

Ростилов Тимофей Андреевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СРЕДАХ С ЗАДАННОЙ  
ПОРИСТОСТЬЮ**

1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

**Научный руководитель:**

**Зиборов Вадим Серафимович**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории ударно-волновых воздействий ФГБУН Объединенного института высоких температур РАН

**Официальные оппоненты:**

**Медведев Сергей Павлович**

доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией гетерогенного горения ФГБУН Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

**Уткин Александр Васильевич**

кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией детонации ФГБУН Института проблем химической физики РАН

**Ведущая организация:**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт)

Защита состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 201\_\_ г. в \_\_\_\_\_ ч. \_\_\_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 24.1.193.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН и на сайте [jih.t.ru](http://jih.t.ru).

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 24.1.193.01,  
доктор физико-математических наук



М.М. Васильев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Исследования ударных волн (УВ) в пористых средах важны, поскольку позволяют определить особенности процессов разрушения пор при ударном сжатии, сопровождающихся повышенным разогревом вещества. С более практической точки зрения подобные исследования необходимы, когда требуются данные для точного предсказания отклика конкретного пористого материала на приложенную к нему ударную нагрузку во время его эксплуатации в составе какой-либо конструкции или объекта техники.

Повышенный разогрев пористого вещества оказывает прямое влияние на его ударную адиабату [1, 2]. Например, когда пористость вещества мала или умеренна, его ударная адиабата на плоскости давления – удельный объем будет тем выше отклонена от адиабаты сплошного вещества, чем больше его пористость. Если пористость вещества велика, то его ударная адиабата может принять аномальный вид, при котором большему давлению будут соответствовать большие удельные объемы [1, 3].

Другой особенностью пористых сред является расщепление в них ударной волны на волну-предвестник, в которой материал сжимается упруго, и пластическую ударную волну, в которой происходит закрытие пор и необратимая деформация вещества [4, 5, 6]. Упругое сжатие в предвестнике связывается со способностью стенок пор выдерживать определенную динамическую нагрузку не разрушаясь, при этом сжатие в этой волне вещества в целом, в зависимости от его структуры, может сопровождаться некоторой необратимой деформацией [5]. Двух-волновая конфигурация существует в определенных диапазонах давлений, при этом она характерна не для всех пористых сред [7] и наблюдается в различных сплошных [8].

Для изучения влияния размеров пор и их концентрации на ударно-волновые свойства пористой среды необходим удобный инструмент, позволяющий контролировать эти параметры. Таким инструментом могут служить микросферы (МС) – полые сферические частицы с характерными размерами от единиц до сотен и тысяч микрометров. Материалы, из которых изготавливаются микросферы, различны – среди них можно выделить стекло, металлы, полимеры. Толщины стенок МС варьируемы и, в общем случае, составляют несколько микрометров.

В работе представлены экспериментальные данные об одноосном ударном сжатии нескольких типов пористых сред. К первому типу относятся сферопластики, пористые полимерные композитные материалы (КМ), содержащие МС. Эти материалы широко применяются в технике и конструкциях различного назначения [9], в том числе таких, которые в ходе своей эксплуатации могут подвергаться ударным нагрузкам. Более того, они непосредственно применяются в качестве материалов, ослабляющих разрушительное действие УВ [9, 10].

Ко второму типу относится смесь стеклянные микросферы – вода, вещество, которое можно приближенно рассматривать в качестве инертного аналога эмульсионных взрывчатых веществ (ЭмВВ) малой плотности. ЭмВВ – промышленные взрывчатые вещества на основе эмульсионной матрицы, в которую добавляется порообразующий элемент – сенсibilизатор [11, 12]. Сенсibilизатор, которым могут служить микросферы различного состава, делает эмульсию, единственный энергетический компонент ЭмВВ, способной к детонации. Сравнение ударно-волновых свойств инертных и энергетических микросферических сред, может быть полезно при изучении связи процессов разрушения МС и детонации ЭмВВ.

Литературные данные по ударному сжатию инертных микросферических сред, чьи пористость и размер пор задаются концентрацией и типом МС, ограничены. При этом, поскольку относительно просто создавать как сами микросферические среды, так и варьировать их параметры пористости, они являются перспективными кандидатами для исследований особенностей распространения ударных волн в пористых средах в целом. Дальнейшее экспериментальное исследование ударной сжимаемости таких сред необходимо с целью апробации их применения в этой задаче, поиска их новых свойств и наработки экспериментального материала, который так же может быть полезен при решении практических задач.

