
18. Compendium of shock wave data / Ed. Van J Thiel. – Lawrence Radiation Laboratory. – Livermore: California University Press. – 1966. – 1030 p.
19. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнение состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. – М.: Наука, 1968. – 311 с.
20. LASL. Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh-Berkely. – Univ. California Press, 1980. – 948 p.
21. Mitchell A.C., Nellis W.J. Shock compression of aluminum, copper and tantalum // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 52. – No. 5. – P. 3363–3374.
22. Los Alamos Shock Wave Profile Data / Ed. C.E. Morris Berkeley etc. – Univ. of California Press, 1982. – 488 p.
23. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ; под ред. Р.Ф. Трунина. – 2-е изд., перераб. и доп. / РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2006. – 530 с.
24. Рыбаков А.П. Твердые тела в условиях давлений и температур ударного сжатия / ЦНИИ Атоминформ. – М., 1978. – 88 с.
25. Simon F.F., Glatzer G. // Z. Anorg. und allgem. Chem. – 1929. – Vol. 178. – P. 309.
26. Salter L. The Simon Melting Equation // Phil. Mag. – 1954. – Vol. 45. – P. 369–378.
27. Стишов С.М. Плавление при высоких давлениях // Успехи физических наук. – 1968. – Т. 96, Вып. 3. – С. 467–495.
28. Babb, Stanley E. JR. Parameters in the Simon Equation Relating Pressure and Melting Temperature // Reviews of Modern Physics. – 1963. – Vol. 35. – No. 2. – P. 400–413.
29. Staff of industrial and engineering Chemistry. Thermodynamic properties of elements. № 18. Advances in chemistry series. – Washington: Amer. Chem. Soc., 1956. – 234 p.
30. Урлин В.Д., Иванов А.А. О плавлении при сжатии ударной волной // Докл. АН СССР. – 1963. – Т. 149, № 6. – С. 1303–1306.
31. Урлин В.Д. Плавление при сверхвысоких давлениях, полученных в ударной волне // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1965. – Т. 49, вып. 2 (8). – С. 485–492.
32. Аномальная сжигаемость пористых материалов / С.В. Першин, Г.А. Адагуров, В.С. Трофимов, А.Н. Дрёмин // Физика горения и взрыва. – 1968. – Т. 4, № 2. – С. 244–253.
33. Зельдович Я.Б., Фортгов В.Е., Ломоносов И.В. Проблемы уравнений состояния вещества в экстремальных условиях // Успехи физических наук. – 2014. – Т. 184, № 3. – С. 231–246
34. Рентгенографические исследования процесса разлета легкоплавких металлов при выходе ударной волны на их свободную поверхность / С.А. Бородулин, А.И. Бричиков, К.В. Волков, Ю.В. Ольховский, А.П. Рыбаков // Физика твердого тела. – 1976. – Т. 18. – С. 2814–2816.
35. Rybakov A.P., Rybakov I.A. Reaction of condensed matter to extremely short-duration and intense loading. Strength of solids and liquids under dynamic damage // Eur. J. Mech., B. Fluids. – 1995. – Vol. 14. – No. 2. – P. 197–205.
36. Rybakov A.P. Spall in non-one-dimensional shock waves // Int. J. of Impact Eng. – 2000. – Vol. 24. – P. 1041–1082.
37. Asay J.R., Graham R.A., Struab G.K. Shock waves in condensed matter. – 1983. – Part 2. – P. 91, 95.
38. Brown J.M., McQueen R.G., Geophys J. Res. 91, B7, 7485-7494 (1986).
39. Hixson R.S., Boness D.A., Shaner J.W. Acoustic velocities and phase transition in molibdenum under strong shock compression // Phys. Rev. Lett. – 1989. – Vol. 62. – P. 637.
40. Kanel G.I. Goel, B., Baumung K. Shock-wave physics with intense ion beams // Shock compression of condensed matter, 1997. – P. 155.

