

03

## Импульсное сжатие и растяжение додекана и минеральных масел при ударно-волновом воздействии

© И.А. Банникова,<sup>1</sup> А.Н. Зубарева,<sup>2</sup> А.В. Уткин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт механики сплошных сред,  
614013 Пермь, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем химической физики РАН,  
142432 Черноголовка, Россия  
e-mail: zan@icp.ac.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2017 г.)

Проведены экспериментальные исследования додекана, вакуумного и трансформаторного масел при импульсном сжатии и растяжении в условиях ударно-волнового воздействия. Регистрация волновых профилей осуществлялась лазерным интерферометром VISAR. Определены ударные адиабаты, зависимость скорости звука от давления и максимальные отрицательные давления, реализующиеся в исследованных жидкостях. Показано, что величина отрицательных давлений не зависит от скорости деформации для масел и является сильной функцией амплитуды импульса сжатия для додекана.

DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45718.2446

### Введение

Импульсное сжатие и растяжение жидкостей при ударно-волновом воздействии позволяет реализовать термодинамические состояния, которые невозможно получить другими методами. В частности, это эффективный способ создания в жидкостях отрицательных давлений, максимальные амплитудные значения которых определяются нарушением сплошности вещества в результате возникновения пор (разрушение). Согласно теоретическим оценкам, жидкости в случае гомогенного зародышеобразования пор способны выдерживать растягивающие напряжения порядка 1 ГПа [1–3]. На практике, однако, реализуются значительно меньшие величины, зависящие, в общем случае, как от условий растяжения (температура, скорость деформации), так и от физических свойств конкретной жидкости (вязкость, поверхностное натяжение).

В настоящей работе проведены эксперименты по исследованию особенностей поведения додекана и минеральных масел при импульсном сжатии и растяжении в условиях ударно-волнового воздействия. Для создания отрицательных давлений используется метод откола, т. е. отражение импульсов сжатия от свободной поверхности исследуемого вещества [4]. Импульсное растяжение в аналогичных условиях использовалось ранее для исследования разрушения глицерина [5–9], воды [10–15], этиленгликоля [11], этилового спирта [12,16], гексана [8] и ртути [17]. Большинство полученных экспериментальных данных находит объяснение в рамках гомогенной теории образования пор. В то же время целый ряд вопросов, например влияние вязкости на откольную прочность, остается не решенным. Этим объясняется выбор для исследования жидкостей, вязкость которых различается на несколько порядков.

### Схема экспериментов

Экспериментально исследовались ударно-волновая сжимаемость и разрушение додекана, вакуумного масла ВМ-1С и трансформаторного масла ТМ-1. Додекан является предельным углеводородом  $C_{12}H_{26}$ , тогда как оба минеральных масла представляют собой смесь различных углеводородов. Основные свойства жидкостей при нормальных условиях: плотность  $\rho_0$ , скорость звука  $c_0$  и вязкость  $\eta$  — приведены в табл. 1. Измерение  $c_0$  осуществлялось с помощью ультразвукового датчика Ultrasonic Thickness Gauge A1208, динамическая вязкость — на вискозиметре Brookfield IV Pro.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Ударные волны в образце 3 создавались алюминиевыми ударниками 1 толщиной 0.4–10 мм, которые разгонялись продуктами взрыва до скорости  $W_i = 0.65–5$  км/с. Нагружение образцов осуществлялось через экран 2. Параметры ударной волны определялись посредством регистрации скорости на границе с водяным окном 6 лазерным интерферометром VISAR. Для отражения зондирующего излучения на границе помещалась алюминиевая фольга 5 толщиной 7  $\mu$ м, которая крепилась на экране с отверстием 4. Для измерения

**Таблица 1.** Плотность  $\rho_0$ , скорость звука  $c_0$  и динамическая вязкость  $\eta$  (20 С) исследованных жидкостей

Параметры			
Жидкость	$\rho_0, \text{kg/m}^3$	$c_0, \text{m/s}$	$\eta, \text{P} \cdot \text{s}$
Додекан	749	1301	0.0015
ТМ-1	895	1445	0.188
ВМ-1С	863	1392	0.176

**Таблица 2.** Параметры экспериментальных сборок и данные экспериментов для додекана

№	Толщина образца, mm	Материал и толщина экрана, mm	Толщина ударника, mm	$W_i$ , km/s	$D$ , km/s	$u$ , km/s
1	4.1	Cu, 2.0	2	$0.67 \pm 0.02$	$2.25 \pm 0.05$	$0.36 \pm 0.02$
2	8.1	Cu, 5.5	7	$1.13 \pm 0.02$	$2.70 \pm 0.05$	$0.65 \pm 0.02$
3	8.1	Al, 4.0	7	$1.13 \pm 0.02$	$3.37 \pm 0.05$	$0.97 \pm 0.03$
4	8.1	Cu, 5.5	10	$2.5 \pm 0.02$	$4.11 \pm 0.05$	$1.44 \pm 0.04$
5	8.1	Al, 4.0	10	$2.5 \pm 0.02$	$4.82 \pm 0.05$	$2.04 \pm 0.04$