К третьему типу исследованных сред относится прессованный порошок из наночастиц никеля (pnNi). Его пористость не связана с микросферами – интерес представляет рассмотрение ударной сжимаемости материала с наноразмерными порами. Также смесь наночастиц никеля и алюминия исследуется на предмет возможности протекания химической реакции образования интерметаллида алюминид никеля  $Al+Ni \rightarrow NiAl$  за фронтом УВ [13, 14]. Для дальнейшего анализа результатов экспериментов по ударному сжатию этой смеси необходимо знать ударно-волновые свойства её компонентов, в том числе и pnNi.

### **Цели и задачи исследования**

Общей целью настоящей работы являлось исследование аспектов распространения УВ в нескольких типах сред: эпоксидных сферопластиках и их матрице, смеси стеклянные микросферы – вода и прессованном порошке из наночастиц никеля – в диапазонах давлений, достижимых в экспериментах по соударению пластин на одноступенчатой пороховой метательной установке.

Для достижения обозначенной цели были поставлены и выполнены задачи:

1. Собрать и ввести в эксплуатацию доплеровский лазерный интерферометр VISAR [15] (*velocity interferometer for any reflector* – интерферометр для измерения скорости любой отражающей поверхности) для регистрации ударных волн в экспериментах. Подготовить пороховую метательную установку Стрела-2М для проведения экспериментов по одноосному ударному нагружению с применением VISAR.

2. Изучить влияние концентрации микросфер на ударно-волновые свойства сферопластиков, в том числе выполнить эксперименты с чистой эпоксидной смолой, служащей для них матрицей. Получить в экспериментах четыре группы данных: (i) ударные адиабаты, (ii) величины пределов упругости Гюгонио у сферопластиков, (iii) профили ударных волн, (iv) параметры, характеризующие фронты ударных волн. Рассмотреть особенности распространения волны-предвестника в сферопластике и её влияние на последующую пластическую ударную волну.
3. Исследовать отклик смеси стеклянные микросферы – вода на одноосное ударное сжатие: определить ударную адиабату вещества и провести регистрацию профилей ударных волн.
4. На основе результатов настоящей работы и литературных данных выявить общие закономерности в процессах распространения ударных волн в средах, содержащих микросферы.
5. Рассмотреть особенности распространения волны-предвестника и её влияние на пластическую ударную волну в прессованном порошке из наночастиц никеля.

#### **Научная новизна полученных результатов**

В экспериментах по соударению пластин впервые детально исследовано влияние концентрации стеклянных микросфер на ударно-волновые свойства эпоксидного сферопластика при давлениях до  $\sim 1$  ГПа. Обнаружено, что при больших объемных долях наполнителя, порядка 50%, ударная адиабата сферопластика принимает аномальный вид, связанный с разогревом, который претерпевает сильнопористая среда при ударном сжатии [3]. Рассмотрены особенности расчета ударно-волновых параметров при формировании двух-волновой конфигурации. Продемонстрировано понижение предела упругости Гюгонио с ростом концентрации МС, что согласуется с модельными представлениями об отклике пористой среды на ударную нагрузку [6].

Определены величины характеризующие фронты ударных волн: максимальная скорость продольной деформации во фронте волны, общее время нарастания фронта и эффективный коэффициент вязкости. Построены степенные соотношения, связывающие эти параметры и давление ударного сжатия. Рассмотрена эволюция фронтов предвестника и пластической ударной волны при их распространении на различные расстояния в сферопластике с объемной долей микросфер 55% при режиме нагружения 0.3 ГПа.

Обнаружено, что показатель степени  $n$  в зависимости максимальной скорости продольной деформации от давления ударного сжатия  $\dot{\epsilon}_x \sim p^n$  у полимеризованной эпоксидной смолы равен 5.5, что сильно превышает стандартное для сплошных сред значение 4 [16, 17]. Подробно рассмотрена эволюция фронта ударной волны в эпоксидной смоле и определены условия стационарного режима её распространения при давлении 1.3 ГПа.

