

## 05 Экспериментальное исследование ударно-волновых процессов в твердых и жидких парафинах

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

<sup>1</sup> Институт проблем химической физики РАН,  
142432 Черноголовка, Московская область, Россия

<sup>2</sup> Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: vaso@icp.ac.ru

(Поступило в Редакцию 2 августа 2013 г. В окончательной редакции 27 марта 2014 г.)

Проведены эксперименты по исследованию структуры импульса сжатия и откольной прочности парафина и докозана в твердом и жидком состояниях. Найдено, что прочность парафина уменьшается в полтора раза при переходе через температуру плавления (с 20 до 14 МПа), тогда как у докозана она остается практически постоянной и равна примерно 24 МПа. Показано, что в твердом состоянии докозан проявляет упруго-пластические свойства и обладает аномальной сжимаемостью при давлении ниже 100 МПа. Обсуждена возможность применения модели гомогенного зародышеобразования для интерпретации полученных данных.

При ударно-волновом воздействии структура фронта импульса сжатия и закономерности разрушения материалов в случае возникновения растягивающих напряжений определяются как параметрами ударных волн, так и состоянием среды. Представляет интерес исследование особенностей изменения характера отклика материала на внешнее воздействие при переходе через температуру плавления. Наиболее ярко эти изменения наблюдаются для металлов. Выше температуры плавления исчезают, например, упругоэластические свойства металлов, что проявляется на структуре ударных волн и волн разрежения, принципиально меняется кинетика откольного разрушения [1–3]. В значительно меньшей степени изучены особенности поведения органических материалов вблизи температуры плавления при импульсном воздействии. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование ударно-волновых процессов в твердых и жидких парафинах.

### Схема экспериментов

В качестве объектов исследования выбраны гомогенизированный парафин и докозан, исследования которых выполнены при 20 и 70 °С. Парафин представляет собой смесь молекул предельных углеводородов от C<sub>18</sub> до C<sub>35</sub>, тогда как докозан — предельный углеводород C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>. Плотность и скорость звука образцов в твердом и жидком состоянии приведены в табл. 1.

Схема экспериментов для изучения импульсного сжатия и растяжения парафина и докозана показана на рис 1, а.

Ударные волны создавались при соударении алюминиевого ударника (1) толщиной 0.2–2 мм, разогнанного продуктами взрыва (ПВ) [5] до скорости 700 м/с, с плексигласовым экраном 2, толщиной 2 мм. Условия

нагружения варьировались изменением толщины ударника  $h_i$  и образца  $3 h_1$  и приведены в табл. 2. Для регистрации скорости использовался лазерный интерферометр VISAR [5] с постоянной 80.8 м/с, что позволило провести измерения с точностью  $\pm 2$  м/с и временным разрешением около 2 нс. Лазерный луч отражался от алюминиевой фольги 4 толщиной 7 мкм, отделяющей образец от воздуха. Геометрические размеры сборки (плоский участок ударника был более 40 мм) обеспечивали одномерные условия нагружения и исключали приход боковой волны разгрузки за время проведения эксперимента. К моменту выхода на свободную поверхность импульс сжатия имел форму треугольника, что определялось в отдельных экспериментах по схеме, аналогичной приведенной на рис 1, а, но образец разгружался не в воздух, а в воду.

В опытах с докозаном использовалась также схема, представленная на рис 1, б, которая позволяет получить импульсы сжатия малой амплитуды (порядка 0.1 ГПа). В данном случае ударные волны инициировались зарядом взрывчатого вещества (ВВ), диаметр которого составлял 20 мм и вес 20 г. Параметры ударной волны варьировались изменением толщины слоя воды между ВВ и исследуемым образцом.

Таблица 1. Характеристики исследуемых веществ

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho_0, \text{g/cm}^3$	$C_0, \text{km/s}$	Литература
Парафин			
20	0.910	1.46	
70	0.777	1.32	
Докозан			
20	0.94	2.60	
70	0.775	1.265	[4]