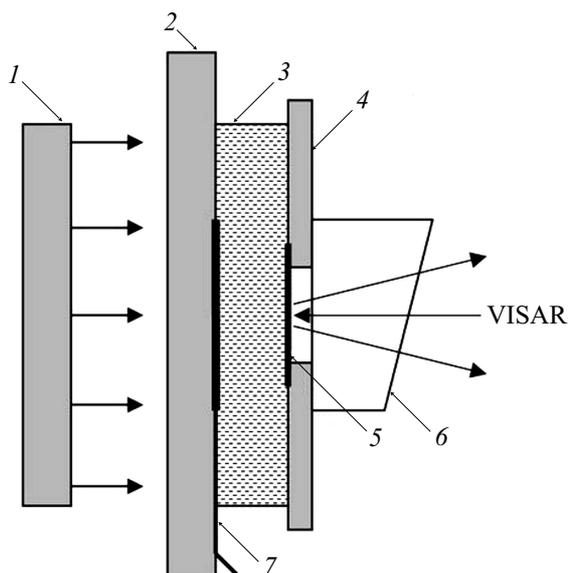
**Таблица 3.** Параметры экспериментальных сборок и данные экспериментов для вакуумного масла VM-1C

№	Толщина образца, mm	Материал толщина экрана, mm	Толщина ударника, mm	$W_i$ , km/s	$D$ , km/s	$u$ , km/s
1	4	Cu, 2	2	$0.67 \pm 0.02$	$2.42 \pm 0.05$	$0.380 \pm 0.02$
2	8	Cu, 5.5	7	$1.13 \pm 0.02$	$2.99 \pm 0.05$	$0.64 \pm 0.02$
3	8	Al, 4	7	$1.13 \pm 0.02$	$3.56 \pm 0.05$	$0.94 \pm 0.03$
4	8	Cu, 5.5	10	$2.5 \pm 0.02$	$4.25 \pm 0.05$	$1.42 \pm 0.04$
5	8	Al, 4	10	$2.5 \pm 0.02$	$4.98 \pm 0.05$	$1.98 \pm 0.04$

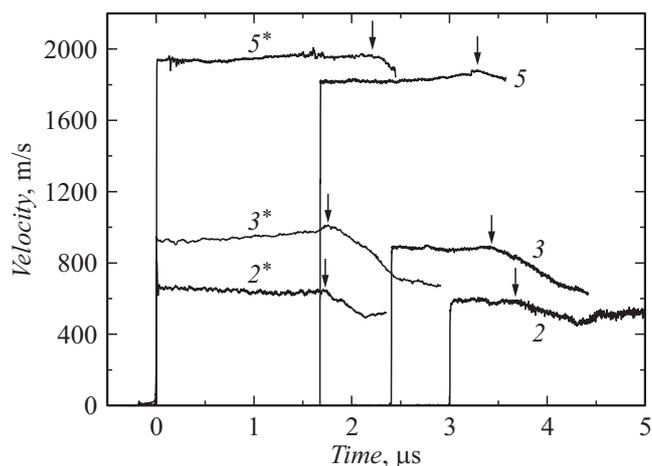
скорости ударной волны  $D$  на границе с экраном 2 помещался поляризационный датчик 7, который фиксировал момент входа волны в образец. Момент ее выхода на границу с водяным окном определялся по сигналу интерферометра.

### Ударные адиабаты жидкостей

Параметры экспериментальных сборок и результаты исследования ударной сжимаемости жидкостей приве-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки по исследованию ударно-волновых и прочностных свойств жидкостей: 1 — ударник, 2 — экран, 3 — образец, 4 — экран с отверстием, 5 — Al фольга, 6 — водяное окно, 7 — датчик.