Показано, что с ростом давления эффективный коэффициент вязкости эпоксидной смолы перестает зависеть от давления при 1.5 ГПа, в то время как у сферопластика с объемной долей микросфер 27% уже при 0.5 ГПа.

Измерена ударная адиабата и зарегистрированы профили ударных волн смеси стеклянные микросферы – вода в диапазоне давлений 0.17÷0.42 ГПа. Выполнено сравнение полученных результатов с представленными в литературе данными по ударной сжимаемости близких по составу микросфер и кварцевого порошка малой плотности; рассмотрено влияние структуры пор на переход ударной адиабаты к аномальному виду.

Отсутствие ярко выраженных волн-предвестников на профилях ударных волн смеси микросферы – вода и наличие их на профилях высоконаполненного сферопластика обозначило ключевую роль матрицы микросферической среды в формировании этих волн. При этом близость ударных адиабат и времен нарастания фронтов пластических ударных волн этих веществ позволяет судить о важном вкладе высокой концентрации микросфер в их ударно-волновые свойства.

Проведены эксперименты по ударному сжатию прессованного порошка из наночастиц никеля при давлениях 1.7 и 4.1 ГПа; наблюдалась сложная волновая картина, связанная с образованием предвестника. На примере рnNi и сферопластика рассмотрено влияние предвестника на результаты измерений и расчеты параметров ударного сжатия. Анализ двух-волновой структуры в рnNi показал, что полученные формы профилей ударных волн можно объяснить реверберациями предвестника. Из-за в некотором роде уникальных экспериментальных особенностей эффект от ревербераций в сферопластике, по сравнению с рnNi, был не так значителен.

### **Практическая и теоретическая ценность**

Ударные адиабаты и данные о структуре ударных волн, полученные в работе, являются опорным материалом как при построении уравнений состояния исследованных веществ, так и в целом при анализе процессов, сопровождающих разрушение пор при ударном сжатии, в независимости от типа среды.

Востребованность сферопластиков в сфере практических применений предполагает необходимость в знании их свойств в широких диапазонах параметров. Результаты работы могут позволить скорректировать существующие модели поведения сферопластиков при высокоскоростном ударе и иных ударных нагрузках.

Информация о смеси микросферы – вода, будет полезна при исследованиях ударно-волнового инициирования низкоплотных эмульсионных взрывчатых веществ и выявления основных процессов образования в них горячих точек при различных режимах нагружения.

В целом, совокупность полученного экспериментального материала по ударному сжатию микросферических сред вместе с имеющимися литературными данными закладывает основу для

использования этих веществ в исследованиях связи между параметрами пористости и ударно-волновыми свойствами.

Отдельно необходимо выделить результаты анализа фронтов ударных волн в ненаполненной эпоксидной смоле, поскольку они сильно отличаются от известных данных для других типов сплошных сред. Полученное для этого материала соотношение, связывающее скорость пластической деформации и давление, может послужить основой для развития теоретических воззрений о высокоскоростной деформации полимеров и композитов на их основе.

Сведения об ударной сжимаемости  $\text{pnNi}$  необходимы для наработки экспериментальных данных по ударной сжимаемости сред с наноразмерными порами в целом и, в частности для анализа процессов, в том числе химических, происходящих при ударном нагружении смесей порошков, включающих наночастицы никеля.

