

# МОДИФИКАЦИЯ ИНДИКАТОРНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В УДАРНО-СЖАТЫХ МАТЕРИАЛАХ

*Ф. И. Тарасов, Е. Б. Смирнов, А. Ю. Николаев, Р. Н. Канунников,  
В. В. Малёв, А. С. Лобачёв, Д. В. Мухин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В работе представлена постановка проведенных взрывных экспериментов с использованием модифицированного фотоэлектрического метода (индикаторного метода) с применением пьезооптических датчиков на примерах по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах. Цель работы – отработка и применение индикаторного метода.

Задача работы: проведение взрывных экспериментов по определению скорости звука за фронтом ударной волн в различных материалах: металле, керамике, пластмассах и верификация полученных данных.

Для ударно-волнового нагружения использованы взрывные нагружающие устройства метательного типа. Они обычно состоят из генератора плоской ударной волны и пластины-ударника. В экспериментах применены ударники из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и стали 10. Диапазон скоростей ударников составил от 2,7 до 5,7 км/с. Для определения скорости звука в исследуемом нагруженном образце применялись методы догоняющей и встречной разгрузки.

В результате работы отработана постановка взрывных экспериментов по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах индикаторным методом с использованием пьезооптических датчиков. Получены экспериментальные данные по скоростям звука в ударно-нагруженных материалах: в стали 12Х18Н10Т; в оксиде бериллия; в эпоксидном компаунде ЭК-34 и во фторопласте Ф-4; которые согласуются с данными других авторов, полученных ранее с применением других методов регистрации параметров ударного сжатия. Таким образом, метод может быть распространён и на исследования других материалов.

## Введение

Скорость звука за фронтом ударной волны определяет начальное поведение сжатого вещества при разгрузке и в волне повторного сжатия. Измерение скорости звука позволяет получить информацию об упруго-пластических свойствах ударно-сжатых материалов. По резкому изменению зависимости скорости звука от давления можно судить об изменении фазового состояния вещества вдоль его ударной адиабаты [1].

Основными экспериментальными методами, предназначенными для определения скорости звука

в ударно-сжатых материалах, являются: электроконтактный, манганиновый, электромагнитный, индикаторный (иначе называемый фотоэлектрическим), лазерно-интерферометрический.

Манганиновый метод. Принцип основан на изменении электросопротивления манганина пропорционально приложенному давлению [2]. Схематично вид датчика и постановка эксперимента показаны на рис. 1.

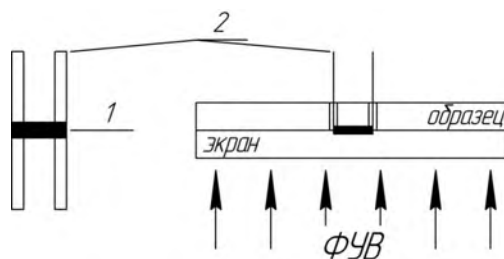


Рис. 1. Манганиновый датчик: 1 – чувствительный элемент; 2 – выводы; ФУВ – фронт ударной волны

Манганиновый датчик, как правило, покрывается слоем диэлектрического материала. Однако использование в экспериментах датчиков в изоляции предполагает более тщательный анализ полученных результатов с учётом материала и толщины изолирующего покрытия.

Лазерно-интерферометрический метод основан на эффекте Доплера. Эффект Доплера заключается в изменении частоты в данном случае лазерного излучения, отраженного от движущейся отражающей поверхности. Один из вариантов схем постановки ударно-волновых экспериментов показан на рис. 2.

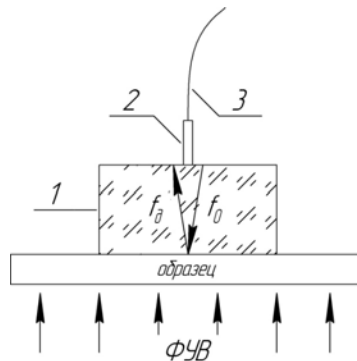


Рис. 2. Схема постановки эксперимента: 1 – оконный материал; 2 – коллиimator; 3 – оптическое волокно

В лазерном интерферометре частота опорного оптического сигнала смешивается с частотой претерпевшего доплеровский сдвиг отраженного сигнала в гетеродине и детектируется, в результате на выходе детектора возникает электрический сигнал соответствующий разностной частоте опорного и отраженного сигналов. Из полученных осциллограмм при помощи, например, быстрого преобразования Фурье получают спектрограммы, для которых по максимуму спектральной плотности получают значения профиля скорости отражающей движущей поверхности.