**Рис. 2.** Профили скорости в додекане.

дены в табл. 2,3 и на рис. 2–6. В таблицах указаны измеренные значения  $D$  и массовой скорости  $u$ . На рис. 2 показаны типичные профили массовой скорости для додекана. Цифры соответствуют номерам экспериментов в табл. 2. Для каждого опыта представлены два профиля скорости: измеренный на границе с водяным окном и входящий в образец (регистрировался в отдельном эксперименте), который обозначен той же цифрой со звездочкой. Входящий импульс регистрировался на границе экрана 2 с водой 6 (рис. 1) и незначительное превышение его амплитуды по сравнению со значением на границе образец/вода связано с тем, что сжимаемость додекана выше, чем у воды. Видно, что после ударного скачка скорость во входящем импульсе практически постоянна до времени прихода волны разгрузки со сто-

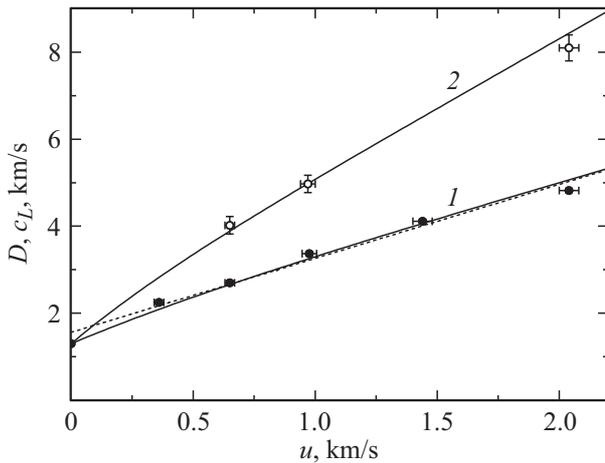


Рис. 3. Ударная адиабата (1) и лагранжева скорость звука (2) для додекана.

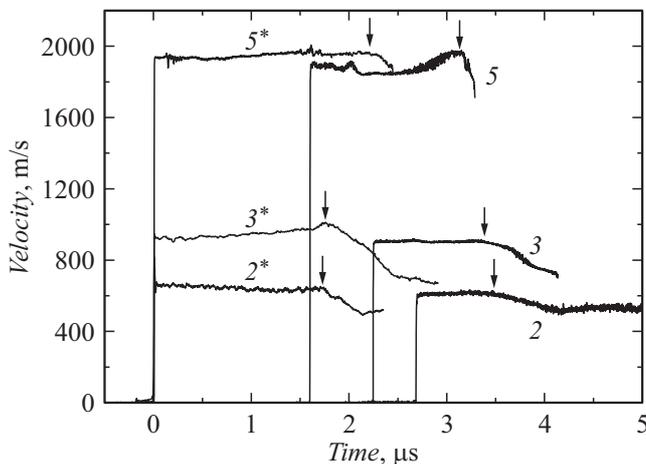


Рис. 4. Профили скорости для вакуумного масла VM-1C. Цифровые обозначения соответствуют табл. 3.

роны ударника, обозначенного вертикальной стрелкой. К моменту выхода импульса на границу с водяным окном длительность „полки“ скорости сокращается. На рис. 2 приведены только те результаты опытов, в которых время регистрации было достаточно большим для того, чтобы зафиксировать приход волны разгрузки.

Измеренные значения скорости ударной волны в образце  $D$  и скорости ударника  $W_i$  позволяют определить массовую скорость  $u$  и давление  $P$ . Регистрация скорости на границе с окном [4] (рис. 2) дает дополнительную возможность независимой оценки параметров на ударной адиабате, что повышает точность и достоверность результатов. Кроме того, экспериментальные данные, в том случае, когда удается зарегистрировать волну разгрузки, позволяют определить зависимость скорости звука  $c$  от давления. Соответствующий анализ был выполнен методом характеристик [18] в предположении, что различие сжимаемостей воды и додекана не приводит к заметному искажению характеристик при

взаимодействии падающей волны разгрузки с ударной волной, отраженной от границы додекан/вода. Точность определения скорости звука заметно хуже точности определения ударной адиабаты и, как правило, погрешность не превышает 10%.

Ударная адиабата додекана в координатах  $D-u$  приведена на рис. 3. Темными точками представлены экспериментальные данные. Пунктирная линия соответствует обобщенной ударной адиабате для органических жидкостей:  $D = 1.2c_0 + 1.7u$ , km/s [19]. Сплошная линия 1 также представляет собой обобщенную ударную адиабату для жидкостей, которая учитывает стремление  $D$  к  $c_0$  при  $u \rightarrow 0$ :

$$D = 1.37c_0 + 1.62u - 0.37c_0 \exp(-2u/c_0), \text{ km/s [20].}$$

Видно, что результаты экспериментов хорошо согласуются с обеими аппроксимациями.

Светлыми точками на рис. 3 приведены результаты расчета лагранжевой скорости звука  $c_L$  на основании полученных экспериментальных данных, которая связана с эйлеровой скоростью звука  $c$  соотношением:  $\rho_0 c_L = \rho c$  [4]. Следует отметить хорошее соответствие  $c_L$  с зависимостью (2), рассчитанной в приближении:  $\rho_0 c_L = dP/du$  [4] с использованием обобщенной ударной адиабаты [20].