### **Методы исследования и экспериментальное оснащение**

Эксперименты по одноосному ударному нагружению образцов проводились на пороховой баллистической установке Стрела-2М с калибром 57 мм. Для измерения скорости ударников и контроля перекоса между соударяющимися поверхностями использовалась система контактных датчиков игольчатого типа. Регистрация профилей ударных волн осуществлялась с помощью лазерного доплеровского интерферометра VISAR [15]. Лазерный пучок с длиной волны 532 нм генерировался лазером МОЦАРТ-532-5W-s. Для записи сигналов использовались осциллографы Agilent Infiniium DSO90254A с полосой пропускания 2.5 ГГц и частотой дискретизации 20 Гвыб/с и Tektronix TDS 2024 (200 МГц, 2 Гвыб/с).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Ударные адиабаты и профили ударных волн эпоксидных сферопластиков с объемной долей стеклянных микросфер  $\varphi=27$  и 55% при давлениях  $0.50\div 1.28$  и  $0.16\div 0.70$  ГПа, соответственно. На плоскости давление – удельный объем ударная адиабата сферопластика с  $\varphi=55\%$  имеет аномальный вид. Предел упругости Гюгонио понижается с ростом концентрации микросфер.
2. Степенные соотношения, связывающие давление и параметры, характеризующие фронты пластических ударных волн в сферопластиках и эпоксидной смоле: максимальную скорость продольной деформации, эффективный коэффициент вязкости, время нарастания.
3. Показатель степени в зависимости максимальной скорости продольной деформации от давления ударного сжатия  $\dot{\epsilon}_x \sim p^n$  у полимеризованной эпоксидной смолы равен 5.5 при  $0.79\div 2.70$  ГПа и заметно превышает стандартное значение 4. Для верификации этого результата исследована эволюция фронта ударной волны при распространении её на

расстояния в диапазоне  $4.62 \div 14.57$  мм при 1.3 ГПа; рассмотрены условия достижения ударной волной стационарного режима распространения.

4. Ударная адиабата и профили ударных волн смеси стеклянные микросферы – вода в диапазоне давлений  $0.17 \div 0.42$  ГПа. Полученные данные свидетельствуют об аномальном виде ударной адиабаты на плоскости давление – удельный объем, аналогичном тому, что наблюдался у сферопластика с  $\phi=55\%$ . Профили ударных волн указывают на возможное формирование волны-предвестника крайне малой амплитуды.
5. Результаты экспериментов по одноосному ударному нагружению образцов прессованного порошка из наночастиц никеля при 1.7 и 4.1 ГПа. Проведен анализ сложной структуры фронтальной части профиля ударной волны в этом материале при 4.1 ГПа с учетом рассмотрения ревербераций предвестника в образце.

#### **Личный вклад автора**

Автор диссертации принимал ключевое участие в сборке и отладке интерферометра VISAR, планировании и постановке экспериментов по ударному сжатию на метательной установке Стрела-2М; обрабатывал результаты и участвовал в обсуждении полученных экспериментальных данных, выполнял расчеты. Все публикации, подготовленные при работе над диссертацией, написаны при непосредственном участии автора.

#### **Апробация результатов**

Результаты работы были представлены на конференциях: — Комплексная безопасность и физическая защита. VI Мемориальный семинар профессора Б.Е. Гельфанда. Санкт-Петербург, 2017; — International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Elbrus, Russia 2019, 2021; — XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, Москва, 2020; — 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 2020; — XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», 2021.

#### **Публикации по теме диссертации**

В рамках подготовки диссертации было опубликовано 12 печатных работ. Из них 3 – в рецензируемых журналах из списка ВАК, 9 – в трудах конференций. Список подготовленных публикаций приведен на с. 23.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список использованных сокращений, списки публикаций по теме настоящей работы и цитируемой литературы. Она состоит из 123 страниц текста, содержащих 43 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 110 наименований.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** описаны основные положения диссертации, её структура и объем научной работы, выполненной при её подготовке, представлен литературный обзор по теме исследования.

**В первой главе** рассмотрены различные схемы экспериментов по одноосному ударному нагружению конденсированных сред, методы расчета ударно-волновых параметров на основе результатов экспериментов и оборудование, с использованием которого проводились исследования.

Основные результаты работы связаны с измерениями профилей ударных волн в интересующих средах. Профиль УВ показывает, как меняется во времени один из параметров вещества при прохождении через него фронта волны. При изучении конденсированных сред широко применяются методы регистрации профилей давления и массовой скорости. Измерения проводятся для интересующего сечения образца – профиль характеризует ударно-волновой процесс именно в нем. Кроме измерения параметров вещества за фронтом УВ, профили позволяют изучать тонкую структуру фронта, явление откола [8], динамику перехода вещества из невозмущенного в ударно-сжатое состояние, фазовые и химические превращения [2], реверберации волн в образце.

Регистрация профилей давления может быть осуществлена с помощью манганиновых пьезорезисторов, кварцевых датчиков давления, различных пленочных датчиков давления [18]. Профили массовой скорости измеряются с помощью емкостных датчиков, магнитоэлектрических и интерферометрических методов [18].

