

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. N. Mineev, A. I. Funtikov, Measurements of the viscosity of water under shock compression,
TVT, 2005, Volume 43, Issue 1, 136–145

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt1234>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use
<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.175

May 20, 2025, 10:50:29



УДК 539.89

ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ СЖАТИИ

© 2005 г. В. Н. Минеев, А. И. Фунтиков

Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Москва

Поступил в редакцию 23.04.2004 г.

Результаты измерений сдвиговой вязкости воды при ударном нагружении, полученные методом затухания возмущений на гофрированном фронте ударной волны, предложенным Сахаровым и др. [1], рассматриваются в свете новых данных по фазовой диаграмме воды. Полученные экспериментальные данные по вязкости в области давлений 4–25 ГПа сопоставлены с результатами измерений, выполненными другими методами. Большие значения вязкости при высоких давлениях объясняются образованием смеси вода–лед VII при ударном сжатии воды.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования свойств воды и льда при высоких давлениях и температурах проводятся с целью изучения физики конденсированного состояния вещества, физической химии, геофизики, планетологии, а также самых разнообразных вопросов науки и техники. При сравнительно невысоких давлениях (менее 1 ГПа) реологические свойства воды, включая вязкость, необходимы для исследования процессов гидродинамики и теплообмена. В последнее время реологические свойства воды используются для проектирования некоторых типов энергетических установок, а также новых технологий в пищевой промышленности [2] и медицине, где, в частности, ударное сжатие воды стало применяться для разрушения почечных камней [3].

При более высоких давлениях, достигаемых с помощью ударного сжатия, однозначного представления о поведении вязкости воды не получено [4]. Имеющиеся данные, являющиеся результатами разных методов измерений, не согласуются друг с другом [5–10].

И в той и другой областях давлений проявляются особенности воды, связанные с ее фазовой диаграммой и отличающие ее свойства от поведения простых жидкостей.

Первые измерения вязкости воды до давлений 1.1 ГПа в области температур 0–75° С были выполнены Бриджменом [11]. В дальнейшем в этой области давлений достаточно хорошо совпадающие результаты, отличающиеся методиками исполнения, были получены в работах [2, 12–14]. Было установлено, что на изотермах $T = -10...+20^\circ\text{C}$ вязкость имеет минимум в области давлений $P < 0.2$ ГПа, где расположена кривая плавления льда I с аномальным наклоном $dT/dP < 0$ (рис. 1). Уменьшение вязкости с ростом давления, по мнению авторов [13, 14], связано с трансформацией

водородных связей, что в свою очередь становится причиной изменения размеров и разрушения некоторой части кластеров, существующих в воде при нормальных условиях и позволяющих рассматривать ее как состояние “вода в воде” [2, 15]. С повышением температуры $T > 20^\circ\text{C}$, а также в области давлений $P > 0.2$ ГПа увеличение вязкости с ростом давления на изотермах происходит во всем диапазоне давлений.

Диаграмма вязкости воды для начальных состояний на кривой плавления была проанализирована Люстерником в [16]. В отличие от простых жидкостей в области, сопредельной с фазами льда I, III, V, VI, изменение вязкости происходит немонотонно. От исходного значения при $P = 0.1$ МПа,

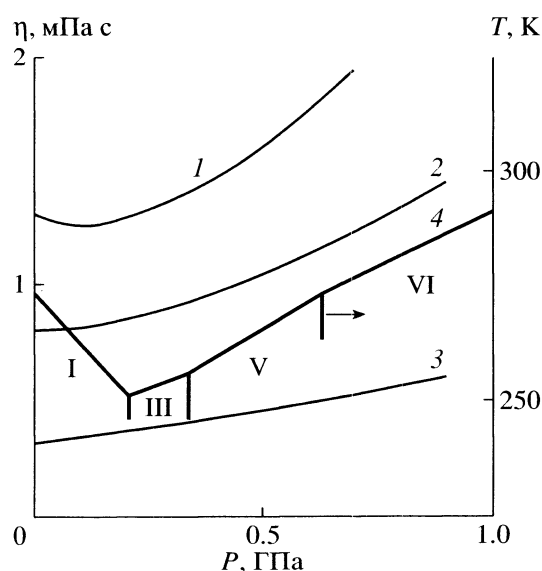


Рис. 1. Изменение вязкости воды на изотермах: 1–3 — изотермы $T = 283, 303$ и 363 К, 4 — положение границы вода–лед на диаграмме T – P .

$T = 293 \text{ K}$, $\eta_0 = 1.8 \text{ мПа с}$ до тройной точки лед I – лед III вязкость возрастает почти в три раза до $\eta = 4.6 \text{ мПа с}$, а затем плавно убывает до тройной точки лед VI – лед VII, в которой значение вязкости минимально. Далее с ростом давления вязкость увеличивается. Изменение вязкости на этой ветви кривой затвердевания воды, исходящей из тройной точки лед VI – лед VII с параметрами $P = 2.2 \text{ ГПа}$, $T = 355 \text{ K}$, $\rho_v = 1.33 \text{ г/см}^3$, $\eta = 1.4 \text{ мПа с}$, рассчитывалось в [16] с помощью модельных квазигазовых представлений для твердых сфер Энского [17]. Изменение вязкости коррелирует с изменением плотности и соответствует поведению классической жидкости. По оценкам [16] при $T = 870 \text{ K}$, $\rho_v = 1.8 \text{ г/см}^3$ вязкость увеличивается до $\eta = 5 \text{ мПа с}$.

Сжатие вещества с помощью ударных волн [18] позволяет достигать более высоких значений давлений, недоступных при использовании статических методов. Однако параметры сжатого вещества, в частности вязкость, определяются сопровождающими ударное сжатие процессами, т.е. высокоскоростной деформацией на фронте ударной волны, неадиабатическим нагревом и течением вещества за фронтом волны. При этом вязкость проявляется как во влиянии на ширину фронта ударной волны, так и в диссипативных процессах, сопровождающих распространение ударной волны.

Для определения вязкости воды с применением ударных волн использовались следующие методы: развитие заданных гармонических возмущений на фронте ударной волны [1, 5, 6], измерение скорости вовлекаемого в движение цилиндрического тела, расположенного вдоль фронта ударной волны [7–9], а также примесной электропроводности слабых растворов воды [10, 19]. Максимальные давления ударного сжатия (до 25 ГПа) были получены в работах [5, 6]. При ударном сжатии воды проявились особенности ее фазовой диаграммы и возможность замерзания, т.е. перехода воды при повышении давления в состояние льда VII [3, 20–23].