Аналогичные эксперименты выполнены для вакуумного масла VM-1C и результаты их обработки представлены в табл. 3 и на рис. 4, 5. На рис. 4, как и для додекана (см. рис. 2), приведены только те профили скорости, для которых фиксируется приход волны разгрузки со стороны ударника. Входящие волновые профили такие же, как и в опытах с додеканом. Цифровые обозначения соответствуют табл. 3.

Ударная адиабата и лагранжева скорость звука для вакуумного масла VM-1C приведены на рис. 5. В отличие от додекана обобщенная ударная адиабата для жидкостей (пунктирная линия) [19] в данном случае заметно хуже описывает экспериментальные точки. Хорошее согласие достигается при использовании зависимости [20], но при этом требуется заметная корректировка констант по сравнению со значениями, предложенными авторами [20] для обобщенной ударной адиабаты:

$$D = 1.627c_0 + 1.4u - 0.62c_0 \exp(-3.5u/c_0), \text{ km/s}$$

(сплошная линия 1 на рис. 5).

С использованием этой ударной адиабаты построена зависимость лагранжевой скорости звука от  $u$  (2), которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ударная сжимаемость трансформаторного масла исследовалась в [21] с использованием той же методики, что и в настоящей работе. Полученная авторами [21] ударная адиабата, дополненная экспериментальными данными при высоком ( $u = 3.7$  km/s) и низком (0.37 km/s) значениях массовой скорости, приведена на рис. 6 темными точками. Светлыми точками обозначена

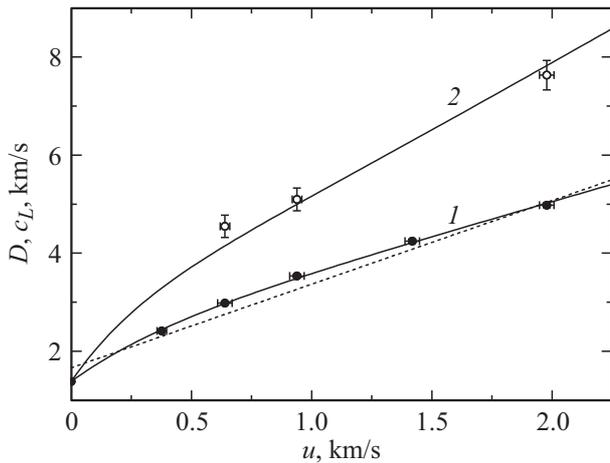


Рис. 5. Ударная адиабата (1) и лагранжева скорость звука (2) для вакуумного масла ВМ-1С.

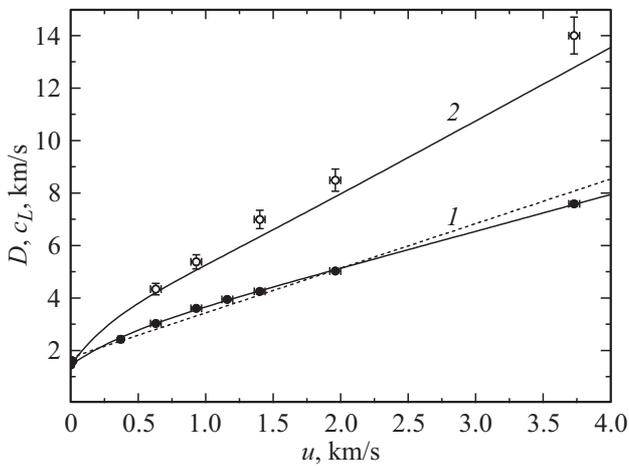


Рис. 6. Ударная адиабата (1) и лагранжева скорость звука (2) для трансформаторного масла ТМ-1.

лагранжева скорость звука, полученная в результате обработки экспериментальных профилей скорости.

Как и для вакуумного масла, обобщенная ударная адиабата для жидкостей (пунктирная линия) [19] в данном случае неудовлетворительно описывает экспериментальные точки. В то же время хорошее согласие достигается при использовании зависимости, предложенной выше для вакуумного масла (сплошная линия 1 на рис. 6). Тем не менее построенная с использованием этой ударной адиабаты зависимость лагранжевой скорости звука от  $u$  (сплошная линия 2) дает заниженные значения  $c_L$ .

### Импульсное растяжение жидкостей

Отрицательные давления в исследуемых жидкостях создавались при отражении импульсов сжатия от свободной поверхности исследуемого вещества. Этот метод широко используется для изучения откольной прочности конденсированных сред [4,9]. Схема экспериментов ана-

логична приведенной на рис. 1, но водяное окно (6) отсутствовало и интерферометром регистрировалась скорость свободной поверхности.