В работе для регистрации профилей скорости исследуемых поверхностей образцов использовался интерферометр VISAR; он относится к типу неравноплечных сдвиговых интерферометров [19]. Принцип действия таких интерферометров основан на анализе интерференции лазерного пучка, отразившегося от исследуемой поверхности в разное время. Временная задержка осуществляется благодаря размещению в одном из плеч временной линии задержки. Детализированный анализ принципов работы VISAR и определения скорости исследуемой поверхности представлен в [19, 20].

Профиль скорости, измеренный с помощью этого интерферометра, изображен на рис. 1 – изначальный скачок скорости связан с прохождением через исследуемую границу фронта ударной волны; затем следует плато, на котором скорость держится вблизи определенной величины. Падение скорости при  $\sim 3$  мкс связано с приходом волны разгрузки с тыльной поверхности ударника.

Временное разрешение VISAR, оснащенного современными средствами регистрации, составляет  $\sim 1$  нс. На исследуемую поверхность фокусируется пучок диаметром  $\sim 100$  мкс; именно средняя скорость поверхности образца, покрытая пучком, и регистрируется интерферометром. Погрешность определения скорости составляет порядка нескольких м/с [21].

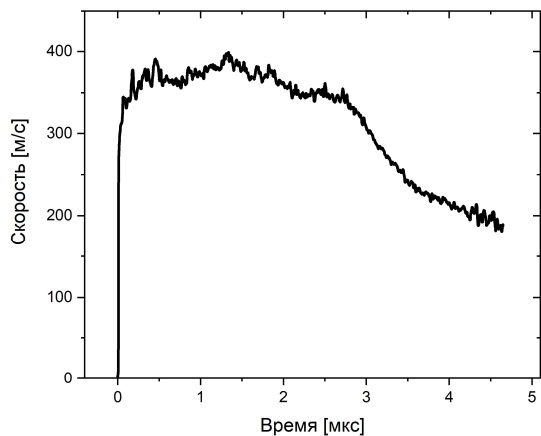


Рис. 1. (а) Профиль скорости на границе эпоксидная смола – водяное окно. Материал ударника – сплав алюминия Д16т, скорость ударника 419 м/с, толщина ударника 10 мм, толщина образца 5.29 мм.

Нагружение образцов осуществлялось на пороховой метательной установке Стрела-2М. Она предназначена для проведения экспериментов по одноосному ударному нагружению конденсированных сред; её схема изображена на рис. 2. В результате горения пороха снаряд, содержащий плоский ударник, разгоняется до необходимой скорости. Диапазон рабочих скоростей ударников – 250÷900 м/с, их диаметры определяются внутренним диаметром (калибром) ствола – 57 мм. Выстрелы проводятся при комнатной температуре. Экспериментальные сборки, содержащие образцы, размещаются в исследовательской камере, в которую через диагностическое окно вводится луч VISAR. В камере луч фокусируется на исследуемой поверхности образца с помощью одноразовой оптики.

Перед каждым экспериментом установка вакуумируется до остаточного давления воздуха менее 0.1 Торр для того, чтобы исключить влияние головной УВ, которая может возникнуть на поверхности ударника при движении в атмосфере, на измеряемый профиль скорости.

Измерение скорости ударника и контроль параллельности поверхностей соударения осуществляется с помощью системы двух пар контактных датчиков игольчатого типа (пинов), расположенных на заданных расстояниях. В экспериментах скорость ударной волны рассчитывается по известным толщинам образцов и измеряемым меткам времени её входа в образец и выхода. Эти метки регистрируются с помощью системы датчиков и VISAR. Погрешность определения скорости ударника составляет около 1%, а скорости ударной волны 2÷4%.

Наряду изложением основ расчета массовой скорости  $u_p$  и давления  $p$  за фронтом УВ по методам отражения и торможения [22] в главе также представлены принципы определения параметров, характеризующих фронт УВ в конденсированной среде – максимальной скорости продольной деформации во фронте волны, общего времени нарастания фронта и эффективного коэффициента вязкости. Определение этих величин строится на анализе структуры фронта, отображенной на измеренном профиле скорости.