Индикаторный (фотоэлектрический) метод состоит в регистрации изменения интенсивности теплового излучения, вызванного сжатием вещества ударной волной с помощью фотопреобразователя оптического сигнала в электрический и его осциллографическим измерением регистрацией.

Во всем спектральном диапазоне зависимость энергии полного излучения  $M$  черного тела от температуры описывается уравнением Стефана-Больцмана  $M = \sigma T^4$ , где  $\sigma$  – постоянная величина. Интенсивность теплового излучения пропорциональна четвертой степени давления, то есть незначительное изменение давления на фронте ударной волны вызывает существенное изменение регистрируемого фотоприемником сигнала, соответствующего энергии излучения. Основное достоинство индикаторного (фотоэлектрического) метода (ФЭМ) – высокая чувствительность [3].

Классическая схема постановки эксперимента представлена на рис. 3.

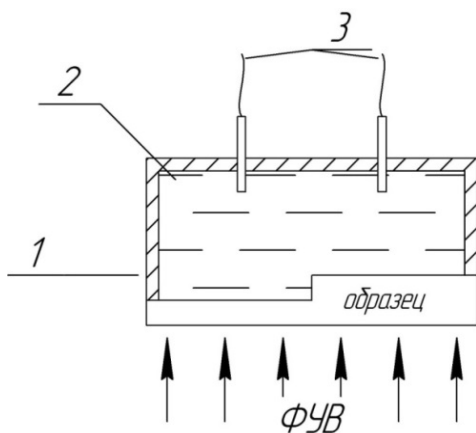


Рис. 3. Схема постановки эксперимента: 1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики

Недостаток классической схемы постановки эксперимента с использованием ФЭМ заключается в конструкции приемной части, в которой крепится ступенчатый образец. Наличие общей полости в корпусе (поз. 1 на рис. 3), в которой располагается индикатор, обуславливает необходимость экранирования датчиков от свечения смежных ступеней.

## Постановка взрывных экспериментов и полученные результаты

В настоящей работе предложена несколько иная конструкция экспериментального узла с использованием в качестве чувствительных элементов пьезооптических датчиков. Схема постановки эксперимента представлена на рис. 4.

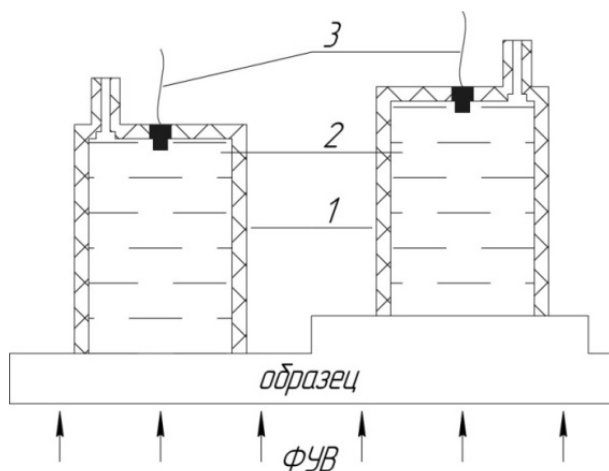


Рис. 4. Схема постановки эксперимента с использованием пьезооптических датчиков:

1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики

Датчики располагаются над каждой ступенью образца в небольших светоизолированных корпусах (поз. 1 на рис. 4). Их преимуществами являются простота использования, относительная универсальность.

Проверка конструкции датчиков проводилась во взрывных экспериментах по определению скорости звука в ударно-сжатых образцах из нержавеющей стали 12Х18Н10Т в диапазоне давлений от 73 до 198 ГПа.