УДАРНАЯ АДИАБАТА ВОДЫ

Систематические исследования ударной сжимаемости воды начались в 50-е годы Уолшем, Райсом [20] и Альтшулером, Бакановой, Труниным [21]. Диапазон давлений составил до 25 ГПа в [20] и до 80 ГПа в [21]. В дальнейшем эти результаты уточнялись в основном до давлений ~100 ГПа [24–28]. Результаты измерений были представлены в виде зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости вещества за фронтом ударной волны U . Эти данные с помощью законов сохранения массы и импульса позволяют определить давление и степень сжатия

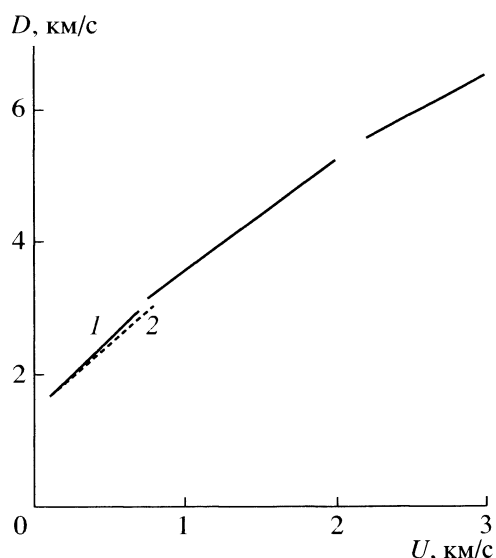


Рис. 2. $D-U$ зависимости для адиабаты ударного сжатия воды: 1 – данные [32], 2 – данные [3].

$\sigma = \rho/\rho_0$ (ρ , ρ_0 – плотности сжатого и исходного вещества)

$$P = \rho_0 U D; \quad \sigma = D/(D-U). \quad (1)$$

Уже в первых измерениях [21, 22] было установлено, что ударная адиабата воды из исходного состояния при $T_0 = 20^\circ \text{ C}$ в координатах $D-U$ в области давлений ~12–13 ГПа имеет излом, который авторы связывали с пересечением ударной адиабаты кривой плавления льда. В [20] это явление объяснялось аналогией с плавлением на ударной адиабате льда I из начального состояния при $T_0 = -10^\circ \text{ C}$. Предполагалось также, что в области более низких давлений может происходить первое пересечение ударной адиабаты воды с кривой плавления, отвечающее образованию за фронтом ударной волны льда VII. Однако на зависимостях $D(U)$ соответствующий излом не был обнаружен. Поэтому в работах [22, 27–30] данные зависимости были представлены двумя линейными отрезками разного наклона, положение излома которых соответствовало их пересечению.

Дальнейшая обработка экспериментальных результатов, проведенная в [31, 32], позволила аппроксимировать ударную адиабату воды тремя линейными отрезками, для которых соотношения и пределы их применения находились путем последовательного подбора значений $D(U)$ из полного массива экспериментальных данных. Полученные в [32] зависимости показаны на рис. 2. Первый излом на разрыве зависимости $D(U)$ соответствовал давлению 2.1–2.3 ГПа, второй – 10.5–12.2 ГПа.

Более точное представление об ударной адиабате в области давлений $P < 2 \text{ ГПа}$ было получено в работе Нагаямы и др. [3], где ударное сжатие воды создавалось ударом пластины из полимера со скоростью менее 500 м/с. Положение рассчитан-

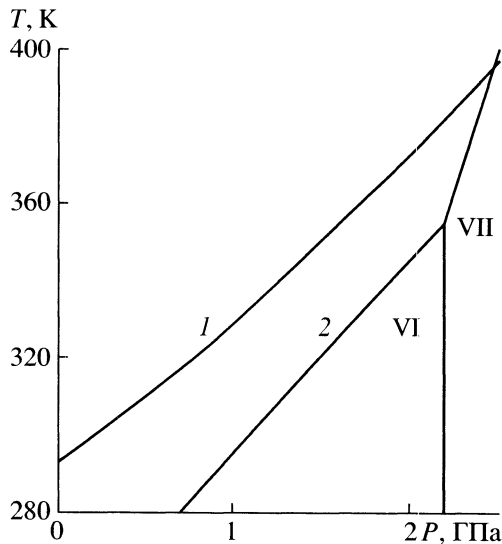


Рис. 3. Фазовая диаграмма воды в области льдов VI, VII: 1 – ударная адиабата воды [3], 2 – фазовая граница [16].

ной по уравнению состояния ударной адиабаты и кривой плавления на фазовой диаграмме T – P показано на рис. 3. Пересечение с кривой плавления по данным [31, 32] достаточно близко к значению давления $P_1 = 2.4$ ГПа, полученному в [3].

Возможность образования льда VII была предметом изучения в экспериментах [20–23, 33, 34], в которых проводилось оптическое зондирование состояния вещества за фронтом ударной волны. Оказалось, что за исключением результатов, полученных в [21] и не подтвержденных в других исследованиях, изменений прозрачности ударно-сжатой воды в диапазоне давлений от 3 до 30 ГПа не наблюдалось. В то же время ударная адиабата воды на фазовой диаграмме T – P , рассчитанная по уравнению состояния [35], как было показано в [34], практически соприкасалась с кривой плавления льда [36] в окрестности давления ~ 4 ГПа. Поэтому попасть в область существования льда VII оказалось возможным только с помощью двухкратного сжатия воды. Результаты экспериментов, проведенных Кормером, Юшко и Кришкевичем [23, 34], были интерпретированы как свидетельствующие об образовании мелкокристаллического льда за фронтом второй ударной волны. Время образования льда оценивалось в 10^{-6} – 10^{-7} с. Однако по полученным данным нельзя было судить о полноте фазового перехода в таких условиях. С повышением давления в первой ударной волне $P > 12$ – 15 ГПа были получены состояния, заведомо отвечающие жидкой фазе.