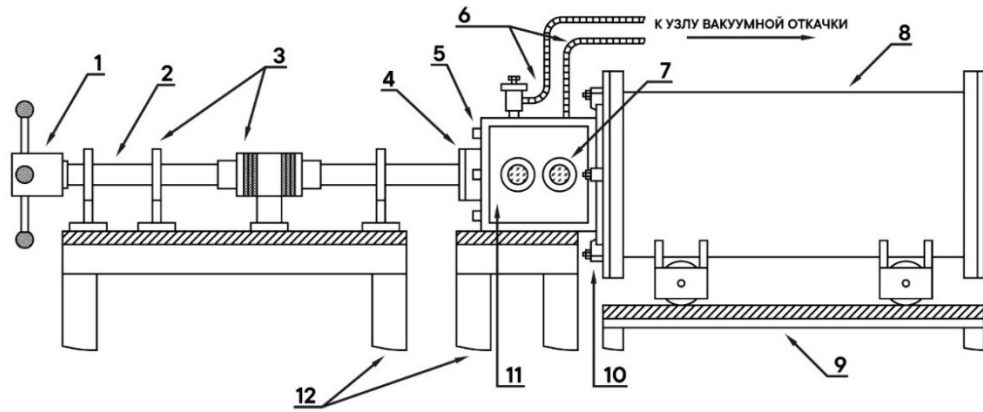


Рис. 2. Схема установки Стрела-2М: 1 – казённая часть, 2 – ствол с внутренним диаметром 57 мм, 3 – крепления ствола, 4 – ввод ствола в диагностическую камеру, 5 – система вакуумных вводов, 6 – ввод системы вакуумной откачки в диагностическую камеру, 7 – диагностические окна, 8 – приемная камера, 9 – каретка приемной камеры с пневматическим управлением (полностью не изображена), 10 – крепление диагностической и приемной камер, 11 – исследовательская камера, 12 – основания столов

На рис. 3 изображена структурированная фронтальная часть идеализированного профиля массовой скорости. Под структурированностью [17] понимается отличие формы фронта от скачка скорости, который имел бы место, если время нарастания фронта было бесконечно мало. На рис. 3 фронт имеет форму сигмоиды, реально наблюдаемую в эксперименте. Используя профиль массовой скорости можно определить максимальный градиент массовой скорости или максимальное ускорение  $\dot{u}_p$ , приобретаемое веществом при прохождении через него ударной волны (рис. 3):  $\dot{u}_p = \Delta u_p / \Delta \tau$ , где  $\Delta u_p$  – скачок скорости на участке максимального ускорения,  $\Delta \tau$  – длительность этого участка. Поскольку профили скорости свободных поверхностей образцов или границ образец – окно не всегда являются профилями массовой скорости, на основе их анализа определяется величина максимального ускорения именно этих поверхностей  $\dot{u}_i = \Delta u_i / \Delta \tau$ , где  $\Delta u_i$  – скачок скорости на участке максимального ускорения на измеренном профиле. При этом подход к измерению аналогичен изображенному на рис. 3.

Если регистрируется профиль границы образец – окно, то  $\dot{u}_p$  получается путем умножения  $\dot{u}_i$  на величину, равную отношению рассчитанной массовой скорости  $u_p$  к скорости  $u_i$ , достигаемой на плато за фронтом на профиле:

$$\dot{u}_p = \dot{u}_i \frac{u_p}{u_i}. \quad (1)$$

Корректировка в соотношении (1), отражает тот факт, что амплитуда скорости за фронтом волны, наблюдаемая на профиле, соответствует состоянию на ударной адиабате окна.

Максимальная скорость продольной деформации  $\dot{\epsilon}_x$  [с<sup>-1</sup>] рассчитывается по соотношению [16, 23]:  $\dot{\epsilon}_x = \dot{u}_p / D$ , где  $D$  – скорость ударной волны. Далее для удобства изложения величина  $\dot{\epsilon}_x$  будет именоваться просто как “скорость деформации”.