Пример сигнала с пьезооптического датчика и экспериментальные результаты по определению скорости звука в стали 12Х18Н10Т показаны на рис. 5 и 6, соответственно.

Для сравнения на рис. 6 приведены данные работ [4, 5], полученные, соответственно, манганиновым и индикаторным методом в классической постановке.

На рис. 6 видно, что данные настоящей работы и работ [4, 5], хорошо согласуются.

Также проводились работы по определению скорости звука в ударно-сжатой керамике (оксиде бериллия) с применением пьезооптических датчиков. В отличие от светонепроницаемых материалов, керамики способны пропускать свет от ударной волны в определенном спектральном диапазоне, вследствие чего при ударном сжатии образца на регистрируемом датчиком сигнале возникают особенности, осложняющие интерпретацию измерений.

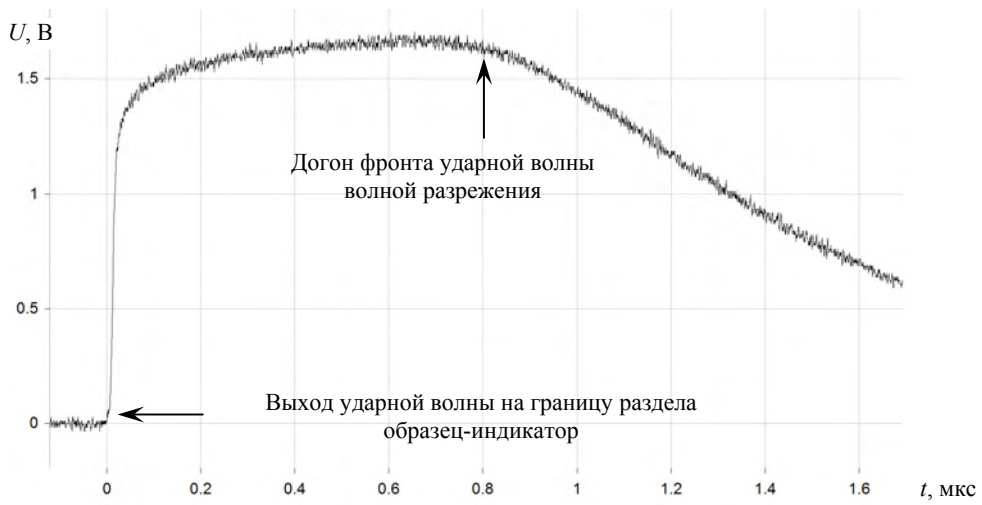


Рис. 5. Пример сигнал пьезооптического датчика

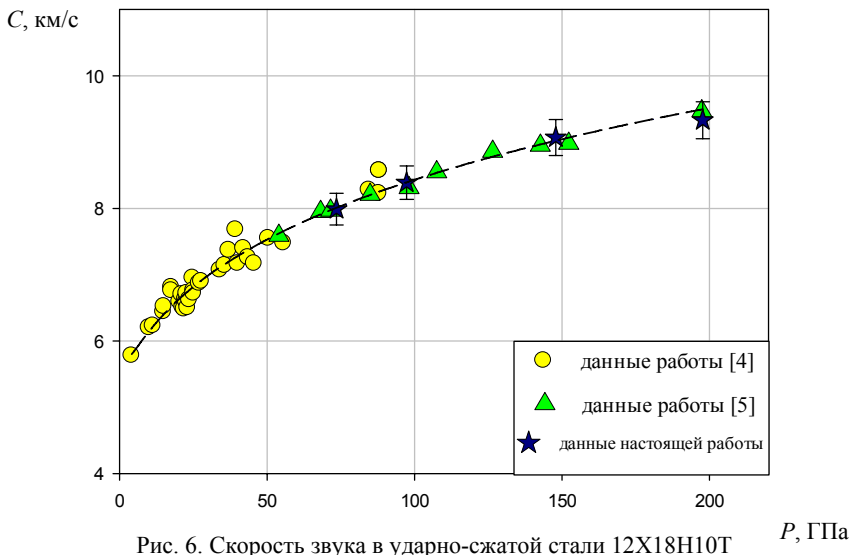


Рис. 6. Скорость звука в ударно-сжатой стали 12X18H10T

В связи с этим для понимания происходящих процессов был проведен уточняющий взрывной эксперимент. В эксперименте использовался один пьезооптический и три оптических датчика. Постановка эксперимента показана на рис. 7.