Параметры сборок в экспериментах с додеканом приведены в табл. 4. Во всех опытах, кроме (6), ударные волны создавались алюминиевыми ударниками толщиной 0.4 мм. В опыте (6) ударная волна формировалась при непосредственном воздействии плосковолнового взрывного генератора на экран. В табл. 4 представлены также следующие результаты экспериментов:  $P_0 = \rho_0 Du$  — максимальное давление в импульсе сжатия перед выходом на свободную поверхность;  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации в разгрузочной части импульса;  $P_s$  — максимальное отрицательное давление (откольная прочность). Соответствующие профили скорости свободной поверхности показаны на рис. 7.

Выход на свободную поверхность ударной волны вызывает скачкообразное увеличение скорости поверх-

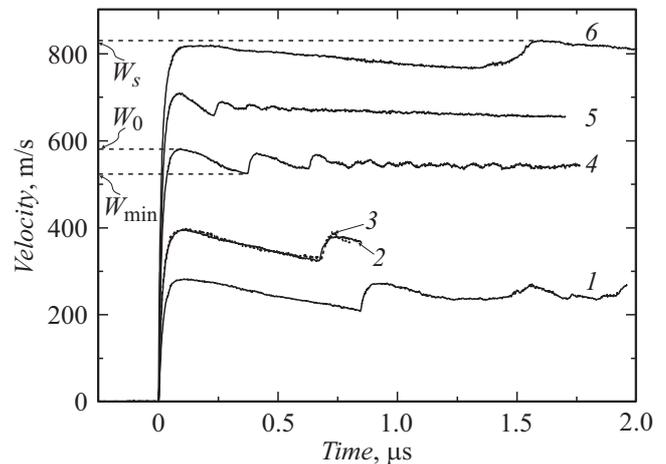


Рис. 7. Профили скорости свободной поверхности для додекана. Цифровые обозначения соответствуют табл. 4.

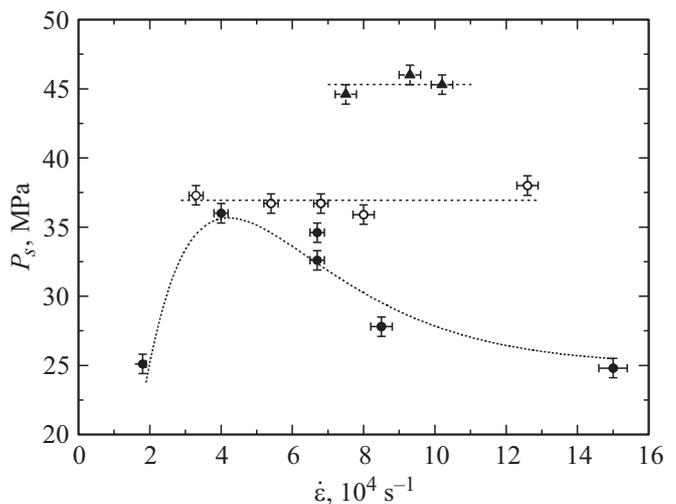


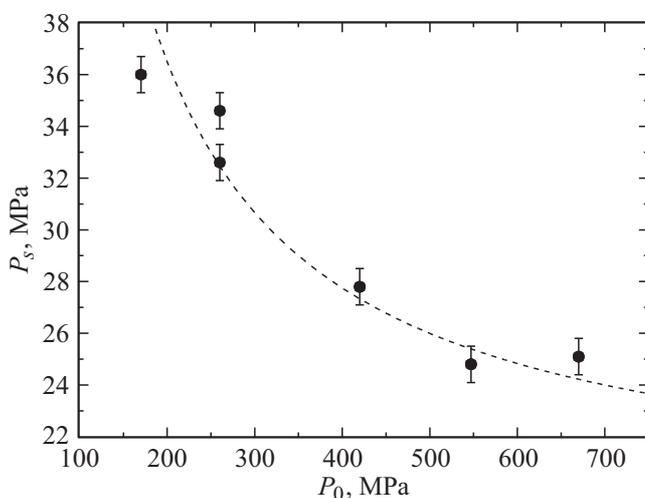
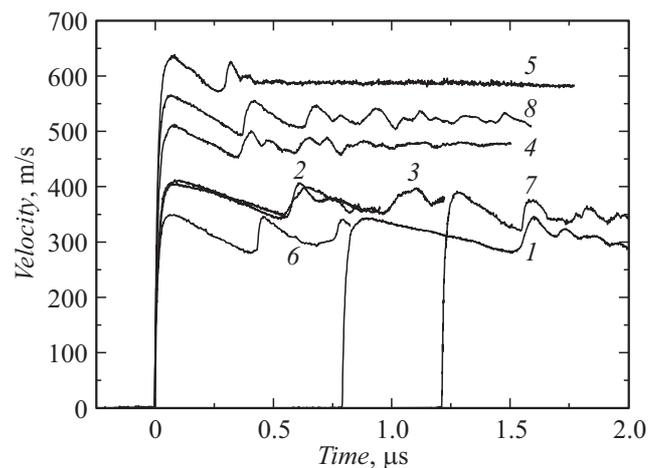
Рис. 8. Зависимость откольной прочности додекана (темные точки), ВМ-1С (светлые точки) и ТМ-1 (темные треугольники) от скорости деформации.

