

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК
Том 18 Выпуск 3

УДК 539.89

DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-461-468

ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ВОДЫ ПРИ
ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ И ЕГО
ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ
УДАРНЫХ ВОЛН¹

А. С. Савиных², Г. В. Гаркушин³, Г. И. Канель⁴, С. В.
Разоренов⁵ (г. Москва)

Аннотация

В экспериментах со ступенчатым сжатием воды наблюдалось ее превращение в лед VII, которое происходит из «переохлажденного» на примерно 40 К, состояния. Регистрировались как релаксация давления в результате превращения в поверхностном слое, так и дисперсия волны сжатия, распространяющейся по воде с параметрами, требуемыми для начала превращения.

Ключевые слова: ударные волны, высокие давления, вода, затвердевание.

Библиография: 14 названий.

SOLIDIFICATION OF WATER UNDER
DYNAMIC COMPRESSION AND ITS
INFLUENCE ON THE EVOLUTIONS OF
SHOCK WAVES

A. S. Savinykh, G. V. Garkushin, G. I. Kanel', S.V. Razorenov
(Moscow)

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект номер 14-50-00124).

²Савиных Андрей Сергеевич, старший научный сотрудник Института проблем химической физики РАН, savas@icp.ac.ru

³Гаркушин Геннадий Валерьевич, старший научный сотрудник Института проблем химической физики РАН, garkushin@icp.ac.ru

⁴Канель Геннадий Исаакович, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора Объединенного института высоких температур РАН, kanel@icp.ac.ru

⁵Разоренов Сергей Владимирович, заведующий лабораторией Института проблем химической физики РАН, razsv@icp.ac.ru

Abstract

The transition of water into the ice VII phase was observed in experiments with its step-like shock compression. The transition occurs from a state “overcooled” by approximately 40 K. In the experiments, we observed relaxation of pressure as a result of the transition on a surface of LiF window as well as dispersion of the compression wave which propagates through the water with the state parameters needed for beginning of the transformation.

Keywords: shock waves, high pressures, water, solidification.

Bibliography: 14 titles.

1. Введение

При существующих методах приближенных вычислений и мощностях вычислительной техники точность описания реальных физических процессов и явлений, даже в рамках таких крупных программных комплексов как Фидесис [1], самым непосредственным образом зависит от точности описания свойств среды. В частности, при анализе действия взрыва или высокоскоростного удара в воде, то есть, казалось бы, в простой ситуации, не связанной с проблемами упругопластических деформаций, встает вопрос о реальной вязкости сжатой воды, о возможном ее затвердевании при сжатии и о влиянии этих факторов на параметры и динамику ударных волн в воде. Что касается вязкости воды в условиях ударного сжатия, то в течение длительного времени сведения о ней были противоречивы. В экспериментах [2] с регистрацией возмущений поверхности ударной волны, основанных на идее Сахарова и Зайделя [3], было найдено, что вязкость ударно-сжатой воды и ртути близка к вязкости твердых тел. С другой стороны, измерения, в частности, примесной электропроводности ударно-сжатого глицерина [4] дали значения вязкости, мало отличающиеся от ее значений в нормальных условиях. Наши недавние измерения ширины ударной волны [5] дали значения вязкости глицерина, близкие к оценкам, основанным на измерении примесной электропроводности. Помимо прочего, это совпадение свидетельствует о малости вклада скорости деформации в величину коэффициента вязкости жидкостей. Эволюция ударной волны с синусоидальными возмущениями была детально проанализирована в работе [6], на основе чего твердотельные значения вязкости ударно-сжатой воды были объяснены ее превращением в лед VII при ударном сжатии. Нужно сказать, что это фазовое превращение исследуется, начиная еще с шестидесятых годов прошлого века. На рисунке 1 показана часть фазовой диаграммы воды, из которой следует, что необратимый нагрев вещества в ударной волне не допускает возможности превращения воды в лед VII при однократном ударном сжатии. Однако это превращение возможно при безударном изэнтропическом и ступенчатом ударном сжатии. В работе [7] превращение воды в лед VII при двухэтапном ударном сжатии, где давление за первой ударной волной находилось