Датчики располагались радиально, при этом ось каждого датчика находилась на расстоянии 10 мм от оси сборки. Оптические датчики 1 и 3 работали в режиме непрерывной регистрации. Датчик 2 был светоизолирован с торца алюминиевой фольгой толщиной 0,01 мм для определения момента времени выхода фронта ударной волны на свободную поверхность образца. Полученные в эксперименте сигналы представлены на рис. 8.

Момент времени, обозначенный стрелкой I, характеризует начало записи датчиками 1, 3 и 4 распространения ударной волны (упругого предвестника) в образце. Стрелками II-V обозначены моменты выхода фронта ударной волны на свободную поверхность образца.

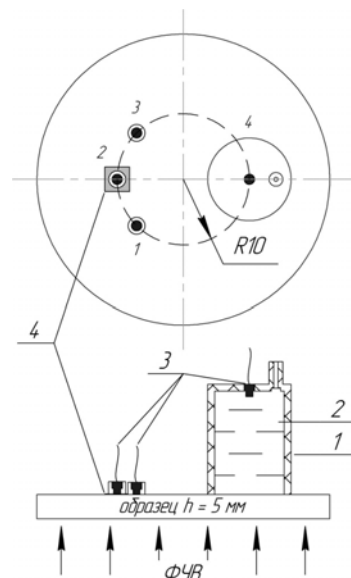


Рис. 7. Постановка эксперимента: 1 – корпус; 2 – индикаторное вещество; 3 – оптические датчики; 4 – металлическая фольга