Таблица 2. Параметры экспериментальных сборок

Номер и схема опыта	$h_i$ , mm	$h_l$ , mm	$P_0$ , МПа	$\Delta W$ , m/s	$P_s$ , МПа	$\dot{\varepsilon} \cdot 10^4$ , s <sup>-1</sup>
Парафин, 20°C						
1(609)	0.4	2.1	897	30 ± 1	20 ± 1	13.2
2(579)	0.378	7.5	446	28 ± 1	20 ± 1	3.7
3(595)	0.4	7.7	306	30 ± 1	19 ± 1	3.7
Парафин, 70°C						
4(520)	2	8	840	23 ± 1	12.0 ± 0.5	2.3
5(524)	0.4	2	803	30 ± 1	15.5 ± 0.5	26.3
6(519)	0.4	8	292	28 ± 1	14.5 ± 0.5	2.48
7(003)	2	8		–	–	
Докозан, 20°C						
8(108)	2	4	2250	23 ± 1	26 ± 1	5.0
9(104)	0.4	4	1102	20 ± 1	23 ± 1	10.8
10(101)	0.4	8	460	21 ± 1	24 ± 1	9.7
11(105)	0.4	16	327	–	–	
12(780)	ПВ	8	191	–	–	
13(781)	ПВ	16	157	–	–	
Докозан, 70°C						
14(725)	2	8	849	44 ± 1	21.6 ± 0.5	3.4
15(732)	0.4	2	698	45 ± 1	22.0 ± 0.5	5.9
16(704)	0.4	2	474	46 ± 1	22.5 ± 0.5	9.7
17(717)	0.4	8	329	45 ± 1	22.0 ± 0.5	7.9

## Результаты экспериментов

### Парафин

Результаты экспериментов для парафина, представляющие собой профили скорости свободной поверхности, показаны на рис. 2, 3.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов для твердого парафина, полученные при начальной температуре 20°C. Выход на свободную поверхность ударной волны вызывает скачкообразное увеличение скорости поверхности до величины  $W_0$ , равной удвоенной массовой скорости в ударной волне. Внутри образца распространяется центрированная волна разрежения, которая, взаимодействуя с падающей волной разгрузки, приводит к внутреннему разрыву — отколу. В процессе разрушения растягивающие напряжения релаксируют к нулю, формируя волну сжатия, которая выходит на свободную поверхность в виде откольного импульса, амплитуда и крутизна фронта которого определяются соотношением

между скоростью разрушения и скоростью деформирования в разгрузочной части импульса [6]. В твердом парафине, как видно на рис. 2, откольный импульс едва выражен, но тем не менее минимум на профилях скорости  $W_m$  определяется однозначно. Это позволяет найти

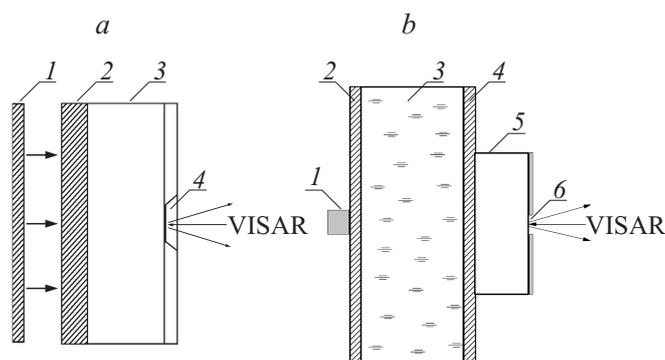


Рис. 1. Схема эксперимента.

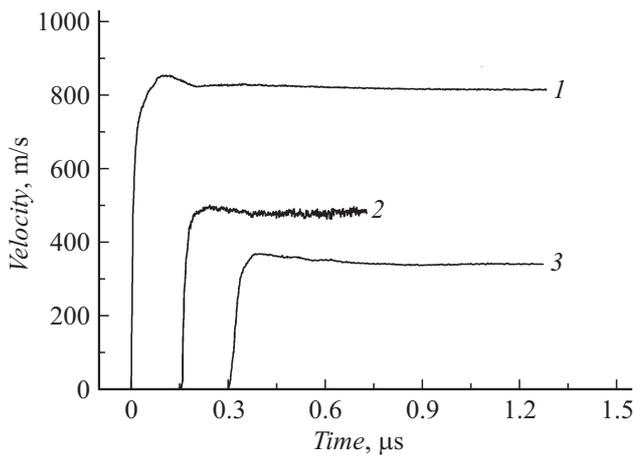


Рис. 2. Результаты экспериментов для парафина. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

