

03

Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения

© И.А. Банникова, С.В. Уваров, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь
E-mail: malgacheva@icmm.ru

Поступило в Редакцию 22 апреля 2014 г.

Исследованы неньютоновские свойства воды в условиях ударно-волнового (электровзрывного) эксперимента. Получены степенные зависимости скорости деформации от амплитуды напряжений на фронте волны и откольной прочности от скорости деформации при разгрузке.

По-видимому, Рейнольдс впервые обратил внимание на неньютоновское поведение простых жидкостей при сдвиговом течении [1], которое связывалось с неравновесными (вязкоупругими) эффектами сдвиговой и объемной (локальное изменение плотности) дисторсии, обусловленными структурой жидкости. Молекулярно-динамическое моделирование [2] механизмов переноса в простых жидкостях подтвердило результаты [3] о существовании длинновременных составляющих релаксационного спектра. Это соответствует данным по измерению сдвиговых модулей и релаксационных спектров при наложении осцилляций на сдвиговое течение простых жидкостей [4], когда эффекты сдвиговой упругости наблюдались при частотах 10^5 Hz. Присутствие длинновременной части спектра с временами $\tau \sim 10^{-5}$ s связывается с согласованным перемещением и переориентацией групп молекул, что сопряжено с существенно большими характерными временами. Это предположение косвенно подтверждается в [5] при изучении релаксационных явлений в жидкостях на фронте ударных волн, когда для скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 10^5 \text{ s}^{-1}$ значения вязкости ряда жидкостей оказались аномально высокими и близкими к таковым для твердых тел.

Целью настоящего экспериментального исследования является изучение закономерностей нарастания волновых фронтов в жидкости и возможных проявлений автомодельности, аналогичной степенной

универсальности нарастания пластического волнового фронта в твердых телах [6,7].

Волна сжатия в дистиллированной воде инициировалась электро-взрывом медного проводника [8] диаметром 0.1 mm и длиной 15 mm. Экспериментальная установка электровзрыва (ЭВ) состоит из цилиндрической взрывной камеры диаметром 0.24 m и высотой 0.085 m, источника высокого напряжения 1–16 kV, батареи конденсаторов с емкостью, варьируемой в диапазоне 0.044–0.44 μ F, и разрядника. Плотность тока достигала значений 10^{11} – 10^{12} A/m².

Для измерения массовой скорости в жидкости на различных расстояниях от взрываемого проводника был разработан и изготовлен измерительный зонд, присоединяемый к оптоволоконному входу системы измерения. Зонд представляет собой трубку из ПВХ диаметром 10 mm с помещенной внутрь собирающей линзой (рис. 1, *a*). На открытый конец трубки натягивалась металлизированная пленка из полиэтилентерефталата или неметаллизированная полиэтиленовая. Измерение скорости проводилось с использованием оптоволоконной системы VISAR Martin Froeschner & Associates Optoelectronics FDVI Mark IV-3000. Зонд помещался в объем жидкости на заданном расстоянии X от места ЭВ проводника (рис. 1, *a*), оптическая ось зонда была направлена на центр проводника. Благодаря конструктивным особенностям зонд не разрушался при проведении эксперимента. На получаемом профиле скорости наблюдалось 2 импульса (рис. 1, *b*). Второй импульс (II) был подобен профилям скорости, полученным в [9] для плоского ударно-волнового нагружения жидкости. Первый импульс (I) частично повторял изменение тока, протекающего через проводник (рис. 2, *a*), и его природа, скорее всего, связана с воздействием электромагнитного импульса на воду или материалы зонда. В нескольких экспериментах металлизированная фольга была заменена на неметаллизированную, но это не привело к исчезновению первого импульса. Наличие 2 импульсов позволило измерить скорость ударной волны D , соответствующей обратной величине тангенса угла наклона прямой $\Delta t(X)$ (рис. 2, *b*). Установлено, что скорость волны сжатия $D \sim 1470$ m/s близка скорости звука в воде и отличается от нее на 9%.