На рис. 4 представлена фазовая диаграмма и расчетные ударные адиабаты воды, соответствующие области состояний выше кривой плавления. Там же показаны адиабаты двухкратного

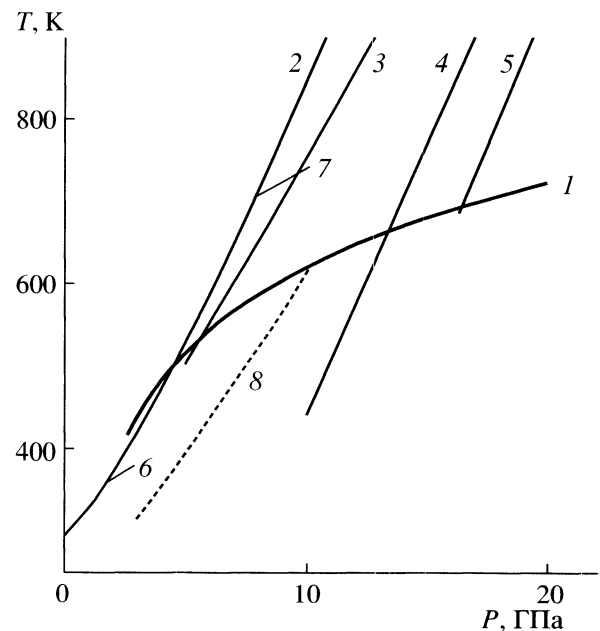


Рис. 4. Кривая плавления и ударные адиабаты воды. 1 – кривая плавления, 2–5 – ударные адиабаты: 2 – данные [35], 3 – данные [38], 4 – данные [29], 5 – данные [32], 6, 7 – ударные адиабаты двухкратного сжатия [34], 8 – ударная адиабата смеси вода–лед VII [32].

сжатия воды [34]. Кривая плавления льда VII взята по уточненным результатам измерений Фей и др. до давлений $P = 20$ ГПа [37].

Предварительные оценки давления P_2 в точке пересечения кривой плавления и ударных адиабат, идущих из области более высоких давлений [29, 35, 38], были получены в [32, 34] по данным более ранних измерений кривых плавления льда VII [36, 39] при несколько меньших температурах, чем по данным [37]. Как видно из рис. 4, значения P_2 составляют для ударных адиабат: кривая 2 – 5.2 [35], кривая 3 – 6.5 [38], кривая 4 – 13.5 ГПа [29].

Все расчетные ударные адиабаты воды на диаграмме P – T соответствовали уравнениям состояния жидкой фазы. Уравнение состояния в форме Ми–Грюнайзена было получено Райсом и Уолшем [35] по экспериментальным данным по ударной сжимаемости [20]. Достаточно близкими к результатам [35] оказались температуры ударного сжатия воды, полученные по уравнению состояния [40].

Температура ударно-сжатой воды была измерена при давлении 30–40 ГПа в [34], а затем при давлении 50–80 ГПа в [41]. Рассчитанные в [35, 40] значения температур оказались завышенными примерно на 10% по сравнению с результатами измерения температуры [34]. Было обнаружено еще большее различие данных [35, 40] с результатами [41]. Усовершенствованное в [38] уравнение состояния, в котором использовалась зависимость теплоемкости воды от температуры $C_V(T)$ (в [35] теплоем-

кость принималась постоянной), оказалось более близким как к экспериментальным данным [34], так и к [41]. В то же время значения температуры на ударной адиабате, полученные с помощью квантово-механического расчета потенциала взаимодействия молекулы воды [42], оказались существенно завышенными (примерно на 500 К) по сравнению с данными измерений [34, 41].

Уравнение состояния воды в [29] было получено на основании экспериментальных данных по ударной сжимаемости воды при $T_0 = 20^\circ \text{C}$, образцов льда и прессованного снега из состояния при $T_0 = -15^\circ \text{C}$ с нормальной и искусственно заниженной начальной плотностью. Значение коэффициента Грюнайзена определялось в приближении теории свободного объема. Расчетные значения температур на ударной адиабате воды оказались примерно на 5% меньше результатов [34].

Обзор данных по широкодиапазонным интерполяционным уравнениям состояния воды и сопоставление отвечающих им нулевых изотерм проведены Жарковым и Трубицыным в [43].

Переход в область затвердевания воды при ударном сжатии (рис. 4) должен приводить к образованию в ней зародышей – кристаллических микрообластей. Кроме них вблизи температуры затвердевания могут также появляться некристаллические структуры – кластеры, содержащие некоторое число частиц, обладающих близкими к кристаллическим зародышам термодинамическими параметрами [44]. И те и другие должны находиться внутри более разупорядоченной и менее плотной жидкости. На возможность образования таких кластеров в воде указывалось в [30, 45]. Предкристаллизационные явления в жидкостях проявляются прежде всего в аномальном возрастании вязкости [44].

В двухфазной области весовая доля образующегося льда α на ударной адиабате смеси льда VII и воды рассчитывается в соответствии с аддитивным вкладом компонентов, находящихся при равновесных давлении и температуре. Удельный объем смеси V и внутренняя энергия E равны

$$V = \alpha V_1 + (1 - \alpha)V_2, \quad E = \alpha E_1 + (1 - \alpha)E_2, \quad (2)$$

где нижние индексы 1, 2 относятся к составляющим смеси – лед VII–вода.

Расчетные оценки α по уравнению состояния Ми–Грюнайзена в приближении постоянных и равных для компонентов значений теплоемкости C_V и коэффициента Грюнайзена γ , а также одинаковой изотермы $P_i(V)$ при $T_0 = 300 \text{ K}$ были проведены в [32]. В этом случае давление двухфазной смеси составляет

$$P = P_i + \gamma(T - T_0)(\alpha C_{V1} + (1 - \alpha)C_{V2})/V. \quad (3)$$

Зависимость $P_i(V)$ соответствовала экспериментальным данным для изотермы $T = 300 \text{ K}$ льда