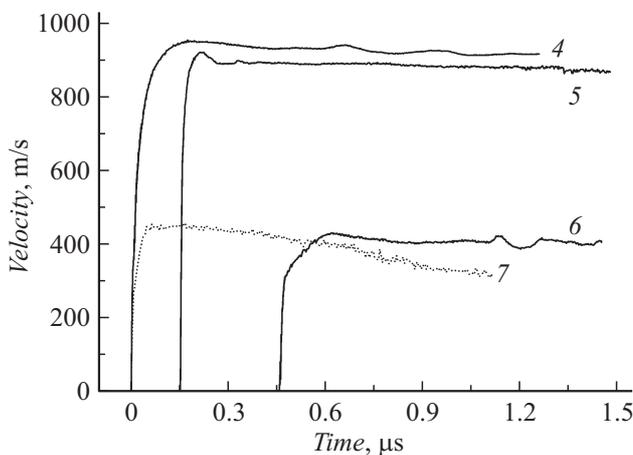


Рис. 3. Результаты экспериментов для жидкого парафина. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

величину откольной прочности  $P_s$ , характеризующую максимальные растягивающие напряжения в образце [5]:  $P_s = 0.5\rho_0c_0\Delta W$ , где  $\Delta W = W_0 - W_m$ . Полученные значения откольной прочности приведены в табл. 2. Там же указана скорость деформирования в разгрузочной части импульса  $\dot{\epsilon} = (dW/dt)/2c_0$ .

Профили скорости для жидкого парафина при начальной температуре 70°C показаны на рис. 3.

Видно, что переход парафина от твердого состояния к жидкому не приводит к появлению каких-либо явных особенностей на волновых профилях. Тем не менее величина откольной прочности уменьшается в полтора раза и равняется примерно 14 МПа для жидкого парафина. Наблюдаются также некоторые различия при формировании откольного импульса: в жидком парафине его фронт выражен отчетливее, чем в твердом. Если предположить, что рост пор в парафине при растяжении описывается вязкой моделью разрушения [7], то последнее обстоятельство может быть следствием уменьшения вязкости при переходе от твердого к жидкому состоянию.

Отметим также, что на полученных профилях не отмечаются колебания скорости, обусловленные циркулирующей волн между поверхностью образца и областью разрушения. Это, вероятно, связано не только с вязкостью парафина, но и с размытой областью кавитации, которая не имеет четких границ. На рис. 3 приведен также профиль массовой скорости (зависимость 7), измеренный при разгрузке парафина в воду, а не в воздух (зависимость 4). Учитывая небольшое различие ударных адиабат воды и жидкого парафина, можно утверждать, что правило удвоения скоростей выполняется с хорошей точностью.

**Докозан**

На рис. 4, 5 суммированы результаты измерения скорости свободной поверхности докозана от времени при изменении амплитуды импульса сжатия на порядок, от 157 МПа до 2.25 ГПа, при начальной температуре 20°C.

Характер разрушения твердого докозана аналогичен наблюдаемому в твердом парафине, причем откольный

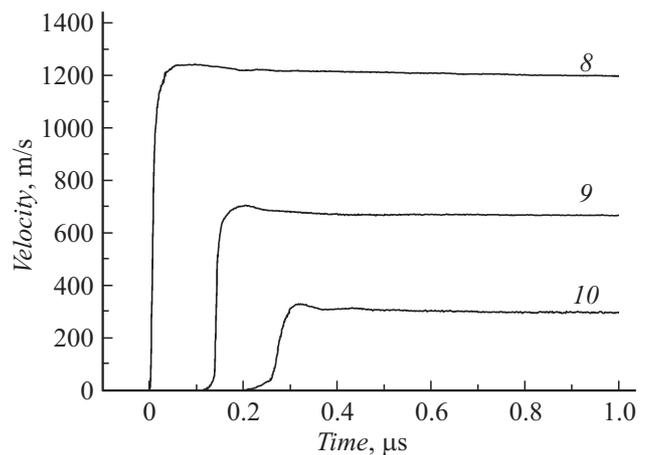


Рис. 4. Результаты экспериментов для докозана. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