41. Осипов Р.С., Фунтиков А.И., Цыганов В.А. Определение термодинамических параметров ударного сжатия свинца, олова, меди и никеля по их плавлению в ампулах сохранения // ТВТ. – 1998. – Т. 36, № 4. – С. 590–595.
42. Жиёмбетов К.И. Плавления в волне разгрузки при ударно-волновом сжатии // Shock waves in condensed matter: тез. междунар. конф. 18–23 июля 2004. – СПб., 2004. – С. 124.
43. Забабахин Е.И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва / РФЯЦ-ВНИИФ. – Снежинск, 1997. – 203 с.
44. Walsh J.M., Russel H.C. Equation of State of Metals from Shock Wave Measurements // Physical Review. – 1955. – Vol. 97. – No. 6. – P. 1544–1556.
45. Shock-Wave Compression of Twenty-Seven Metals / J.M. Walsh, M.H. Rice, R.G. McQueen [et. al.] // Physical Review. – 1957. – Vol. 108. – No. 2. – P. 196–216.
46. Ударная адиабата в закритической области / В.А. Огарков, В.П. Ратников, А.П. Рыбаков, С.В. Самолов, И.В. Санин // Журнал физической химии. – 1972. – Т. XLVI, № 7. – С. 1658–1660.
47. Morel V., Bultel A., Chéron B.G. The critical temperature of aluminum // International Journal of Thermophysics. – 2009. – No. 30 (6). – P. 1853–1863.
48. Кормер С.Б. Оптические исследования свойств ударно-сжатых конденсированных диэлектриков // Успехи физ. наук. – 1968. – Т. 94, вып. 4. – С. 641.
49. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Молекулярная физика. – М.: Физматгиз, 1963. – 473 с.
50. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. V. Статическая физика. – М.: Наука, 1964. – 657 с.
51. Skidmore J.C. An introduction to shock waves in solids // Appl. Mater. Res. – 1965. – Vol. 4. – No. 3. – P. 131–147.
52. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 626 с.
53. Вологжанин О.Ю. Вологжанин Р.О., Рыбаков А.П. Описание процессов в твёрдых телах при ударных нагрузках // Оборонная техника. – 2010. – № 10. – С. 30–35.
54. Кузьмин Н.Н., Черноземцев А.В., Рыбаков А.П. Модели для описания явлений воздействия ударников на панели бронезилов // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 12. – С. 174–181.
55. High velocity impact phenomena / Ed. R. Kinslow. – N.Y., London: Acad. Press, 1970. – 568 p.

References

1. Evdokimova V.V.. Nekotorye osobennosti zakonmernosti fazovykh P-T diagramm i polimorfnye prevrashcheniia elementov pri vysokikh davleniakh [Some features of regularity of phase P-T of charts and polymorphic transformations of elements with high pressures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1966, t. 88, vol. 1, pp. 93-124.
2. Al'tshuler L.V. Primenenie udarnykh voln v fizike vysokikh davlenii [Application of shock waves in physics of high pressures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1965, t. 89, vol. 2, pp. 197-258.
3. Al'tshuler L.V., Krupnikov K.K., Fortov V.E., Funtikov A.N. Nachalo fiziki megabarnykh davlenii [The physics of megabar pressure]. *Vestnik RAN*, 2004, vol 74, no. 11, pp. 1011-1022.
4. Semenchenko V.K. Izbrannye glavy teoreticheskoi fiziki [The elected heads of theoretical physics]. *Moscow, Prosveshchenie*, 1966, 396 p.
5. Glagolev K.V., Morozov A.N.. Fizicheskaiia termodinamika. Uchebnik [Fizical thermodynamics]. MGTU im. N.E. Bauman. Kafedra fiziki. Glava 7. Ravnovesie faz i fazovye prevrashcheniia, available at: <http://fn.bmstu.ru/phys/bib/physbook/tom2/ch7/texthtm/ch7.4.htm>.
6. Razumov V.F. Kinetika fazovykh perekhodov [Kinetik's reasons of phase transitions], available at: <http://lion.icp.ac.ru/e-learn/razumov/lecture07>.
7. Teoreticheskaiia fizika. Tom.X. Fizicheskaiia kinetika, glava XII. Kinetika fazovykh perekhodov §99. Kinetika fazovykh perekhodov pervogo roda. Obrazovanie zarodyshei [Theoretical physics.

Tom.Kh. Physical kinetics, chapter XII. Kinetics of phase transitions §99. Kinetics of phase transitions of the first sort. Formation of germs], available at: <http://www.scask.ru/booktphys10.php.id=116>.

8. Bogdanov G.E., Rybakov A.P. Anomalii udarnoi szhimaemosti vody [Anomalies of shock compressibility of water]. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki*, 1992, no. 3, pp. 23-26.

9. Rybakov A.P., Rybakov I.A.. Polymorphism of shocked water. *Eur. Journal of Mechanics, B/Fluids*, 1995, vol. 14, no 3, pp. 323-332.

10. Rybakov A.P. Osobennosti fazovogo prevrashcheniia vody pri udarnom szhatii [Features of phase transformation of water at shock compression]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika*, 1996, vol 37, no. 5, pp.17-23.

11. Rybakov A.P. Phase transitions of water under shock compression. *Latvian Journal of physics and technical sciences*, 1993, no. 5, pp. 23-28.

12. Shimanovskaia M.V., Kochkina M.A., Kozlov A.N., Rybakov N.A., Rybakov A.P. Zakriticheskie i sootvetstvennye sostoianiiia udarno-szhatykh kondensirovannykh tel [Kriticale and corresponding conditions of the shock squeezed condensed body]. *Khimicheskaiia fizika i mezoskopiiia*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 437-443.