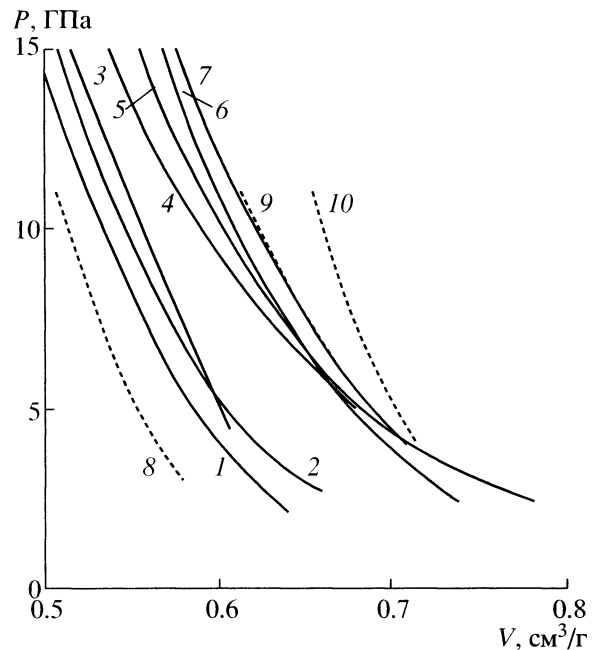


Рис. 5. P - V диаграмма воды. Сплошные кривые: 1, 2 – изотермы $T = 300$ и 600 K льда VII [37], 3 – $P(V)$ на кривой плавления льда VII [37], 4 – изотерма $T = 573 \text{ K}$ воды [49], 5 – изэнтропа воды ($T = 340\text{--}440 \text{ K}$) [28], 6 – ударная адиабата воды [35], 7 – ударная адиабата воды [29]. Штриховые кривые – ударные адиабаты [32]: 8 – льда VII, 9 – двухфазной смеси, 10 – воды.

VII в области от 3 до 8 ГПа [46]¹. На кривой плавления в уравнении для энергии (2) учитывалась теплота плавления, определяемая из соотношения Клайперона–Клаузиса.

Давление в точке пересечения адиабаты из области жидкой фазы воды [32] с кривой плавления [36] P_2 составило 16.4 ГПа. Это значение оказалось также близким к оценкам, выполненным в [32] по интерполяционному уравнению состояния воды [48]. Пересечение расчетной адиабаты двухфазной смеси [32] с кривой плавления соответствовало давлению ~ 10 ГПа. При этом увеличение содержания льда VII в смеси с ростом давления от ~ 3 до 10 ГПа отвечало значениям α от 0 до 0.25, т.е. частичному образованию льда VII во всей области ниже кривой плавления.

На P - V диаграмме (см. рис. 5) представлены ударные адиабаты воды [29, 35] (кривые 7, 6), ее изэнтропа по данным [29], соответствующая изменению температуры от 340 до 440 К (кривая 5), изотерма воды $T_0 = 573 \text{ K}$ по данным [49], полученная с использованием данных [20] (кривая 4). Для льда VII на рис. 5 показаны изотермы $T = 300$ и 600 K [37] (кривые 1, 2) и зависимость $V(P)$ на

¹ Позже изотерма $T = 300 \text{ K}$ льда VII была определена до давления 128 ГПа в [47] и более детально до давления 20 ГПа в [37].

кривой плавления [37] (кривая 3). Штриховые кривые 8–10 являются ударными адиабатами льда VII, двухфазной смеси и воды при давлениях до 10 ГПа по данным [32]. Адиабата двухфазной смеси достаточно близка к экспериментальным данным [29] и соответствует изменению температуры от 350 до 570 К. Гипотетические расчетные ударные адиабаты льда VII и воды [32], отвечающие примерно тому же диапазону температур, отличаются от соответствующих расчетных и экспериментальных изотерм и изэнтропы воды. Для ударной адиабаты льда VII это отличие, в частности, связано с тем, что начальная плотность льда принята равной 1.52 г/см^3 , т.е. лед VII рассматривался в [32] фактически в качестве малосжимаемой добавки к воде. Тем не менее, из представленных данных следует, что на ударной адиабате воды переход в область жидкого состояния происходит при давлении, превышающем примерно 13–15 ГПа. До этого давления ударное сжатие воды в области $2.4 < P < 13\text{--}15$ ГПа может отвечать состоянию двухфазной смеси льда VII и воды с преимущественным содержанием воды.

Если основываться на предположении о релаксационности фазового превращения воды в лед VII, то образование смеси фаз при ударном сжатии частично объясняет данные о прозрачности воды за фронтом ударной волны и дисперсности образующегося льда VII [20, 23, 33, 34]. Однако ввиду принятых в [32] упрощений для уравнений состояния воды и льда VII полученные результаты следует рассматривать как достаточно приближенные. Кинетический механизм процесса образования льда VII при ударном сжатии пока не известен. Как было показано в [50], при ударном нагружении льда I кинетика фазовых переходов льдов I–VII и их плавления играет заметную роль.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Метод исследования сдвиговой вязкости вещества за фронтом ударной волны [1] был предложен академиком А.Д. Сахаровым с сотрудниками в 1957 г. [51]. Метод основан на изучении временной эволюции малых гармонических возмущений, создаваемых на фронте распространяющейся по исследуемому веществу ударной волны, с последующим сопоставлением результатов экспериментов с теоретическим расчетом. Экспериментальные исследования были выполнены во ВНИИЭФ (г. Саров) Минеевым, Олейником и другими [1, 5, 6, 52], расчетная обработка проводилась Зайделем [53], который рассмотрел влияние вязкости на развитие возмущений в плоской ударной волне.

Несколько позже Миллером и Аренсом в [54] был более детально проанализирован метод оп-

ределения вязкости, предложенный в [1], и рассмотрено влияние граничных условий и приближений, принятых в [53], на результаты экспериментального определения вязкости воды в работах [5, 6]. Решение задачи о распространении возмущений в [54], так же как и в [53], проведено в приближении ньютоновской жидкости с постоянной вязкостью, которая не зависит от скорости нагружения. Сравнение оценок вязкости воды [5, 6] на основании двух подходов [53, 54] показало незначительное различие результатов, что подтвердило обоснованность полученных в [1, 5, 6, 52] данных.

В проведенных экспериментах плоская ударная волна в исследуемом веществе – воде, помещенной в тонкостенную кювету, создавалась с помощью заряда взрывчатого вещества, в котором инициировалась плоская детонационная волна. Для задания гармонических возмущений на фронте ударной волны в воде использовался диск из парафина (с выточками в виде параллельных полостей синусоидального профиля), помещенный между зарядом и исследуемым веществом. Гармонические возмущения на ударной волне появлялись при выходе ударной волны на переднюю поверхность кюветы. Расстояние между полостями определяло длину волны возмущений на фронте ударной волны. Для того чтобы в одном опыте провести регистрацию развития возмущений в разные моменты времени, использовалась кювета в виде клина. Измерения формы фронта ударной волны после ее распространения по образцу проводились по свечению в зазоре между задней поверхностью кюветы и пластиной из прозрачного вещества (плексигласа). Свечение регистрировалось сверхскоростным фотохронографом. С помощью системы щелей, установленной на пластине в качестве светового экрана, регистрировался профиль волны в разные моменты времени, отвечающие пути распространения ударной волны по клину.