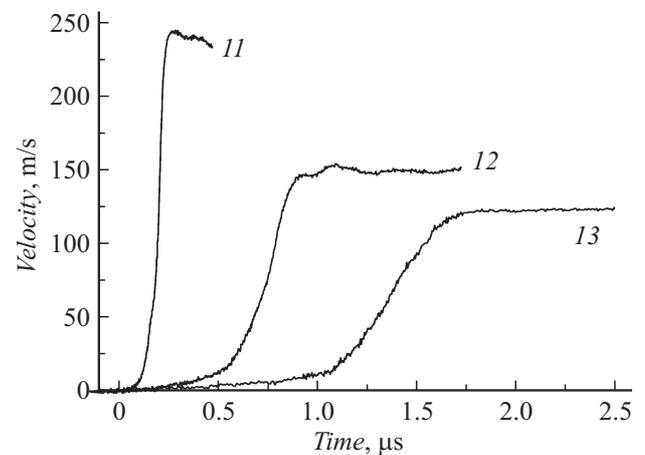


Рис. 5. Результаты экспериментов для докозана. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

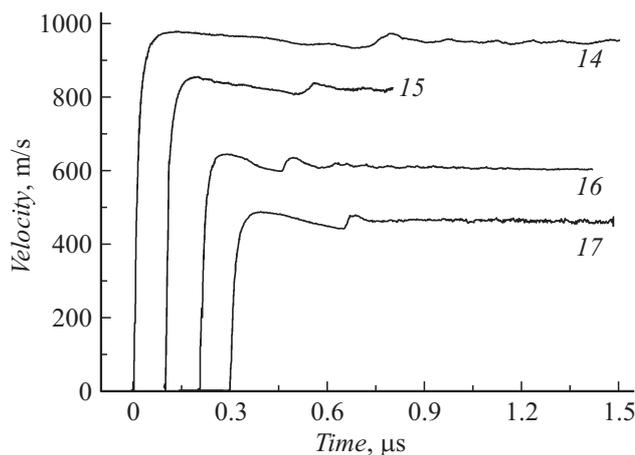


Рис. 6. Результаты экспериментов для жидкого докозана. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

импульс в данном случае выражен в еще меньшей степени (рис. 4), а на профилях 8, 9, соответствующих максимальному давлению, он вообще отсутствует. При низких давлениях (рис. 5) растягивающие напряжения в образце не реализовались в течение всего времени регистрации, поэтому откол не наблюдался.

Наиболее интересным результатом, полученным в экспериментах с твердым докозаном, является формирование двухволновой конфигурации, которая не наблюдается только при максимальном давлении (зависимость 8 на рис. 4). Во всех остальных случаях перед фронтом ударной волны фиксируется предвестник, амплитуда которого монотонно возрастает от нуля до максимального значения. Появление предвестника обусловлено упруго-пластическими свойствами докозана, и первая волна является упругой. Именно с этим связана высокая скорость звука, равная 2.6 km/s, которая была измерена ультразвуковым методом и является продольной скоростью звука  $c_l$ . Парафин упругими свойствами не обладает и скорость звука, измеренная в аналогичных условиях, равна 1.46 km/s. Объемная скорость звука  $c_0$  для докозана принималась равной 2.22 km/s, и метод ее оценки приведен ниже. Поэтому при расчете откольной прочности докозана использовалась формула для упруго-пластической среды [8]:

$$P_s = \rho_0 \frac{c_0 c_1}{c_0 + c_1} \Delta W.$$

На рис. 5 видно, что при увеличении толщины образца (зависимости 12 и 13), т.е. по мере распространения волны, длительность упругого предвестника увеличивается, как это и должно быть для упруго-пластического тела.

Неожиданным является тот факт, что одновременно увеличивается ширина фронта пластической волны. Подобное размытие импульса сжатия возможно в средах с аномальной сжимаемостью, в которых формируются ударные волны разрежения, а волны сжатия являются

изэнтропическими. Подробнее этот вопрос рассматривается ниже при обсуждении результатов.

Результаты экспериментов для жидкого докозана показаны на рис. 6. Профили скорости значительно отличаются от полученных для твердого докозана. Во-первых, отчетливо выражен откольный импульс с крутым фронтом и достаточно большой амплитудой. Во-вторых, отсутствуют какие-либо особенности структуры фронта волны сжатия. При этом величина откольной прочности практически не изменилась по сравнению со своим значением в твердом докозана. Последнее является достаточно необычным, поскольку принято считать, что при плавлении прочность тел уменьшается.

## Обсуждение результатов экспериментов

Импульсное разрушение парафина и докозана выше температуры плавления, как и всех исследованных ранее жидкостей, происходит, вероятно, в результате роста пор, порождаемых тепловыми флуктуациями [9–13]. Косвенным свидетельством этого является практически отсутствующая зависимость откольной прочности от скорости деформирования, что является одним из следствий модели гомогенного зародышеобразования [14]. Этот же механизм разрушения реализуется, по-видимому, и в твердом парафине. Для твердого докозана это не столь очевидно, тем не менее постоянство величины откольной прочности при переходе через температуру плавления позволяет предположить, что и в данном случае механизм роста пор при отколе определяется процессом гомогенного зародышеобразования и наличие у твердого докозана упруго-пластических свойств не приводит к формированию неоднородной структуры образца.