13. Shishkina V.A., Rybakov N.A., Kozlov A.N., Rybakov A.P. Vliianie fazovogo perekhoda pervogo roda na formu udarnoi adiabaty tverdogo tela [Influence of phase transition of the first sort on a form of a shock adiabatic curve of a solid body]. *Khimicheskaiia fizika i mezoskopiiia*, 2013, vol 15, no. 2, pp. 182-188.

14. Zhurkov S.N. Problema prochnosti tverdykh tel [Problem of durability of solid bodies]. *Vestnik AN SSSR*, 1957, no. 11, pp. 66-82.

15. Beliaev V.V. Modelirovanie kinetiki nakopleniia i razrusheniia tverdykh tel v udarnykh volnakh [Modeling of kinetics of accumulation and destruction of solid bodies in shock waves]. Avtoref. dis. kand. fiz.-mat. cs. Moscow University applied Mathematics AN SSSR, 1991, 21 p.

16. Shimanovskaia M.V., Rybakov N.A., Rybakov A.P.. Prevrashchenie vody v led-VII pri udarnom szhatii [Transformation of water into ice-VII at shock compression]. *Khimicheskaiia fizika i mezoskopiiia*, 2010, vol 12, no. 2, pp. 276-280.

17. Razumov V.F. Termodinamika fazovykh perekhodov [Termodinamik's reasons of phase transitions], available at: <http://lion.iop.ac.ru/e-learn/razumov/lecture03/>.

18. Compendium of shock wav data. Ed. Van J Thiel Lawrence Radiation Labolatory. *Livermore: California University Press*, 1966, 1030 p.

19. Zharkov, V.N., V.A. Kalinin Uravnenie sostoianiiia tverdykh tel pri vysokikh davleniiaikh i temperaturakh [Uravneniye of a condition of solid bodies with high pressures and temperatures]. *Moscow, Nauka*, 1968, 311 p.

20. LASL. Shock Hugoniot Data. Ed. Marsh-Berkely: Univ. California Press, 1980, 948 p.

21. Mitchell A. C., Nellis W. J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum. *J. Appl. Phys*, 1981, vol. 52, no. 5, pp. 3363-3374.

22. Los Alamos Shock Wave Profile Data. Ed. C.E. Morris Berkeley etc.: Univ. of California press, 1982, 488 p.

23. Eksperimental'nye dannye po udarno-volnovomu szhatiiu i adiabaticheskomu rasshireniiu kondensirovannykh veshchestv [Experimental data on shock wave compression and adiabatic expansion of the condensed substances] R. F. Trunin, L.F. Gudarenko, M.V. Zhernokletov; pod red. R.F. Trunina – 2-e izd., Sarov, *RFNC-VNIIEF*, 2006, 530 p.

24. Rybakov, A.P. Tverdye tela v usloviiaikh davlenii i temperatur udarnogo szhatiiia [Solid bodies in the conditions of pressure and temperatures of shock compression]. *Moscow, Atominform*, 1978, 88 p.

25. Simon, F.F., Glatzer, G.Z. anorg. u. allgem. Chem, 1929, vol. 178, p. 309.

26. Salter, L. The Simon Melting Equation. *Phil Mag*, 1954. vol. 45, pp. 369-378.

27. Stishov, S.M. Plavlenie pri vysokikh davleniiaikh [Melting with high pressures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1968, vol 96. no. 3, pp. 467-495.