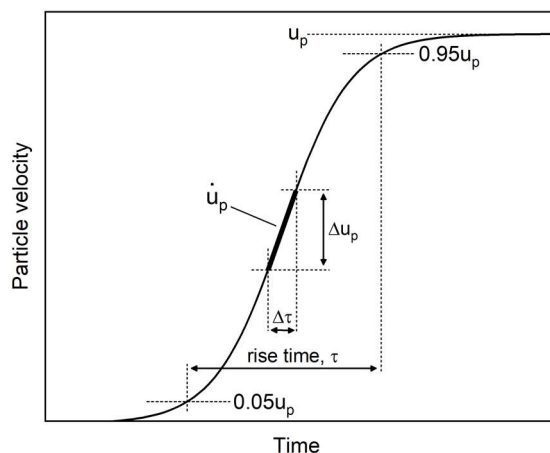


Рис. 3. Пояснение к измерению максимального градиента скорости во фронте волны (выделен жирным отрезком) и общего времени нарастания фронта.

Давление и скорость деформации связаны эмпирической зависимостью степенного вида [16, 17]:

$$\dot{\epsilon}_x = N p^n, \quad (2)$$

где  $N$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала. Для различных сплошных однородных и некоторых гетерогенных твердых материалов показатель степени  $n \approx 4$  [16, 17], для сплошных гетерогенных сред различной природы в целом характерно  $1 < n < 4$  [25, 26], для порошков  $n \approx 1$  [17, 25, 26], для различных жидкостей  $1 < n < 3$  [23, 27].

Соотношение  $\dot{\epsilon}_x \sim p^4$  называется законом четвертой степени (ЗЧС) [17]. Он был сформулирован в работах [16, 28], где на основе анализа профилей скорости, полученных интерферометрическими методами, были определены зависимости  $\dot{\epsilon}_x(p)$  для шести металлов (Al, Be, Bi, Cu, Fe, U), оксида магния MgO и плавленного кварца SiO<sub>2</sub>.

Оценка эффективного коэффициента вязкости ударно-сжатого вещества может быть выполнена по формуле [18, 28]:  $\eta = \theta_m / \dot{\epsilon}_x$ , где  $\theta_m$  – максимальное значение напряжения сдвига при ударном сжатии. Оно определяется по соотношению  $\theta = (3/4)\Delta p$ , где  $\Delta p$  – разница между величинами давления на линии Рэлея и ударной адиабате при одинаковом удельном объеме [23, 28].

Скорость деформации и эффективный коэффициент вязкости связаны степенной зависимостью вида [17, 28]:

$$\eta = M \dot{\epsilon}_x^{-m}, \quad (3)$$

где  $M$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала, а показатель степени  $m=0.5$  характерен для веществ, для которых справедлив ЗЧС.

В то время как скорость деформации характеризует участок максимального роста скорости, величина времени нарастания  $\tau$  характеризует полную длительность фронта. В работе оно измерялось по отрезку, составляющему от 5 до 95% от максимальной амплитуды скорости за фронтом волны на профиле (рис. 3).

Время нарастания фронта уменьшается с ростом давления согласно степенному соотношению:

$$\tau = Rp^{-r}, \quad (4)$$

где  $R$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала, а показатель степени  $r=3$  является стандартным значением у веществ, для которых справедлив ЗЧС.

Изучение степенных соотношений вида (2) – (4) важно с точки зрения поиска различий и общих закономерностей в процессах, определяющих структуру фронтов в разнообразных конденсированных средах.

Определение скорости деформации и остальных величин, характеризующих фронт волны, должны проводиться для УВ, распространяющихся в стационарном режиме [4, 23, 30]. Такой режим устанавливается при прохождении волной определенного расстояния, зависящего от материала и давления нагружения. При его достижении устанавливается равновесие между процессами, влияющими на скорость ударной волны и форму её фронта [17]. Упомянутые процессы связаны с вязкостью, теплопроводностью и прочностными свойствами вещества. Скорость каждого участка фронта стационарной УВ практически не изменяется по мере её распространения в материале. Использование результатов экспериментов, в которых толщины образцов были меньше, чем расстояние, необходимое УВ для достижения стационарности, при построении степенных соотношений приводит к некорректному результату [17].

**Во второй главе** рассмотрены аспекты распространения ударных волн в пористых средах и композитных материалах; приведены детали экспериментальной сборки и параметры образцов сферопластиков и эпоксидной смолы, служившей для них матрицей; представлены результаты экспериментов по их одноосному ударному сжатию.