в диапазоне от 1.8 до 3.5 ГПа, а конечное давление от 3.9 до 10 ГПа, было зафиксировано по рассеянию света, как предполагается, смесью воды с частицами льда. В дальнейшем в работах [8-11] была зафиксирована релаксация давления и подтверждена потеря гомогенности воды при ступенчатом или безударном изэнтропическом сжатии. Остается, однако, неясным, имеет ли превращение объемный характер или происходит лишь в тонком слое у поверхности окна, через которое производится его регистрация и на которой происходит нуклеация частиц льда. Использование в качестве окна кварцевого стекла стимулирует быструю нуклеацию льда VII благодаря, как предполагается, наличию гидроксильных групп на поверхности, в то время как при использовании сапфирового окна превращение требует более высокого давления или вообще не происходит. В данной работе расширен диапазон давлений при использовании окна из фтористого лития.

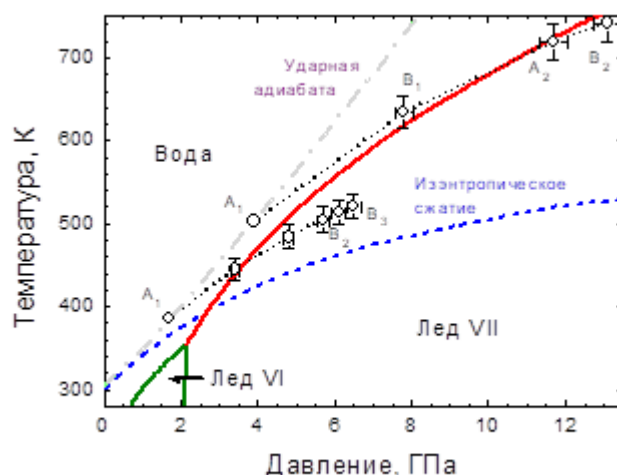


Рис. 1: Фазовая диаграмма воды в области температур выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Круглые маркеры, соединенные пунктирной линией показывают изменение состояния воды при ступенчатом сжатии в опытах 2 (нижний ряд точек) и 3.

2. Постановка экспериментов

Эксперименты проведены с дистиллированной водой при комнатной температуре. Вода заливалась в герметичную кювету, дном которой являлся металлический экран, через который в образец вводилась ударная волна, а крышкой было окно из монокристалла фтористого лития. Толщина слоя воды находилась в пределах от 0.9 мм до 1.35 мм. Экран (дно кюветы) изготавливался из алюминия, меди или молибдена. Ударная волна в экране создавалась ударом алюминиевой пластины со скоростью в диапазоне от 300 м/с до 2600 м/с. Разгон ударников до скорости 300–350 м/с осуществлялся с помощью ствольной метательной установки — «газовой пушки». Для высоко-

скоростного метания использовались взрывные устройства. В экспериментах с помощью лазерного Доплеровского измерителя скорости VISAR [12] регистрировалась история изменения скорости поверхности контакта окна с образцом $u_p(t)$ в процессе выхода на нее волн сжатия. Для отражения зондирующего лазерного излучения прибора VISAR на поверхность окна, обращенную к образцу, вакуумным напылением наносился тонкий отражающий слой алюминия. При использовавшихся параметрах оборудования временное разрешение измерений составляло примерно 1.5 нс.

3. Результаты измерений

Результаты измерений показаны на рисунках 2 и 3 в виде профилей скорости контактной поверхности воды и окна из фтористого лития как функции времени, $u(t)$. Условия опытов приведены в таблице 1.