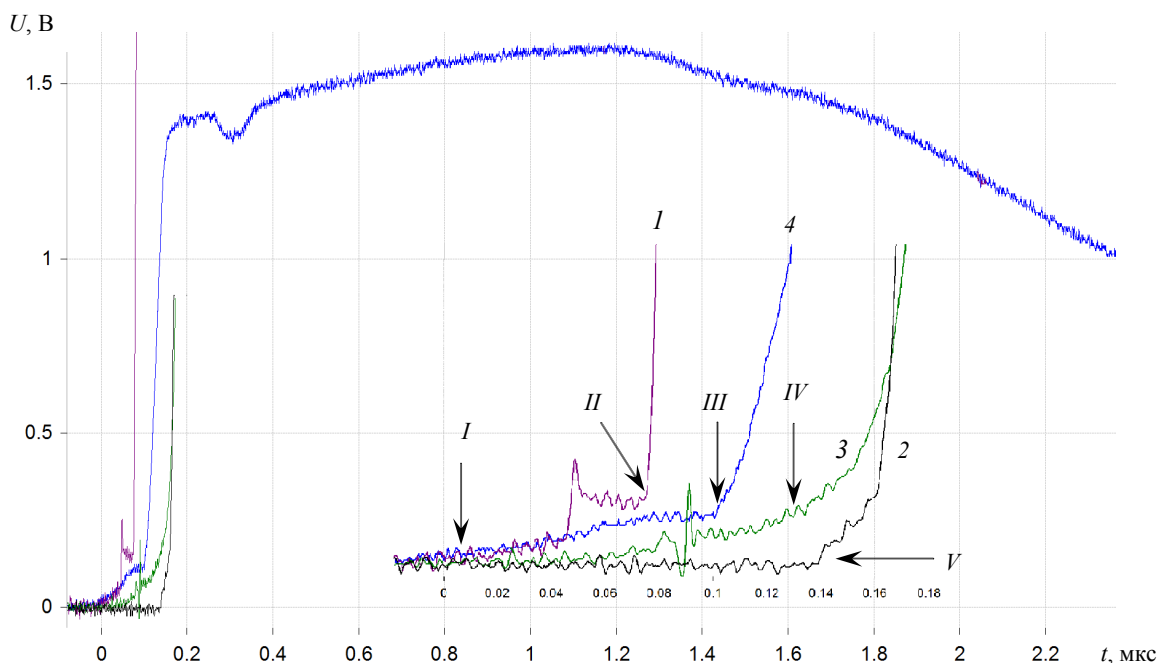


Рис. 8. Сигналы датчиков

Опираясь на справочные данные [6] по ударной сжимаемости оксида бериллия и разность времен  $II$  ( $III$ ) и  $I$ , установлено, что начало записи датчиками соответствует глубине  $\sim 0,9$  мм от свободной поверхности образца. Таким образом, показано, что оксид бериллия при ударном сжатии обладает частичным светопропусканием в инфракрасном спектре излучения.

Схема постановки эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия показана на рис. 9.

Учитывая оптическую прозрачность образца в инфракрасном спектре, на каждую ступень наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,01 мм. Ударно-волновое нагружение осуществлялось взрывным нагружающим устройством с ударником из 12Х18Н10Т с подлётной скоростью 2,7 км/с. Толщина ударника составляла  $h_{уд} = 4$  мм, толщины ступеней образца –  $h_1 = 8$  мм,  $h_2 = 9$  мм,  $h_3 = 10$  мм,  $h_4 = 11$  мм. Полученные в эксперименте сигналы представлены на рис. 10.

По результатам обработки экспериментальных данных получено значение скорости звука в оксиде бериллия  $C = 14,49$  км/с при давлении  $P = 47$  ГПа.

Проведены взрывные эксперименты по определению скорости звука в ударно-сжатых эпоксидном компаунде ЭК-34 и фторопласте Ф-4 в диапазоне давлений от 14 до 38 ГПа и от 24 до 44 ГПа, соответственно. Подробно результаты работ изложены в [7, 8]. Стоит отметить, что индикаторный (ФЭМ) метод ранее не применялся для определения скорости звука в данных материалах. Постановка экспериментов аналогична схеме, представленной на рис. 9. Результаты работ [7, 8] представлены на рис. 11 и 12.

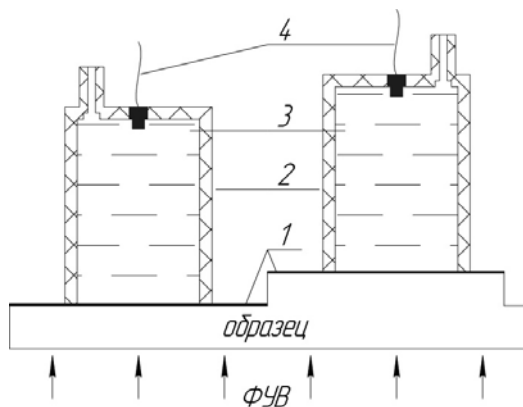


Рис. 9. Постановка эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия: 1 – металлическая фольга; 2 – корпус; 3 – индикаторное вещество; 4 – оптические датчики