Так как ударная адиабата парафина близка к ударной адиабате воды [55, 56], специального расчета распространения возмущений с учетом слоя парафина не проводилось. В контрольных экспериментах, в которых парафин был заменен свинцом (при том же давлении ударной волны в воде), было установлено, что развитие возмущений в обоих вариантах в пределах ошибки эксперимента совпадает [5].

Измерения вязкости были проведены в диапазоне давлений от 4 до 25 ГПа, соответствующих значениям плотности воды от 1.45 до 1.98 г/см^3 [5, 6]. Повышение давления в ударной волне до 25 ГПа в [6] было достигнуто за счет использования взрывного лабораторного устройства, применяемого во ВНИИЭФ для исследования ударного сжатия вещества с разгоном стальной оболочки продукта-ми взрыва [57].

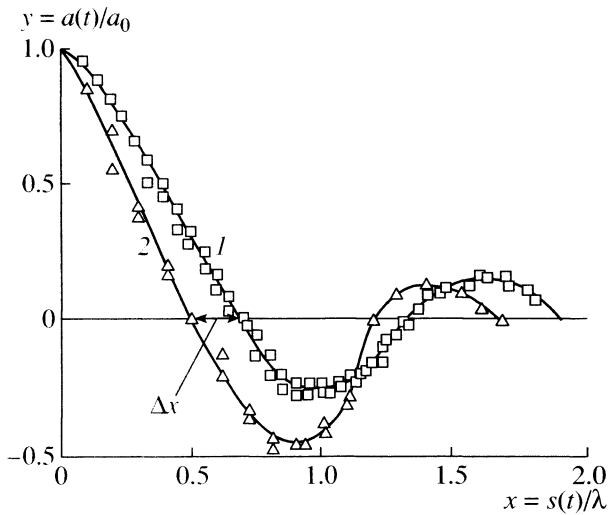


Рис. 6. Экспериментальные кривые развития приведенной амплитуды возмущений на фронте ударной волны по данным [52]: 1 – $\lambda = 2$ см, $2\pi a_0/\lambda = 0.872$; 2 – $\lambda = 1$ см, $2\pi a_0/\lambda = 0.872$; Δx – сдвиг фаз.

Искусственно задаваемые возмущения, характеризующиеся периодичностью в направлении вдоль поверхности фронта ударной волны, приводили вещество за фронтом в колебательное движение. Параметры возмущения выбирались таким образом, чтобы удовлетворить расчетному приближению [53], соответствующему пластическому течению без учета прочности и влияния малой вязкости на развитие возмущений

$$Pa_0/\lambda > \sigma_p, \quad 2\pi a_0/\lambda \ll 1. \quad (4)$$

Здесь a_0 – начальная амплитуда возмущений, λ – длина волны возмущений, P – давление в ударной волне, σ_p – динамический предел прочности [58, 59]. Постоянство течения за фронтом ударной волны для разных длин волн, необходимое для соответствия расчета и эксперимента, обеспечивалось применением достаточно больших по размерам зарядов взрывчатого вещества и сборок с кюветами.

Возмущенное течение вещества на фронте ударной волны, отвечающее высокоскоростной деформации, характеризуется соотношениями для деформации и скорости деформации [52]

$$\varepsilon = 2\pi a_0/\lambda \quad d\varepsilon/dt = 4\pi^2 a_0 D/\lambda^2. \quad (5)$$

В проведенных экспериментах деформация составила $\varepsilon = 20$ – 140% , а $d\varepsilon/dt = (1$ – $6) \times 10^5 \text{ c}^{-1}$.

Изучалось распространение ударных волн с разными длинами волн возмущений λ на фронте. В проведенных экспериментах осуществлялось полное геометрическое моделирование процесса в

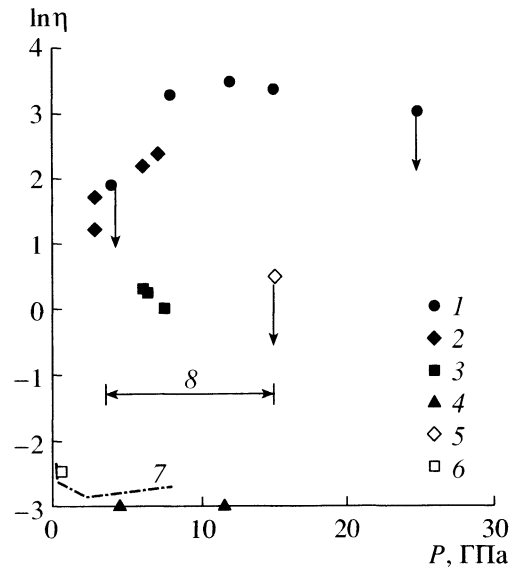


Рис. 7. Диаграмма вязкость–давление ударного сжатия воды, η в Па с: 1 – данные [5, 6], 2 – данные [7], 3 – данные [8], 4 – данные [19], 5 – данные [63], 6 – данные [64], 7 – зависимость вязкости на кривой плавления [16], 8 – область двухфазного состояния.

подобных условиях, отличающихся по масштабу, включая выполнение соотношения $2\pi a_0/\lambda = \text{const}$.

Измерения амплитуды возмущений на фронте ударной волны были проведены для длин волн $\lambda = 1$ и 2 см и начальных амплитуд $2\pi a_0/\lambda = 0.19$ – 1.13 . На рис. 6 показаны типичные экспериментальные данные по развитию возмущений на фронте ударной волны в зависимости от приведенного пути распространения ударной волны $x = s/\lambda$ (s – путь, пройденный волной) [52]. Качественно экспериментальные кривые имели тот же характер, что и в расчете [53]: амплитуда возмущений затухала, изменяя при этом несколько раз свой знак. В то же время было обнаружено, что кривые затухания амплитуды возмущений $a(x)/a_0$ для разных значений длин волн λ и параметра $2\pi a_0/\lambda$ в координатах x смещены по фазе. Расчетный анализ показал, что сдвиг фаз при полном геометрическом моделировании возможен за счет вязкостного эффекта, т.е. является определяющим для величины сдвиговой вязкости, которая может быть рассчитана по смещению $\Delta x = x_{02} - x_{01}$ пересечения зависимости a/a_0 с осью абсцисс для разных длин волн

$$\eta = \rho D \Delta x / k (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2), \quad (6)$$

где ρ – плотность за невозмущенным фронтом ударной волны, D – его волновая скорость. Параметр k находился из регрессионного анализа данных $x_{0i} = f(1/\lambda_i, a_{0i}/\lambda_i)$, представленного в [1]. Полученные кривые изменения амплитуды возмущений на фронте ударной волны от приведенного пути для воды были аналогичны зависимостям,

измеренным для металлов, исследованных ранее в [1, 52].