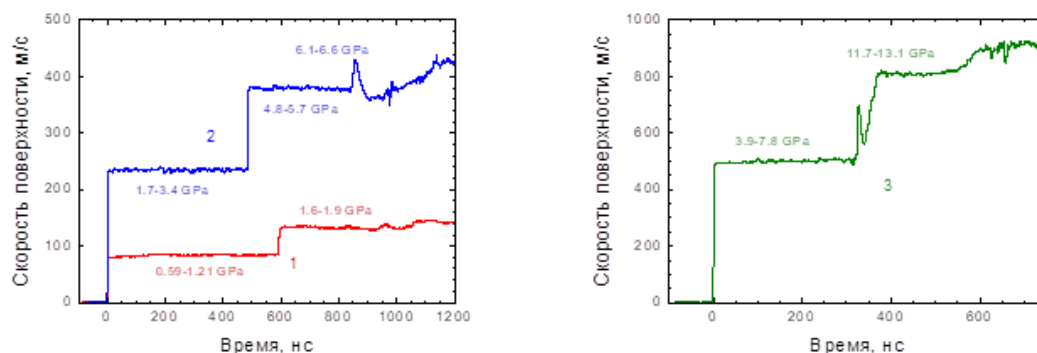


Рис. 2: Результаты опытов при скорости удара 295 м/с и 1095 м/с. Использовались экононы из алюминия и меди, соответственно. Числа указывают давление перед и после отражения соответствующей ударной волны от окна LiF.

Рис. 3: Результат опыта со скоростью удара 2600 м/с с использованием экрана из молибдена.

Таблица 1: Параметры экспериментов по ступенчатому ударному сжатию воды

Номер опыта	Скорость удара, м/с ($\pm 5\%$)	Материал экрана	Толщина слоя воды, мм
1	293	Алюминий	0.94
2	1095	Медь	1.34
3	2600	Молибден	1.28

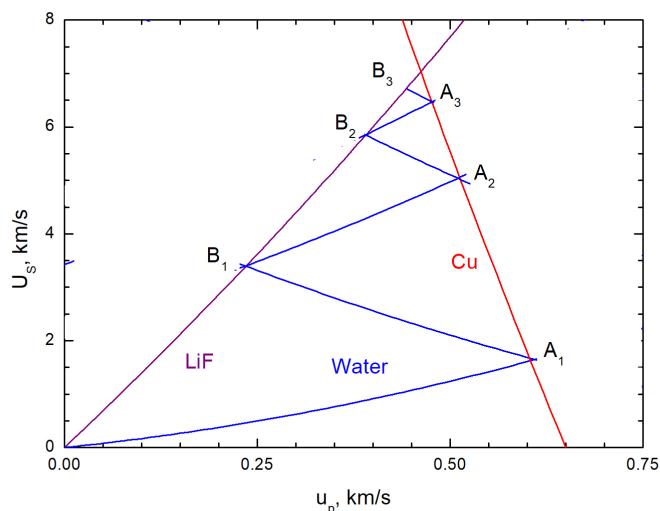


Рис. 4: Диаграмма ступенчатого ударного сжатия воды в опыте 2, показанном на рис. 2.

На рисунке 4 поясняется ступенчатое нарастание давления в воде в процессе многократных отражений ударных волн между экраном и окном. Значения массовой скорости за ударной волной регистрировались на поверхности контакта окна LiF с водой — точки B_i в то время как параметры ударных волн, подходящих к этой поверхности, соответствуют точкам A_i на ударной адиабате торможения медного экрана. Ударные адиабаты воды, медного экрана и материала окна — фтористого лития взяты из [13].

В опыте 1 не достигается давление 2.6 ГПа, соответствующее пересечению изэнтропы с линией равновесия вода-лед VII, затвердевание воды в этом опыте происходить не должно, волновой профиль особенностей не имеет. Время нарастания параметров в ударных волнах находится на пределе временного разрешения измерений, что говорит о сохранении низкой вязкости воды в процессе ступенчатого сжатия. В опыте 2 первые две ступени особенностей не имеют, а выход на поверхность окна следующей ударной волны сопровождается значительной релаксацией давления, подобной наблюдавшейся в работах [8-10]. После релаксации наблюдается постепенное восстановление давления. На рисунке 1 оценочно показан ход изменения состояния в процессе ступенчатого сжатия. Видно, что состояние на второй «ступеньке» с давлением $B_2 = 5.7$ ГПа находится на фазовой диаграмме далеко в области льда VII, однако превращение начинается лишь при увеличении давления до 6.1 или 6.5 ГПа (неопределенность связана с тем, что неясно, начинается ли превращение у экрана или у поверхности окна). Отклонение по температуре от линии межфазного равновесия, то есть переохлаждение воды перед началом превращения, составляет примерно 40 К. В опыте 3 с давлением в первой ударной волне в воде 3.9 ГПа межфазная граница вода-лед VII пере-