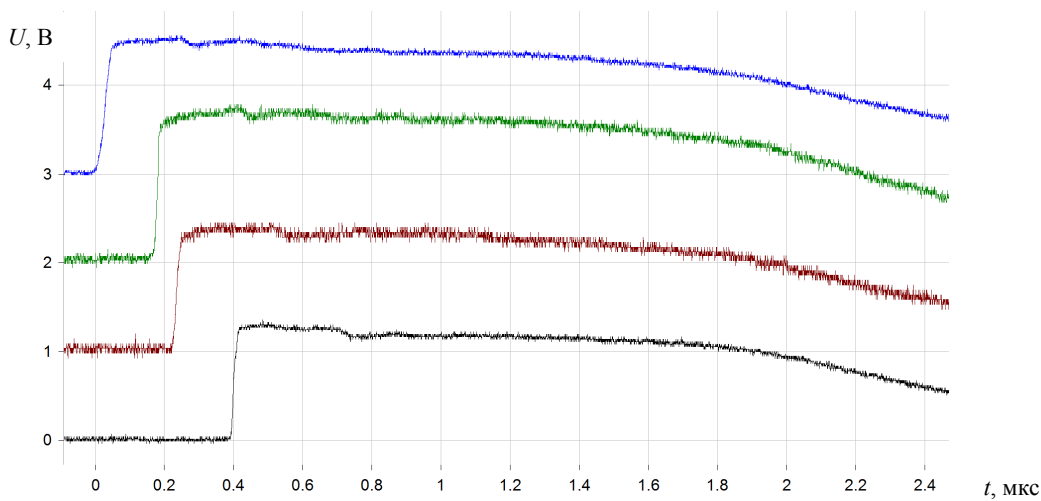


Рис. 10. Сигналы эксперимента по определению скорости звука в ударно-сжатом оксиде бериллия

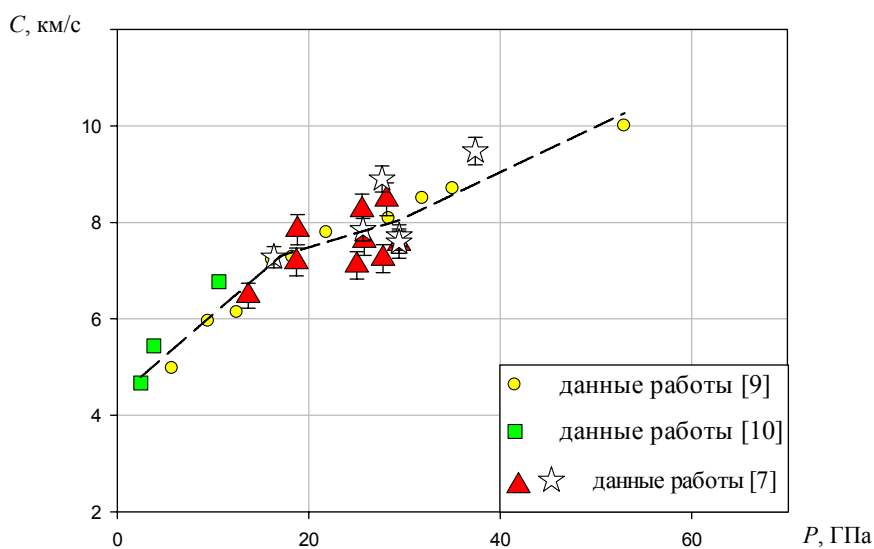


Рис. 11. Скорость звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле

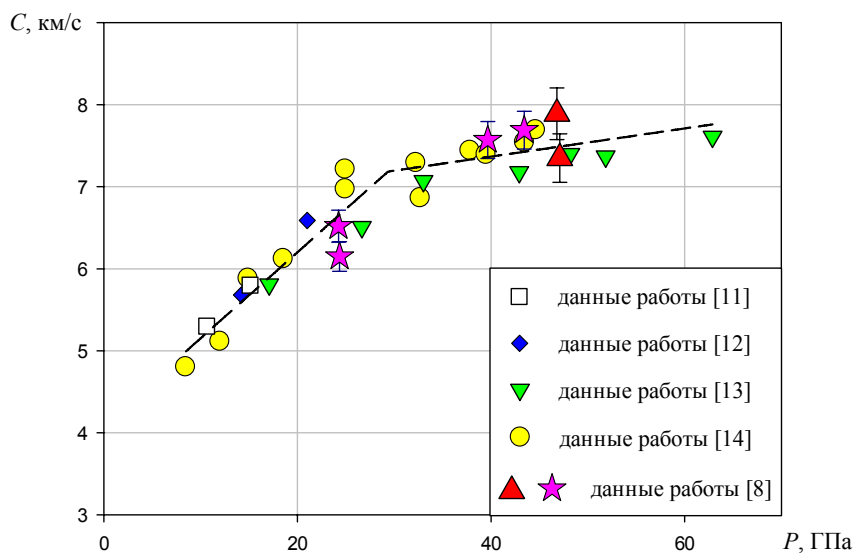


Рис. 12. Скорость звука в ударно-сжатом фторопласте

## Заключение

В результате работы отработана постановка взрывных экспериментов по определению скорости звука в ударно-сжатых материалах индикаторным методом с использованием пьезооптических датчиков. Получены экспериментальные данные по скоростям звука в ударно-нагруженных материалах: в стали 12X18H10T; в оксиде бериллия; в эпоксидном компаунде ЭК-34 и во фторопласте Ф-4.