На рис. 7 представлены результаты определения вязкости воды в зависимости от давления на ударной адиабате. Данные измерений в области давлений 3–15 ГПа находятся ниже кривой плавления и отвечают двухфазным состояниям в температурном интервале от 400 до 700 К (см. рис. 4). При изменении давления от 4 до 8 ГПа вязкость ударно сжатой воды увеличивается более чем на порядок, что, возможно, связано с ростом доли образующегося льда VII, далее вязкость остается примерно постоянной и равной ~2–3 кПа с. При давлении $P = 25$ ГПа и температуре ударного сжатия ~1800 К [28] вязкость уменьшается и соответствует вязкости в жидком состоянии. Так как предельные возможности регистрации развития возмущений составляли $\Delta x \sim 0.02\text{--}0.03$, то вязкость, определенная при $P = 4$ и 25 ГПа, соответствовала оценкам $\eta < 0.08$ кПа с и $\eta < 1$ кПа с.

При давлении ~10 ГПа вязкость ~1 кПа с оказалась близкой к значениям, отвечающим твердотельным состояниям на адиабатах ударного сжатия [1, 52], полученным для алюминия и свинца при давлениях $P = 30\text{--}40$ ГПа. Максимальные значения вязкости металлов были приблизительно в 3–5 раз больше, чем для воды. Эти состояния соответствовали примерно тем же деформациям и скоростям деформации ϵ и $\dot{\epsilon}$. В области выше кривой плавления для металлов, так же как и для воды, были получены данные, отвечающие предельным возможностям регистрации развития возмущений и свидетельствующие о существенном уменьшении вязкости по сравнению с максимальными значениями.

ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ МЕТОДАМИ УСКОРЕНИЯ ТЕЛА И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

В серии работ [7–9] Альтшулером, Канелем, Кимом и др. был предложен метод измерения вязкости по регистрации скорости цилиндрического тела (проволочки), ускоряемого потоком за фронтом плоской ударной волны (метод ускоряющихся цилиндров) и получены данные по вязкости воды и других жидкостей. Следует отметить, что детальная проверка метода, выполненная в [8], показала, что начальная нестационарная стадия обтекания проволочки, вносящая погрешности в результаты измерений, определяется ее диаметром и база измерений скорости должна существенно превышать начальный процесс ускорения. Поэтому в условиях проведенных экспериментов диаметр металлических проволочек не должен превышать ~0.04 мм. В первых же измерениях [7] были использованы проволочные датчики примерно на порядок большего диаметра, из-за чего

авторы [8, 9] считали данные, полученные в работе [7], неточными. К тому же измерения вязкости воды [7–9] были проведены в сравнительно узком диапазоне давлений 6–7 ГПа, соответствовавшем двухфазному состоянию на ударной адиабате. Наличие мелкокристаллического льда за фронтом ударной волны, как было отмечено в [54], должно привести к изменению зависимости ускорения цилиндра от вязкости. С уменьшением диаметра проволочки до размеров, близких к размерам кристаллов льда, действие последних на нее в потоке за фронтом ударной волны уменьшается и ускорение проволочки в основном определяется вязкостью только жидкой компоненты смеси. Поэтому результаты измерений вязкости воды в этой области давлений в отличие от данных измерений, проведенных для глицерина в однофазной области [9], по-видимому, являются некорректными.

Другая группа данных по вязкости воды была получена Хаманном и Линтоном [19, 60] по измерениям примесной электропроводности Σ водных растворов электролитов при ударном сжатии. Вязкость при давлениях $P = 4.5$ и 11 ГПа была рассчитана по соотношению Вальдена ($\eta\Sigma = \text{const}$) [61], справедливость которого ставится под сомнение [6, 9] из-за различия механизмов и факторов, определяющих подвижность ионов и структурную вязкость воды при высоких давлениях и плотностях, реализующихся при ударном сжатии. Кроме того, Хаманн [19] оценил, что при давлении 11 ГПа измеренная электропроводность соответствует диссоциации 0.5% молекул воды. Измеренная в [19] электропроводность хорошо совпала с зависимостью, полученной Митчеллом и Неллисом в [27] для чистой воды². Как было отмечено в [54], такая же электропроводность отвечает и диссоциации свободной воды в двухфазной смеси вода–лед VII, однако вязкость ее за счет наличия мелкокристаллического льда должна существенно увеличиваться.

Косвенные оценки вязкости воды [63], сделанные по скорости коагуляции частиц серы в растворах тиосульфата натрия при давлении ударного сжатия $P = 15$ ГПа, дали значение $\eta \leq 3$ Па с, которое не противоречит концепции снижения вязкости в области выше кривой плавления. Однако это значение также может быть отнесено к вязкости жидкой компоненты смеси.

Ударное сжатие воды в области давлений $P < 2.4$ ГПа не изменяет ее начального агрегатного состояния, отвечающего значениям вязкости, полученным в статических измерениях. В соответствии с данными [16] вязкость воды на кривой затвердевания отвечает минимальному значению в тройной точке вода–лед VI–лед VII при давлении

² Первые измерения электропроводности ударно сжатой воды при давлении $P = 10$ ГПа были выполнены в работе [62].

2.2 ГПа (рис. 1). Измерения коэффициента отражения света от фронта ударной волны, выполненные в работе [64] при давлении 0.58 ГПа, позволили оценить вязкость на фронте: $\eta \leq 60$ мПа с. Параметры этого состояния близки к параметрам тройной точки лед V–лед VI на кривой плавления, которой соответствует вязкость $\eta = 2.2$ мПа с [16].

На рис. 7 показаны имеющиеся данные по вязкости воды при ударном сжатии [5–9, 19, 63, 64], а также на кривой плавления льда VII [16]. Большая часть данных получена в двухфазной области вода–лед VII.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный ранее анализ результатов измерения вязкости [5, 6], основанный главным образом на данных [20, 22, 35], частично совпадает с интерпретацией, представленной в данной работе и исходящей из того, что при ударном сжатии воды происходит образование льда VII. Двухфазное состояние вода–лед VII на ударной адиабате ранее допускалось в ограниченной области на кривой плавления [6]. Уточнение фазовой диаграммы воды по полученным после опубликования результатов [5, 6] экспериментальным данным и расчетным оценкам состояний на ударной адиабате [3, 16, 32, 37] и в других работах позволило дать новое объяснение имеющихся экспериментальных результатов по вязкости при ударном сжатии.