28. Babb, Stanley E. JR. Parameters in the Simon Equation Relating Pressure and Melting Temperature. *Reviews of Modern Physics*, 1963, vol. 35, no. 2, pp. 400-413.
29. Staff of industrial and engineering Chemistry. Thermodynamic properties of elements. No. 18. Advances in chemistry series. *Washington: Amer. Chem. Soc.*, 1956, 234 p.
30. Urlin, V.D. O plavlenii pri szhatii udarnoi volnoi [About melting at compression by a shock wave.]. *Doklady AN SSSR*, 1963, vol 149, no. 6, pp. 1303-1306.
31. Urlin, V.D. Plavlenie pri sverkhvysokikh davleniiah, poluchennykh v udarnoi volne [Melting with the ultrahigh pressure received in a shock wave]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 1965, vol. 49, no. 2 (8), pp. 485-492.
32. Pershin S.V., Adadurov G.A., Trofimov V.S., Dremin A.N. Anomal'naia szhigaemost' poristykh materialov [Abnormal pressure of porous materials]. *Fizika Goreniia i vzryva*, 1968, vol 4, no. 2, pp. 244-253.
33. Ia. B. Zel'dovich. Problemy uravnenii sostoianiiia veshchestva v ekstremal'nykh usloviiah [Problems of the equations of a condition of substance in extreme conditions]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2014, vol. 184, no. 3, pp. 231-246
34. Borodulin, S.A. Rentgenograficheskie issledovaniia protsessa razleta legkoplavkikh metallov pri vykhode udarnoi volny na ikh svobodnuiu poverkhnosti [Radiographic researches of process of scattering of fusible metals at an exit of a shock wave to their free surface]. *Fizika tverdogo tela*, 1976, vol. 18, pp. 2814-2816.
35. Rybakov, A.P. Reaction of condensed matter to extremely short-duration and intense loading. Strength of solids and liquids under dynamic damage A.P. Rybakov and I.A. Rybakov. *Eur. J. Mech., B. Fluids*, 1995, vol. 14, no. 2, pp. 197-205.
36. Rybakov, A.P. Spall in non-one-dimensional shock waves. *Int. J. of Impact Eng.*, 2000, vol. 24, pp. 1041-1082.
37. Asay J.R., Graham R.A., Struab G.K. Shock waves in condensed matter, 1983, p. 91, 95.
38. J.M. Brown and R.G. McQueen, *J. Geophys. Res.* 91, B7, 7485-7494 (1986).
39. Hixson R.S., Boness D.A., Shaner J.W. Acoustic velocities and phase transition in molibdenum under strong shock compression. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, vol. 62, pp. 637.
40. Kanel G.I. Goel, B.; Baumung, K. Shock-wave physics with intense ion beams. *Shock compression of condensed matter*, 1997, p. 155.
41. R.S. Osipov, A. I. Funtikov, V. A. Tsyganov Opredelenie termodinamicheskikh parametrov udarnogo szhatiiia svintsa, olova, medi i nikelia po ikh plavleniiu v ampulakh sokhraneniia [Megured of thermodynamic parameters of shock compression of lead, tin, copper and nickel on their melting in ampoules of preservation]. *High Temp*, 1998, vol. 36, no. 4, pp. 590-595.
42. Zhiembetov K.I. Plavleniia v volne razgruzki pri udarno-volnovom szhatii [Some questions of gas dynamics of explosion]. *Tez. Mezhdunar. Konf. «Shock waves in condensed matter»*. S-Peterburg, 2004, p. 124.
43. Zababakhin, E.I. Nekotorye voprosy gazodinamiki vzryva [Some questions of gas dynamics of explosion]. *Snezhinck, RFNC- NITIF*, 1997, 203 p.
44. Walsh J.M., Russel H.C. Equation of State of Metals from Shock Wave Measurements. *Physical Review*, 1955, vol. 97, no. 6, pp. 1544-1556.
45. Walsh J.M. Rice M.H., McQueen R.G. et. al. Shock-Wave Compression of Twenty-Seven Metals. *Physical Review*, 1957, vol. 108, no. 2, pp. 196-216.
46. Ogarkov, V.A. Udarinaia adiabata v zakriticheskoi oblasti [A shock adiabatic curve in zakriticheskyy area]. *Zhurnal fizicheskoi khimii*, 1972, vol. XLVI, no. 7, pp. 1658-1660.
47. V Morel, A Bultel, BG Chéron The critical temperature of aluminum. *International Journal of Thermophysics*, 2009, no. 30 (6), pp. 1853-1863.
48. Kormer S.B. Opticheskie issledovaniia svoistv udarno szhatykh kondensirovannykh dielektrikov [Optical researches of properties of with great dispatch compressed condensed dielectrics]. *Uspekhi fiz. Nauk*, 1968, vol. 94, no. 4, pp. 641.

49. Kikoin I.K. Molekuliarnaia fizika [Molecular physics]. *Moscow, Fizmatgiz*, 1963, 473 p.
50. Landau, L.D. Teoreticheskaia fizika [Theoretical physics. Tom V. Statistic physics]. *Moscow, Nauka*, 1964, 657 p.
51. Skidmore J.C. An introduction to shock waves in solids. *Appl. Mater. Res.*, 1965, vol. 4, no. 3, pp. 131-147.
52. Zeldovich Ja.B., Raizer Iu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh iavlenii [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. *Moscow: "Nauka" – Press*, 1966, 626 p.
53. Vologzanin O.Iu., Vologzanin R.O., Rybakov A.P. Opisanie protsessov v tverdykh telakh pri udarnykh nagruzkakh [Description of processes in solids under shock loadings] // *Oboronnaia tekhnika*, 2001, no. 10, pp. 30-35.
54. Kuzmin N.N., Chernozemzev A.V., Ribakov A.P. Modeli dlia opisaniia iavlenii vozdeistviia udarnikov na paneli bronezhileta [Models to describe phenomena of impact of impactor on armored waistcoat panel]. *Izvestiia TulGU. tekhnicheskie nauki*, 2014, vol. 12, part 1, pp. 174-181.
55. High velocity impact phenomena. Ed. R. Kinslow, *N.-Y. London: Acad. Press*, 1970, 568 p.