Результаты настоящей работы хорошо согласуются с данными [4, 5, 9–14], полученными ранее с применением других методик регистрации параметров ударного сжатия. Таким образом, метод может быть распространён и на исследования других материалов.

## Литература

1. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография / Под ред. д-ра физ.-мат. наук Жерноклетова М. В. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 403.

2. Шапошников В. В. Электрические методы и средства регистрации процессов при исследовании характеристик взрывчатых веществ. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 200.

3. McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz L. N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545 // *Rev. Sci. Instrum.* 53. 1982. N2. P. 245–250.

4. Юсупов Д. Т., Сидоров К. С., Вильданов В. Г., Слободенюков В. М., Борщевский А. О., Ткачёв О. В. Экспериментальное определение скорости звука в волне разгрузки в нержавеющей стали 12X18H10T в диапазоне продольных напряжений 10–88 ГПа // Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 21–25 мая 2018 г.

5. Kozlov E. A., Pankratov D. G., Tkachev O. V., Yakunin A. K. Measurements of Sound Velocities in 12Kh18N10T Austenitic Steel in the Range of Longitudinal Stress up to 200 GPa for Calibration of Recent Elastic-Plastic Models // *International Conference*

SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER. Kiev, Ukraine, 16–21 September 2012 // INTERPRESS LTD, ISBN 978-966-088-3, 2012. P. 158–167.

6. LASL Shock Hugoniot Data. University of California press. Berkley, Los Angeles, 1980. P. 658.

7. Тарасов Ф. И., Смирнов Е. Б., Николаев А. Ю., Канунников Р. Н., Юсупов Д. Т., Малёв В. В., Лобачёв А. С., Сидоров К. С., Мухин Д. В. Определение скорости звука в ударно-сжатой эпоксидной смоле фотоэлектрическим методом // Международная конференция «XIV Забабахинские научные чтения». Сборник трудов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019.

8. Тарасов Ф. И., Смирнов Е. Б., Николаев А. Ю., Канунников Р. Н., Юсупов Д. Т., Малёв В. В., Лобачёв А. С., Сидоров К. С., Мухин Д. В. Определение скорости звука за фронтом ударных волн во фторопласте и эпоксидной смоле // Международная конференция «XXI Харитоновские тематические научные чтения». Сборник трудов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019.

9. Krupnikov K. K., Krupnikova V. P. Equation of state and matter transformation parameters under shock compression for epoxy resin. *Shock Waves*. Eds. Brun R., Dimitrescu L. Z. // Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995.

10. Мочалова В. М., Уткин А. В., Павленко А. В., Малюгина С. Н., Мокрушин С. С. Импульсное сжатие и растяжение эпоксидной смолы при ударно-волновом воздействии // *Журнал технической физики*. 2019. Т. 89, № 1. С.126–131.

11. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Ударное сжатие политетрафторэтилена до давлений ~1,7 Мбар // *ПМТФ*, 1972. № 4. С. 187–191.

12. Павловский М. Н. Измерение скорости звука в ударно-сжатом кварците, доломите, ангидриде, хлористом натрии, парафине, плексигласе, полиэтилене и фторопласте-4 // *ПМТФ*, 1976. № 5. С. 136–139.

13. Morris C. E., Fritz J. N., McQueen R. G. The Equation of State of Polytetrafluoroethylene to 80 GPa // *J. Chem. Phys.* 1984. Vol. 80 (10). P. 5203–5218.

14. Николаев А. Ю., Вильданов В. Г., Борщевский А. О., Ткачёв О. В., Заикин В. Т., Слободенюков В. М. Измерение скорости звука в ударно-сжатом фторопласте-4 в диапазоне давлений 1,5–45 ГПа // X научно-техническая конференция «Молодежь в науке». Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011.