Во всей области давлений ниже кривой плавления после первого пересечения с ней ударной адиабаты, отвечающей диапазону от 4 до 15 ГПа, увеличение вязкости связано с постепенным ростом доли льда VII в двухфазной смеси. В области давлений 12–15 ГПа по данным [5, 6] вязкость воды остается высокой ($\eta \sim 2\text{--}3$ кПа с). Это подтверждается проведенной в [54] более детальной обработкой результатов измерений [5] при давлении $P = 15$ ГПа, что дало значение $\eta = 2.0$ кПа с, близкое к полученному в [5] $\eta = 2.2$ кПа с. Дальнейший рост давления ударного сжатия приводит к переходу в жидкое состояние и уменьшению вязкости.

На возможность влияния локального гетерогенного двухфазного состояния при ударном сжатии воды на результаты измерения вязкости, полученные методом ускорения проволоочного датчика, а также измерения электропроводности, по которым с помощью соотношения Вальдена проводились оценки вязкости, было указано в [54]. В этих измерениях проявлялись в основном вязкость и электропроводность жидкой компоненты двухфазного состояния вода–лед VII, что приводило к уменьшению значений вязкости, полученных в работах [7–10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахаров А.Д., Зайдель Р.М., Минеев В.Н., Олейник А.Г. Экспериментальное исследование устойчивости ударной волны и механических свойств веществ при высоких давлениях // ДАН СССР. 1964. Т. 159. № 5. С. 1019.
2. Först P., Werner F., Delgado A. The Viscosity of Water at High pressures – Especially at Subzero Degrees Centigrade // Rheol. Acta. 2000. V. 39. P. 566.
3. Nagayama K., Mori Y., Shimada K., Nakahara M. Water Shock Hugoniot Measurement up to Less than 1 GPa. In: Shock Compression of Condensed Matter-1999. Proceed. American Phys. Soc. / Ed. by Furnish M.D., Chhabildas L.C., Hixson R.S. North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publish. Comp., 2000. P. 65.
4. Altshuler L.V. Viscosity of Water and Glycerin Behind a Shock Wave Front. In: Shock Compression of Condensed Matter-1991. Proceed. American Phys. Soc. / Ed. by Schmidt D.T. et al. North-Holland, Amsterdam: Elsevier Science Publish. Comp., 1992. P. 509.
5. Минеев В.Н., Зайдель Р.М. Вязкость воды и ртути при ударном сжатии // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. № 6. С. 1633.
6. Минеев В.Н., Савинов Е.В. Связь вязкости с возможными фазовыми превращениями в ударно сжатой воде // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 4. С. 1321.
7. Альтишулер Л.В., Канель Г.И., Чекин Б.С. Новые измерения вязкости воды за фронтом ударных волн // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. № 2. С. 663.
8. Ким Г.Х. Измерения вязкости ударно-сжатой воды // ПМТФ. 1984. № 5. С. 44.
9. Альтишулер Л.В., Доронин Г.С., Ким Г.Х. Вязкость ударно-сжатых жидкостей // ПМТФ. 1986. № 6. С. 110.
10. Набатов С.С., Шунин В.М., Якушев В.В. Вязкость жидких инертных и взрывчатых веществ за фронтом ударной волны. В кн. Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1977. С. 116.
11. Bridgman P.W. The Effect of Pressure on the Viscosity of Forty-three Pure Liquids // Am. Acad. Arts. Sci. 1926. V. 61. P. 57.
12. Bett K.E., Cappi J.B. Effect of Pressure on the Viscosity of Water // Nature. 1965. V. 207. P. 620.
13. DeFrries T., Jonas J. Pressure Dependence of NMR Spin Lattice Relaxation Times and Shear Viscosity in Liquid Water in Temperature Range 15–10° C // J. Chem. Phys. 1977. V. 66. P. 896.
14. Jonas J., DeFrries T., Wilbur D.J. Molecular Motions in Compressed Liquid Water // J. Chem. Phys. 1976. V. 65. P. 582.
15. Dougherty R.C., Howard L.N. Equilibrium Structural Model of Liquid Water: Evidence from Heat Capacity, Spectra, Density, and Other Properties // J. Chem. Phys. 1998. V. 109. № 17. P. 7379.
16. Люстерник В.Е. Особенности диаграммы вязкости воды // ТВТ. 1990. Т. 28. № 4. С. 686.
17. Гиришфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961.