Неожиданным является незначительное количественное изменение откольной прочности при переходе через температуру плавления. Это, в частности, делает невозможным определение состояния вещества по характеру изменения откольной прочности от температуры. Например, факт ее постоянства в экспериментах, когда состояние вещества при изэнтропической разгрузке после ударного сжатия пересекает кривую плавления, не является доказательством реализации в твердом теле перегретого состояния [2].

Еще более неожиданным является принципиальное различие структуры импульса сжатия в докозанах и парафине при давлении ниже 100 МПа. Как показано выше, в докозанах, во-первых, формируется двухволновая конфигурация, обусловленная его упруго-пластическими свойствами, т.е. первая волна является упругим предвестником. Во-вторых, докозан обладает аномальной сжимаемостью, что делает невозможным формирование ударных волн сжатия и фронт импульса расплывается по мере распространения по образцу, что и наблюдается на рис. 5. Процесс сжатия в данном случае является изэнтропическим, и если фронт входящей в образец

ударной волны можно рассматривать как скачок, то должна формироваться центрированная волна сжатия, аналогично формированию центрированной волны разрежения в средах с нормальной сжимаемостью.

На рис. 7 профили скорости 12 и 13 перестроены в координатах  $t/h$ , где  $t$  — время,  $h$  — толщина образца. Видно, что профили скорости практически совпадают, т.е. течение автомодельно и волна сжатия действительно является центрированной. Из условия сохранения инвариантов Римана [15] следует постоянство скорости звука вдоль характеристик, поэтому они представляют собой пучок прямых линий. Это позволяет рассчитать лагранжеву скорость звука  $a_L$  на каждой характеристике, зная время ее выхода на свободную поверхность  $t_f$ :

$$a_L = \frac{h}{t_f = h/c_{10}},$$

где  $c_{10}$  — скорость звука при нулевом давлении.

Поскольку массовая скорость  $u$ , равная половине скорости свободной поверхности, в каждый момент времени известна, то получаем зависимость  $a_L$  от  $u$ .

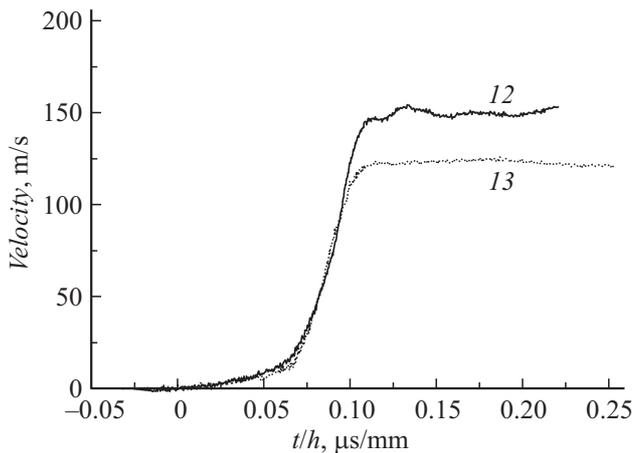


Рис. 7. Результаты экспериментов для жидкого докозана. Номера кривых соответствуют номерам опытов в табл. 2.

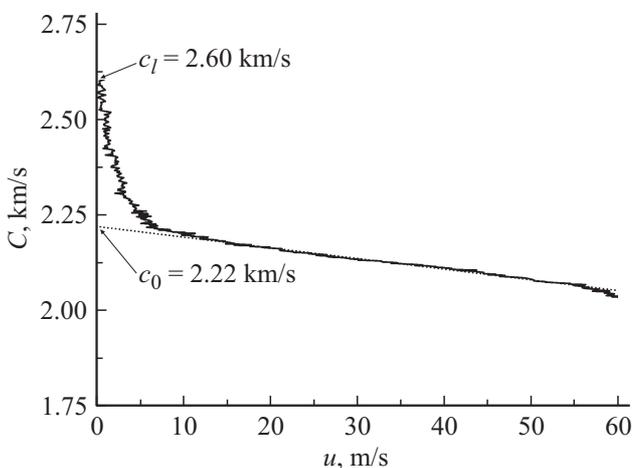


Рис. 8. Зависимость скорости звука для докозана.