**Таблица 4.** Параметры сборок в экспериментах по импульсному растяжению додекана

№	Толщина образца, mm	Материал и толщина экрана, mm	$W_i$ , km/s	$P_0$ , МПа	$\dot{\epsilon}$ , $10^4$ 1/s	$P_s$ , МПа
1	8	PMMA, 2	0.50	$170 \pm 4$	$4.0 \pm 0.2$	$36.0 \pm 0.7$
2	8	PMMA, 2	0.65	$260 \pm 4$	$6.7 \pm 0.2$	$34.6 \pm 0.7$
3	8	PMMA, 2	0.65	$260 \pm 4$	$6.7 \pm 0.2$	$32.6 \pm 0.7$
4	4	PMMA, 2	0.65	$420 \pm 5$	$8.5 \pm 0.3$	$27.8 \pm 0.7$
5	2	PMMA, 1	0.65	$550 \pm 5$	$15.0 \pm 0.4$	$24.8 \pm 0.7$
6	20	Сталь 3, 20	–	$670 \pm 5$	$1.8 \pm 0.1$	$25.1 \pm 0.7$

ности до величины  $W_0$ . Внутри исследуемого образца распространяется волна разрежения, взаимодействие которой с падающей волной разрежения приводит к появлению отрицательных давлений, вызывающих возникновение и рост пор. В процессе роста пор отрицательные давления релаксируют к нулю, формируя волну сжатия, которая выходит на свободную поверхность в виде откольного импульса. Величина откольной прочности рассчитывалась по формуле  $P_s = 0.5\rho_0 c_0(W_0 - W_{\min})$  [4], где  $W_{\min}$  — минимум на профиле скорости (рис. 7). Скорость деформации  $\dot{\epsilon} = |dW/dt|/2c_0$  определялась по абсолютному значению производной скорости свободной поверхности перед откольным импульсом. Воспроизводимость экспериментальных данных достаточно хорошая, и максимальное расхождение  $P_s$ , полученных в одинаковых условиях, меньше 10%, что видно из сопоставления профилей скорости 2 (сплошная линия) и 3 (пунктир) на рис. 7.

Кинетика зарождения и роста пор определяет характер зависимости откольной прочности от скорости деформации [22]. Поэтому результаты исследования обычно представляют в переменных  $P_s - \dot{\epsilon}$ . На рис. 8 соответствующие данные для додекана показаны темными точками, которые можно аппроксимировать некоторой

**Рис. 9.** Зависимость откольной прочности додекана от амплитуды импульса сжатия.**Рис. 10.** Профили скорости свободной поверхности для масла VM-1С и ТМ-1. Цифровые обозначения соответствуют табл. 5.

зависимостью (пунктирная линия), но объяснить столь странный и неожиданный характер изменения откольной прочности довольно сложно. Ситуация становится более определенной при представлении данных в координатах  $P_s - P_0$  (рис. 9). Как видно на рис. 9, для додекана наблюдается монотонное уменьшение откольной прочности в полтора раза при увеличении амплитуды импульса сжатия от 170 до 670 МПа. Ранее в работе [23] также было обнаружено уменьшение откольной прочности с ростом амплитуды импульса сжатия для другого предельного углеводорода, гексадекана.

Аналогичные исследования выполнены для вакуумного VM-1С и трансформаторного ТМ-1 масел. Параметры сборок приведены в табл. 5. Скорость алюминиевых ударников во всех опытах была 0.65 km/s, а их толщина указана в табл. 5. В качестве экрана использовался плексиглас. В табл. 5 представлены также скорость деформации и откольная прочность  $P_s$ .

Профили скорости свободной поверхности показаны на рис. 10. Зависимости качественно похожи на данные для додекана (рис. 7). Для всех трех исследованных жидкостей наблюдается достаточно крутой фронт откольного импульса. Причем его амплитуда  $W_s$  в некоторых случаях совпадает (зависимости 1, 3 на рис. 7