18. *Альтшулер Л.В.* Применение ударных волн в физике высоких давлений // УФН. 1965. Т. 85. № 2. С. 197.
19. *Hamann S.D., Linton M.* The viscosity of Water under Shock Compression // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. P. 913.
20. *Walsh J.M., Rice M.H.* Dynamic Compression of Liquids from Measurement on Strong Shock Waves // J. Chem. Phys. 1957. V. 26. № 4. P. 815.
21. *Альтшулер Л.В., Баканова А.А., Трунин Р.Ф.* Фазовые превращения при сжатии воды сильными ударными волнами // ДАН СССР. 1958. Т. 121. № 1. С. 67.
22. *Schroeder R.C., McMaster W.H.* Shock-compression Freezing and Melting of Water and Ice // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. № 6. P. 2591.
23. *Кормер С.Б., Юшко К.Б., Кришкевич Г.В.* Фазовые превращения воды в лед VII при ударном сжатии // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. № 6. С. 1640.
24. *Skidmore I.C., Morris E.* Experimental Equation of State Data for Uranium and its Interpretation in the Critical Region. In: Proceedings of a Symposium. Vienna, 1962. P. 173.
25. *Волков Л.П., Волошин Н.П., Мангасаров Р.А. и др.* Ударная сжимаемость воды при давлении ~1 Мбар // Письма ЖЭТФ. 1980. Т. 31. № 9. С. 546.
26. LASL Shock Wave Hugoniot Data / Ed. by March S.P. Berkley: Univ. California Press, 1980. 658 p.
27. *Mitchell A.C., Nellis W.J.* Equation of State and Electrical Conductivity of Water and Ammonia Shocked to the 100 GPa (1 Mbar) Pressure Range // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. № 12. P. 6273.
28. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Трунина Р.Ф. Саратов: РЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. 446 с.
29. *Баканова А.А., Зубарев В.Н., Сутулов Ю.Н., Трунин Р.Ф.* Термодинамические свойства воды при высоких давлениях и температурах // ЖЭТФ. 1975. Т. 68. № 3. С. 1099.
30. *Шарипджанов В.В., Альтшулер Л.В., Брусникин С.Е.* Аномалии ударной и изэнтропической сжимаемости воды // ФГВ. 1983. № 5. С. 149.
31. *Богданов Г.Е., Рыбаков А.П.* Аномалии ударной сжимаемости воды // ПМТФ. 1992. № 2. С. 23.
32. *Rybakov A.P., Rybakov I.A.* Polymorphism of Shocked Water // Eur. J. Mech., B/Fluids. 1995. V. 14. № 3. P. 323.
33. *Зельдоич Я.Б., Кормер С.Б., Синицын М.В., Юшко К.Б.* Исследование оптических свойств прозрачных веществ при сверхвысоких давлениях // ДАН СССР. 1961. Т. 138. № 6. С. 1333.
34. *Кормер С.Б.* Оптические исследования свойств ударно-сжатых конденсированных диэлектриков // УФН. 1968. Т. 94. № 4. С. 641.
35. *Rice M.H., Walsh J.M.* Equation of State Water to 250 kbars // J. Chem. Phys. 1957. V. 26. № 4. P. 824.
36. *Pistorius C.W.F.T., Pistorius M.C., Blakeley J.P., Admiraal L.J.* Melting Curve of Ice VII to 200 kbars // J. Chem. Phys. 1963. V. 38. № 3. P. 600.
37. *Fei Y., Mao H., Hemley R.J.* Thermal expansivity, Bulk Modulus, and Melting Curve of H₂O-ice VII to 20 GPa // J. Chem. Phys. 1993. V. 99. № 7. P. 5369.
38. *Cowpertwaite M., Shaw R.* C_v(T) Equation of State for Liquids. Calculation of the Shock Temperature of Carbon Tetrachloride, Nitromethane, and Water in 100-kbar Region // J. Chem. Phys. 1970. V. 53. № 2. P. 555.
39. *Kwai N., Inokuti Y.* High Pressure Melting of General Compounds, and with Some Physical Models // Jap. J. Appl. Phys. 1970. V. 9. № 1. P. 31.
40. *Gurtman G.A., Kirschand J.W., Hasting C.R.* Analytical Equation of State Data for Water Compressed to 300 kbars // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. № 2. P. 851.
41. *Lyzenga G.A., Ahrens T.J., Nellis W.J., Mitchell A.C.* The Temperature of Shock-compressed Water // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. № 12. P. 6282.
42. *Ree F.H.* Molecular Interaction of Dense Water at High Temperature // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. № 12. P. 8287.
43. *Жарков В.Н., Трубицын В.П.* Физика планетарных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
44. *Уббелоде А.* Плавление и кристаллическая структура. М.: Мир, 1969. 420 с.
45. *Impey R.W., Klein M.L., McDonald I.R.* Molecular Dynamics Studies of the Structure of Water at High Temperatures and Density // J. Chem. Phys. 1981. V. 74. № 1. P. 647.
46. *Olinger B., Halleck P.M.* Compression and Bonding of Ice VII and an Empirical Linear Expression for the Isothermal Compression of Solids // J. Chem. Phys. 1975. V. 62. № 1. P. 94.
47. *Hemley R.J., Jephcot A.P., Mao H.K. et al.* Static Compression of H₂O – Ice to 128 GPa (1.28 Mbar) // Nature. 1987. V. 330. № 6150. P. 737.
48. *Замышляев Б.В., Менжулин М.Г.* Интерполяционное уравнение состояния воды и водяного пара // ПМТФ. 1971. № 3. С. 113.
49. *Halbach H., Chatterjee N.D.* An Empirical Redlich-Kwong-type Equation of State for Water to 1000° C and 200 kbar // Contrib. Mineral Petrol. 1982. V. 79. № 3. P. 337.
50. *Чижов В.Е.* К исследованию динамического нагружения льда // ПМТФ. 1995. Т. 36. № 6. С. 158.
51. *Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др.* Развитие в России динамических методов исследований высоких давлений // УФН. 1999. Т. 169. № 3. С. 323.
52. *Минеев В.Н., Савинов Е.В.* Вязкость и температура плавления алюминия, свинца и хлористого натрия при ударном сжатии // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. № 3. С. 629.
53. *Зайдель Р.М.* Развитие возмущений в плоских ударных волнах // ПМТФ. 1967. № 4. С. 30.
54. *Miller G.H., Ahrens T.J.* Shock-wave Viscosity Measurement // Rev. Modern Phys. 1991. V. 63. № 4. P. 919.
55. *Альтшулер Л.В., Петрунин А.П.* Рентгенографическое исследование сжимаемости легких веществ при косом столкновении ударных волн // ЖЭТФ. 1961. Т. 31. № 6. С. 717.
56. *Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П.* Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152.
57. *Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Крупников К.К., Панов Н.В.* Взрывные лабораторные устройства для исследования сжатия веществ в ударных волнах // УФН. 1996. Т. 166. № 5. С. 575.

58. *Богач А.А., Уткин А.В.* Прочность воды при импульсном растяжении // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 4. С. 198.
59. *Rybakov A.P.* Spall in Non-dimensional Shock Waves // Intern. J. Impact Engin. 2000. V. 24. P. 1041.
60. *Hamann S.D., Linton M.* Electrical Conductivities of Aqueous Solutions of KCl, KOH and HCl, and Ionization of Water at High Shock Pressures // Trans. Faraday Soc. 1969. V. 65. № 8. P. 2186.
61. *Глестон С., Лейдер К., Эйриг Г.* Теория абсолютных скоростей реакции. М.: ИЛ, 1948.
62. *Бриш А.А., Тарасов М.С., Цукерман В.А.* Электропроводность диэлектриков в сильных ударных волнах // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. С. 22.
63. *Якушева О.Б., Якушев В.В., Дремин А.Н.* Образование частиц серы в растворах тиосульфата натрия за фронтом ударных волн. В сб.: Материалы III Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. М.: Наука, 1972. С. 544.
64. *Harris P., Presles H.N.* Reflectivity of a 5.8 kbar Shock Front in Water // J. Chem. Phys. 1981. V. 74. № 12. P. 6864.