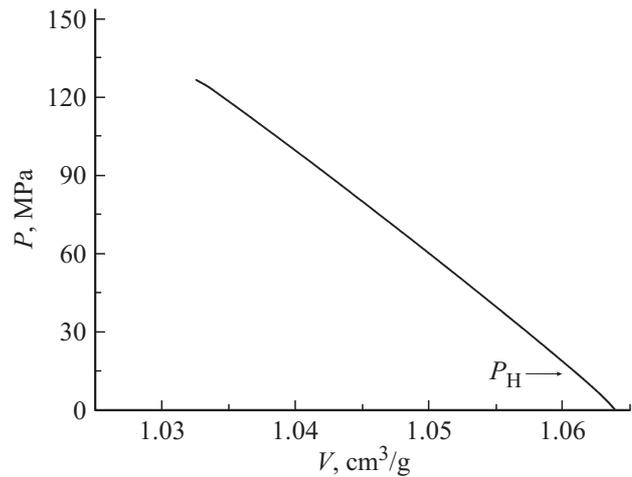


Рис. 9. Изэнтропа докозана.

Результат расчета для опыта 12 представлен на рис. 8. Видно, что скорость звука резко уменьшается с ростом давления (массовой скорости) в области упругого деформирования, а затем, в области пластического течения, продолжает медленно уменьшаться, практически по линейному закону  $a_L(u)$ .

Зная зависимость скорости звука от массовой скорости, можно найти изэнтропу сжатия в плоскости давление  $P$ –удельный объем  $V$ . Для этого используем условие постоянства инвариантов Римана вдоль характеристик:

$$dP = \rho_0 a_L du, \quad dV = du/\rho_0 a_L,$$

из которого непосредственно получаем давление и удельный объем как функции массовой скорости. Исключая  $u$ , находим изэнтропу  $P(V)$ , которая представлена на рис. 9. Видно, что изэнтропа имеет слабо выраженную отрицательную кривизну, которая наиболее отчетливо проявляется при переходе от упругого к пластическому деформированию. Соответствующее значение давления (предел Гюгонио) равно 16 МПа.

Таким образом, несмотря на сходство физических свойств, поведение парафина и докозана существенно различается при импульсном воздействии. Причем даже в жидком состоянии их откольная прочность различается в полтора раза. Однако наиболее принципиальным отличием докозана является то, что в твердом состоянии он проявляет упруго-пластические свойства и обладает аномальной сжимаемостью.

### Список литературы

- [1] Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Spall Fracture. New York: Springer-Verlag. 2003. 404 p.
- [2] Kanel G.I., Razorenov S.V., Baumung K., Bluhm H. Shock Compression of Condensed Matter. Amsterdam: Worth Holland, 2001. P 603–606.

- [3] *Sheng-Nian Luo, Qi An, Timothy C. Germann, Li-Bo Han* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P 013 502.
- [4] *Зотов В.В., Мелихов Ю.Ф., Мельников Г.А., Неручев Ю.А.* Скорость звука в жидких углеводородах. Курск: КГПУ. 1995. 77 с.
- [5] *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 406 с.
- [6] *Уткин А.В.* // ПМТФ. 1993. Т. 34. № 4. С. 140–146.
- [7] *Уткин А.В.* // ПМТФ. 1992. № 6. С. 82–89.
- [8] *Степанов Г.В.* // Проблемы прочности. 1976. № 8. С. 66–70.
- [9] *Carlson G.A., Levine H.S.* // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46, № 4. P. 1594–1601.
- [10] *Marston P.L., Urgen V.T.* Shock Waves in Condensed Matter. 1985. New York: Plenum Press, 1986. P. 401–405.
- [11] *Дремин А.Н., Канель Г.И., Колдунов С.А.* Материалы 3-го Всес. симпозиума по горению и взрыву. М.: Наука, 1972. С. 569–574.
- [12] *Богач А.А., Уткин А.В.* // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 4. С. 198–205.
- [13] *Уткин А.В., Сосиков В.А., Богач А.А.* // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 2. С. 27–33.
- [14] *Utkin A.V., Sosikov V.A., Bogach A.A., Fortov V.E.* // AIP Conf. 2004. Vol. 706. N 1. P. 765–770.
- [15] Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.