На рис. 3, *a* приведены профили скорости свободной поверхности, экспериментально полученные на разных расстояниях от места инициирования взрыва проводника. По ним находились значения откольной прочности P_s (разница давлений в точках II и III), значения амплитуды

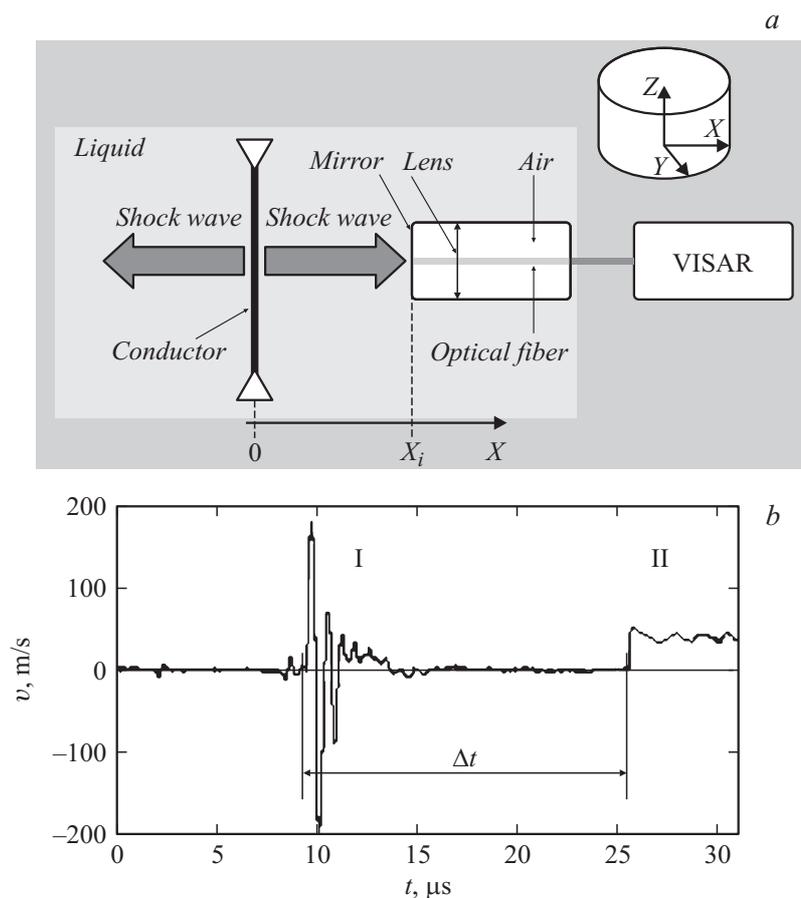


Рис. 1. *a* — схема эксперимента по измерению скорости системой VISAR; *b* — профиль скорости, зарегистрированный системой VISAR.

импульса сжатия P_o (в точке II), вычислялись скорости деформации $\dot{\epsilon}^*$ и $\dot{\epsilon}$ соответственно на фронте (I–II) и в разгрузочной области (II–III). На профилях 1 и 2 (рис. 3, *a*) наблюдается увеличение амплитуды отскольного импульса до значения, превышающего максимум скорости свободной поверхности пленки. В работе [10], где представлены