ходится уже на второй ступеньке. Хотя при этом состояние вещества значительно меньшее уходит от межфазной границы, чем в опыте 2, на волновом профиле четко фиксируется релаксация давления и его быстрое восстановление во второй ступеньке. Новым является то, что следующая волна сжатия, пришедшая на поверхность окна (третья ступенька), весьма размыта. Относительно большое время нарастания параметров в ней может иметь два объяснения: либо мы имеем дело с волной сжатия, распространяющейся по льду VII, имеющему вязкость много больше, чем вода, либо в этой волне происходит превращение воды в лед VII за время примерно 40-50 нс. Второе предположение подкрепляется тем обстоятельством, что давление 13.1 ГПа на второй регистрируемой ступеньке точно соответствует построениям, подобным приведенным на рис. 4, с использованием ударной адиабаты воды, то есть без учета ее превращения.

4. Заключение

Проведенные эксперименты со ступенчатым сжатием воды в области ее превращения в лед VII. Подтверждено превращение из «переохлажденного», то есть отклоняющегося от линии межфазного равновесия на примерно 40 К, состояния. Не подтверждена необходимость наличия кварцевого стекла для нуклеации превращения: эксперименты указывают на зарождение превращения у поверхности окна из монокристалла фтористого линия и на поверхности металлического экрана. Регистрировались как релаксация давления в результате превращения в поверхностном слое, так и дисперсия волны сжатия, распространяющейся по воде с параметрами, требуемыми для начала превращения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е. М., Левин В. А., Вершинин А. В. Прочностной анализ. Фидесис в руках инженера. М.: URRS, 2015 — 400 с.
2. В. Н. Минеев, Р. М. Зайдель. Вязкость воды и ртути при ударном сжатии. ЖЭТФ, 1968, Т. 54, № 6, С. 1633
3. А. Д. Сахаров, Р.М. Зайдель, В.Н. Минеев, А.Г. Олейник. Экспериментальное исследование устойчивости ударных волн и механических свойств вещества при высоких давлениях и температурах // ДАН СССР. - 1964. - Т.159, N 5. - С.1019-1022.
4. А. Н. Дремин, Д.И. Кузнецов, В.М. Шунин, В.В. Якушев. Вязкость и электропроводность глицерина при высоких динамических и статических давлениях. ЖФХ, 1980, Т. 54, вып. 1., С. 135-139

5. Г. И. Канель, А. С. Савиных, Г. В. Гаркушин, С. В. Разоренов. Оценка вязкости глицерина по ширине слабой ударной волны. *Теплофизика высоких температур*, т. 55, № 3, сс. 380–385.
6. G. H. Miller and T. J. Ahrens. Shock-wave viscosity measurement. *Reviews of Modern Physics*, 1991, V. 63, No. 4, pp. 919-947
7. С. Б. Кормер, К.Б. Юшко, Г.В. Кришкевич. Фазовое превращение воды в лед VII при ударном сжатии. *ЖЭТФ*, 1968, Т. 54, № 6, С. 1640
8. D. H. Dolan, Y.M. Gupta. Time-dependent freezing of water under dynamic compression. *Chemical Physics Letters* 374 (2003) 608–612
9. D. H. Dolan, J. N. Johnson, and Y. M. Gupta. Nanosecond freezing of water under multiple shock wave compression: Continuum modeling and wave profile measurements. *J. Chem. Phys.* 123, 064702 (2005)
10. D. H. Dolan, M. D. Knudson, C. A. Hall and C. Deeney. A metastable limit for compressed liquid water. *Nature Physics* 2007, V. 3 pp. 339-342
11. Stafford S.J.P., Chapman D.J., Bland S.N., and Eakins D.E. Observations on the nucleation of ice VII in compressed water. // *AIP Conf. Proc.* 2017. V. 1793, P. 130005.
12. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е.. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
13. L.M. Barker and R.E. Hollenbach. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *J. Appl. Phys.* 43, 4669 (1972)
14. S. P. Marsh (Ed.), *LASL Shock Hugoniot Data*, (Univ. California Press, Berkeley, 1980)