**Таблица 5.** Параметры сборок в экспериментах по импульсному растяжению масла ВМ-1С и масла ТМ-1

№	Марка и толщина образца, mm	Толщина РММА экрана, mm	Толщина ударника, mm	$\dot{\varepsilon}$ , $10^4$ 1/s	$P_s$ , МПа
1	ВМ-1С, 12	2	0.4	$3.3 \pm 0.2$	$37.3 \pm 0.7$
2	ВМ-1С, 8	2	0.4	$6.8 \pm 0.2$	$36.7 \pm 0.7$
3	ВМ-1С, 8	2	0.4	$5.4 \pm 0.2$	$36.7 \pm 0.7$
4	ВМ-1С, 4	2	0.4	$8.0 \pm 0.3$	$35.9 \pm 0.7$
5	ВМ-1С, 2	2	0.4	$12.6 \pm 0.3$	$38.0 \pm 0.7$
6	ТМ-1, 5	1	0.2	$7.5 \pm 0.3$	$44.6 \pm 0.7$
7	ТМ-1, 3.7	1	0.2	$10.2 \pm 0.3$	$45.3 \pm 0.7$
8	ТМ-1, 4	1	0.4	$9.3 \pm 0.3$	$46.0 \pm 0.7$

и 1, 2, 6 на рис. 10) или даже превышает амплитуду падающего импульса  $W_0$ , как это имеет место в опыте 6 для додекана (рис. 7). Следует также отметить, что на многих профилях скорости свободной поверхности за фронтом откольного импульса наблюдаются колебания скорости, период которых значительно меньше времени циркуляции волн в откольной пластине. Вероятно, это обусловлено разрушением непосредственно в откольной пластине, приводящим к разделению ее на более тонкие откольные слои.

Несмотря на внешнее сходство профилей скорости на рис. 7 и 10, характер зависимости откольной прочности от скорости деформации для вакуумного масла ВМ-1С принципиально отличается от зависимости для додекана. На рис. 8 видно, что  $P_s$  вакуумного масла (светлые точки) практически постоянно и равно примерно 37 МПа в исследованном диапазоне изменения  $\dot{\varepsilon}$ . Незначительный интервал изменения скорости деформации в опытах с трансформаторным маслом не позволяет сделать столь же однозначные выводы о постоянстве  $P_s$ .

## Обсуждение результатов

Существенное различие физических свойств исследованных жидкостей не проявляется каким-либо образом на структуре импульсов сжатия, зарегистрированных при исследовании ударно-волновой сжимаемости. Необходимо отметить, однако, что экспериментальные данные для додекана хорошо описываются обобщенной ударной адиабатой органических жидкостей [20], тогда как для вакуумного и трансформаторного масел использование той же функциональной зависимости  $D(u)$  дает хорошее согласие с экспериментом лишь при использовании другого набора констант, одинакового для обоих масел. Причем рассчитанная на основании полученных ударных адиабат зависимость скорости звука от давления хорошо согласуется с экспериментальными данными. Как отмечалось выше, некоторое расхождение наблюдается для трансформаторного масла, но существенным оно становится только при максимальном

давлении, превышающем 20 ГПа (рис. 6). При этих условиях практически все органические соединения претерпевают фазовые превращения, поэтому экстраполяция зависимостей, справедливых при низких давлениях, может приводить к заметным погрешностям.

Различие молекулярной структуры и физических свойств исследованных жидкостей наиболее ярко проявилось на влиянии условий ударно-волнового воздействия на максимальные отрицательные давления, полученные в экспериментах. Независимость откольной прочности вакуумного масла ВМ-1С от скорости деформации согласуется с результатами, полученными ранее в экспериментах с гексаном [8] в интервале скорости деформации  $2 \cdot 10^4 - 1.5 \cdot 10^5$  1/s, этиловым спиртом [16] ( $4.5 \cdot 10^4 - 4.3 \cdot 10^5$  1/s) и водой [13] при 20°C ( $2.7 \cdot 10^4 - 1.4 \cdot 10^5$  1/s). Подобная слабая зависимость отрицательных давлений от скорости деформации находит объяснение в рамках модели гомогенного зародышеобразования, если считать, что вязкость жидкости постоянна. В этом приближении  $P_s \approx A / \sqrt{\ln(B/\dot{\varepsilon})}$  [22,23], где  $A$  и  $B$  константы вещества. Поскольку характерное значение  $B \geq 10^{13}$  1/s, необходимо более чем на два порядка изменять величину скорости деформации, чтобы расчетное значение откольной прочности увеличилось на 10% и превысило ошибку эксперимента.

Согласно теории гомогенного зародышеобразования, откольная прочность должна уменьшаться с ростом температуры  $T$  по закону  $1/\sqrt{T}$ . В условиях ударно-волнового воздействия речь идет об остаточной температуре среды после разгрузки. В исследованном интервале давлений, когда  $P_0$  меньше 1 ГПа, этот разогрев не превышает 10°C. Поэтому обнаруженное снижение откольной прочности додекана с увеличением амплитуды ударной волны не удается объяснить ростом остаточной температуры. В работах [13,15] высказывается предположение, что с увеличением давления заметную роль начинает играть локальный разогрев при схлопывании существующих в жидкости пор, что приводит к образованию „горячих точек“. Поэтому в момент возникновения растягивающих напряжений в жидкости могут существовать области с температурой выше остаточной, где и будет с наибольшей скоростью происходить гомогенное зародышеобразование. Возможно, при высоких давлениях подобный очаговый механизм разрушения имеет место и в додекане.