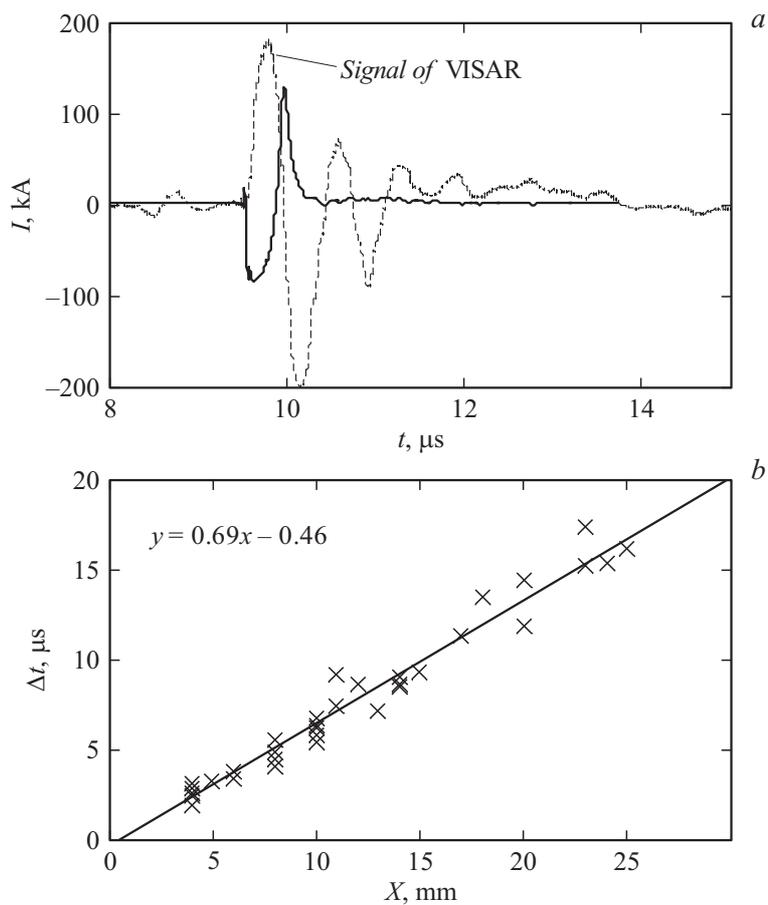


Рис. 2. *a* — сопоставление профиля силы тока, протекающего по проводнику, с первым импульсом VISAR; *b* — зависимость времени прохождения волны Δt (рис. 1, *a*) от расстояния X .

подобные профили скорости, это объясняется особенностями распространения волн сжатия и растяжения в пористой среде вследствие кавитации при формировании откола. На рис. 3, *b* приведены значения амплитуд входного импульса P_0 , полученные на разных расстояниях от