REFERENCES

1. Morozov, EM, Levin, VA & Vershinin, AV 2015, *Prochnostnoy analiz. Fidesis v rukakh inginera [The Strength analysis. Fidesys in the hands of an engineer]*, URSS, Moscow.
2. Mineev, V.N. & Zaidel', R.M. 1968, "The Viscosity of Water and Mercury Under Shock Loading", *JETP*, vol. 27, no 6, pp. 874-878.
3. Sakharov, A.D., Zaidel', R.M., Mineev, V.N. & Ole'lnik A.G. 1964, "Experimental Investigation of the Stability of Shock Waves and the Mechanical Properties of Matter at High Pressures and Temperatures" *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, vol.159, no. 5, pp.1019-1022.

4. Dremin, A.N., Kuznetsov, D.I., Shunin, V.M. & Yakushev V.V. 1980, “Viscosity and Electric-Conductivity of Glycerol at High Dynamic and Static Pressures” *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, vol. 54, no. 1, pp. 135-139.
5. Kanel', G.I., Savinykh, A.S., Garkushin, G.V. & Razorenov, S.V. 2017, “Evaluation of Glycerol Viscosity through the Width of a Weak Shock Wave”, *High Temperature*, vol. 55, no. 3, pp. 365–369. <https://doi.org/10.1134/S0018151X17030105>
6. Miller, G.H. & Ahrens, T.J. 1991, “Shock-Wave Viscosity Measurement”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 63, no. 4, pp. 919-947. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.63.919>
7. Kormer, S.B., Yushko, K.B. & Krishkevich, G.V. 1968, “Phase Transformation of Water into Ice VII by Shock Compression”, *JETP*, vol. 27, no 6, pp. 879-881.
8. Dolan, D.H. & Gupta, Y.M. 2003, “Time-Dependent Freezing of Water Under Dynamic Compression”, *Chem. Phys. Letters*, vol. 374, pp. 608–612. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)00777-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)00777-2)
9. Dolan, D.H., Johnson, J.N., & Gupta, Y.M. 2005 “Nanosecond Freezing of Water Under Multiple Shock Wave Compression: Continuum Modeling and Wave Profile Measurements”, *J. Chem. Phys*, vol. 123, P. 064702. <https://doi.org/10.1063/1.1993556>
10. Dolan, D.H., Knudson, M.D., Hall, C.A. & Deeney, C. 2007, “A Metastable Limit for Compressed Liquid Water”, *Nature Physics*, vol. 3, pp. 339-342. doi:10.1038/nphys562.
11. Stafford, S.J.P., Chapman, D.J., Bland, S.N., & Eakins, D.E. “Observations on the Nucleation of Ice VII in Compressed Water”, *AIP Conf. Proc.* 2017. vol. 1793, P. 130005. <https://doi.org/10.1063/1.4971716>
12. Kanel, GI, Razorenov, SV, Utkin, AV & Fortov, VE 1996, *Udarno-Volnovye Yavleniya V Kondensirovannyh Sredah [Shock Wave Phenomena in Condensed Media]*, Yanus-K, Moscow.
13. Barker, L.M. & Hollenbach, R.E. 1972, “Laser Interferometer for Measuring High Velocities of any Reflecting Surface”, *J. Appl. Phys*, vol. 43, P. 4669. <https://doi.org/10.1063/1.1660986>
14. Marsh SP (Ed.) 1980, *LASL Shock Hugoniot Data*. Univ. California Press. Berkeley.

Получено 22.05.2017

принято в печать 14.09.2017