Величина откольной прочности в жидкостях определяется скоростью зарождения пор, тогда как форма откольного импульса зависит от кинетики их последующего роста [23–25]. Казалось бы, существенное различие вязкости додекана и масла (табл. 1) должно привести к различной амплитуде и крутизне фронта откольного импульса. В действительности это не так, профили скорости на рис. 7 и 10 очень похожи. Поскольку крутизна фронта определяется кинетикой роста пор [24], можно утверждать, что скорость роста пор в масле и додекане больше, чем в глицерине [8,9], но в то же время она сопоставима с соответствующей величиной

в воде [13–15]. Это свидетельствует о том, что рост пор при растяжении исследованных жидкостей определяется не столько вязкостью, сколько их инерционным ростом. Подтверждением этого является и высокая амплитуда откольного импульса  $W_s$ , которая в опыте 6 с додеканом даже превышает амплитуду падающего импульса  $W_0$  (рис. 7). Столь необычный эффект наблюдался ранее для воды [13–15] и является следствием инерционного роста пор при сжатии, возникающим в результате релаксации отрицательных давлений после начала разрушения [23,25].

Таким образом, различие физических свойств исследованных жидкостей наиболее ярко проявилось в характере зависимости откольной прочности от параметров импульса сжатия, инициирующего растяжение образцов при выходе на свободную поверхность. Показано, что в масле максимальные отрицательные давления постоянны, тогда как в додекане зависят от амплитуды ударных волн. Этот результат, однако, не является явным следствием различия вязкостей исследованных жидкостей, о чем свидетельствует одинаковая структура откольных импульсов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-31-00283 мол\_а).

## Список литературы

- [1] Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. Вып. 11/12. С. 525–538.
- [2] Fisher J.C. // J. Appl. Phys. 1948. Vol. 19. P. 1062–1067.
- [3] Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М.–Л.: Гостехиздат, 1951.
- [4] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
- [5] Erlich D.C., Wooten D.C., Crewdson R.C. // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. N 13. P. 5495–5502.
- [6] Carlson G.A., Henry K.W. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 5. P. 2201–2206.
- [7] Carlson G.A., Levine H.S. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 4. P. 1594–1601.
- [8] Уткин А.В., Сосиков В.А., Богач А.А. // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 2. С. 27–33.
- [9] Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В., Уваров С.В., Наймарк О.Б. // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 3. С. 69–77.
- [10] Marston P.L., Pullen G.L. Cavitation in watter induced by the reflection of shock waves. Shock Waves in Condensed Matter. 1981, N.Y.: AIP, 1982. P. 515–519.
- [11] Marston P.L., Urgen B.T. Rapid cavitation induced by the reflection of shock waves. Shock Waves in Condensed Matter. 1985, N.Y.: Plenum Press, 1986. P. 401–405.
- [12] Дремин А.Н., Канель Г.И., Колдунов С.А. Исследование откола в воде, этиловом спирте и плексигласе. Горение и взрыв. Материалы 3-го Всес. симпозиума по горению и взрыву. М.: Наука, 1972. С. 569–574.
- [13] Богач А.А., Уткин А.В. // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 4. С. 198–205.
- [14] Банникова И.А., Уваров С.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 17. С. 87–93.
- [15] Сосиков В.А., Уткин А.В., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. Вып. 5. С. 1039–1041.
- [16] Уткин А.В., Сосиков В.А. // ПМТФ. 2005. Т. 46. № 4. С. 29–38.
- [17] Carlson G.A. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 9. P. 4069–4070.
- [18] Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.
- [19] Воскобойников И.М., Афанасенков А.Н., Богомолов В.М. // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3. № 4. С. 585–593.
- [20] Woolfolk R.W., Cowperthwaite M., Shaw R. // Thermochemica Acta. 1973. Vol. 5. N. 4. P. 409–414.
- [21] Efremov V.P., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Utkin A.V. // Shock Waves. 2017. Vol. 27. N 147. P. 517–522.
- [22] Уткин А.В. // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 6. С. 151–160.
- [23] Utkin A.V., Sosikov V.A. Tension of liquids by shock waves. Proceedings of the Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. June 28–July 3, 2009, Nashville, Tennessee, USA, P. 568–573.
- [24] Уткин А.В. // ПМТФ. 1993. Т. 34. № 4. С. 140–146.
- [25] Уткин А.В. // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 1. С. 185–193.