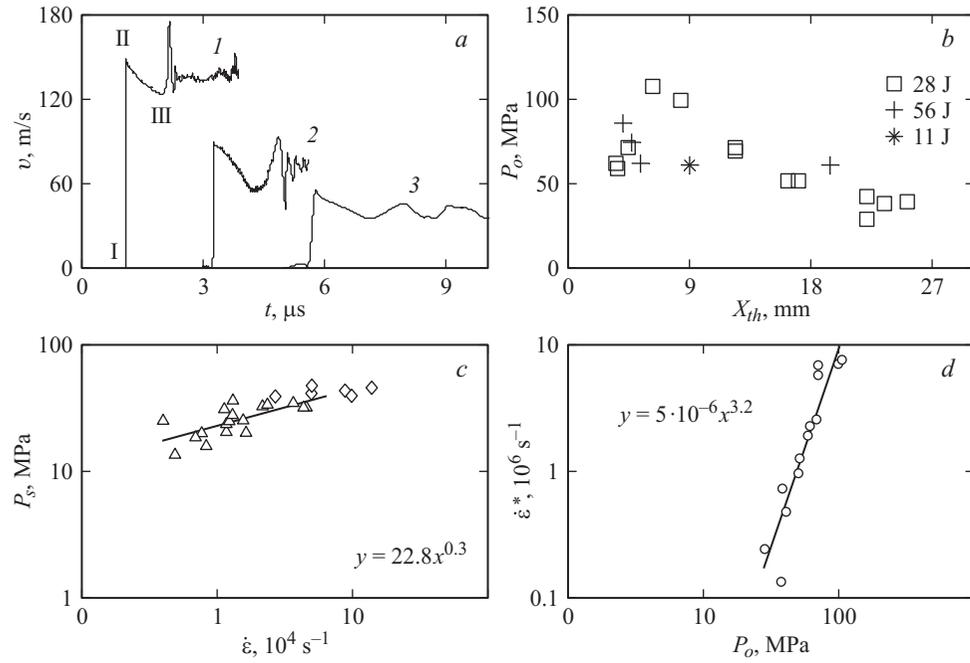


Рис. 3. *a* — профили скорости свободной поверхности, полученные на разных расстояниях X от места инициирования взрыва: 1 — 8; 2 — 14; 3 — 25 mm (энергия на конденсаторной батарее ~ 28 J); *b* — амплитуда импульса сжатия на разных расстояниях $X_{th} = \Delta t D$ от места инициирования взрыва; *c* — откольная прочность в условиях ударно-волнового нагружения: Δ — получены в данной работе, \diamond — принадлежат авторам [9]; оси логарифмические; *d* — скорость деформации на пластическом фронте в зависимости от амплитуды импульса сжатия; оси логарифмические.

места инициирования взрыва. На вставке (рис. 3, *b*) показаны значения энергии, запасенной в батарее конденсаторов.

На диаграмму (рис. 3, *c*) нанесены результаты найденной откольной прочности P_s . Получено, что значения откольной прочности P_s пропорциональны скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в степени ~ 0.3 . На рис. 3, *d* в логарифмических осях представлена зависимость скорости деформации на фронте волны сжатия $\dot{\epsilon}^*$ от амплитуды импульса сжатия P_o . Установлено, что зависимость $\dot{\epsilon}^*(P_o)$ имеет степенной вид с показателем, равным 3.2, что оказалось близким к значениям, установленным для металлов, и указывает на автомодельный характер профиля фронта волны [6,11,12]. Если следовать допущениям, принятым в [6], то можно оценить показатель степени в зависимости вязкости от скорости сдвиговой деформации. Он оказывается равным (-0.375) в нашем случае. Это показывает, что вода в данном случае ведет себя как псевдопластическая неньютоновская жидкость.

Показатель степени в зависимости вязкости от скорости сдвиговой деформации, полученный в данной работе, отличается от $1/2$, который определен в работе [2], но близок к значению, установленному для твердых тел $(-1/2)$ [6]. На основании этого можно сделать предположение о том, что в исследуемом диапазоне скоростей деформации может реализоваться случай неньютоновского поведения, с которым связаны механизмы пластического течения, определяющие автомодельные закономерности нарастания пластического волнового фронта в твердых телах [11,12].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 13-08-96025 р_урал_а, № 14-01-96012 р_урал_а и № 14-01-00842-А).

Список литературы

- [1] *Evans Denis J., Hanley Howard J.M., Hess Siegfried* // *Physics Today*. 1984. V. 37. N 1. P. 26–33; doi: 10.1063/1.2916042.
- [2] *Kawasaki K., Gunton J.D.* // *Phys. Rev. A*. 1973. V. 8. N 4. P. 2048–2064.
- [3] *Yamada T., Kawasaki K.* // *Progr. Theor. Phys*. 1967. V. 38. P. 1031.
- [4] *Derjaguin B.V., Bazaron U.B., Zandanova K.T., Budaev O.R.* // *Polymer*. 1989. V. 30. P. 97–103.
- [5] *Минеев В.Н., Зайдель Р.М.* // *ЖЭТФ*. 1968. Т. 54. № 6. С. 1633–1439.
- [6] *Swegle J.W., Grady D.E.* // *J. Appl. Phys*. 1985. V. 58. N 2. P. 692–701.
- [7] *Barker L.M.* // *N. Y.: Gordon and Breach*, 1968. P. 482–491.

- [8] *Банникова И.А., Наймарк О.Б., Уваров С.В.* // Труды XV Междунар. конф. „Харитоновские тематические научные чтения“. Саров, 2013. С. 745–754.
- [9] *Богач А.А., Уткин А.В.* // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 4. С. 198–205.
- [10] *Уткин А.В.* // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 1. С. 185–193.
- [11] *Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.* // Физическая мезомеханика. Т. 7. Спец. вып. Ч. I. Томск, 2004. С. 305–308.
- [12] *Наймарк О.Б.* // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. № 9. С. 751–757.