Экспериментальная сборка и общая схема эксперимента изображена на рис. 4а. В некоторых экспериментах экран отсутствовал и ударник соударялся сразу с образцом. Сборка клеивалась в монтажное кольцо, в котором также устанавливались датчики-пины (рис. 4а, б). Далее кольцо размещалось в креплении внутри исследовательской камеры у конца ствола.

Материал ударников – сплав алюминия Д16т или медь, экранов – Д16т. Толщины ударников составляли  $6 \div 14$  мм, экранов –  $1.8 \div 1.9$  мм. В качестве отражающего слоя использовалась алюминиевая фольга толщиной  $7 \div 25$  мм. Диаметры образцов составляли от 20 до 40 мм; они определяли диаметры окон и экранов. Толщины образцов  $h_s$  лежали в диапазоне  $2.4 \div 14.6$  мм.

Исследованы три типа образцов: эпоксидный сферопластик с объемной долей микросфер  $\varphi=27\%$ , эпоксидный сферопластик с  $\varphi=55\%$  и их матрица – полимеризованная эпоксидная смола, ( $\varphi=0\%$ ). Далее в тексте эти материалы будут упоминаться как СФ27, СФ55 и ЭС, соответственно.

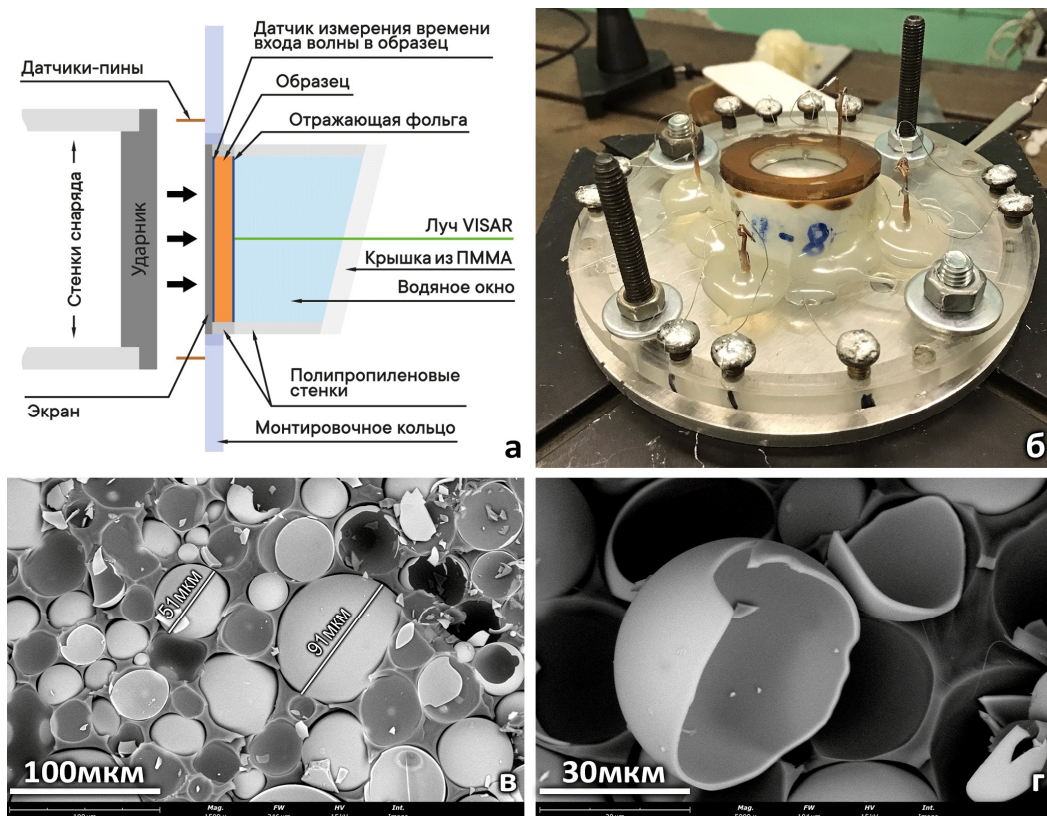


Рис. 4. (а) Схема эксперимента (вторая пара пинов не показана). (б) Фотография экспериментальной сборки. (в), (г) Микрофотографии высоконаполненного сферопластика СФ55.

Таблица 1. Параметры образцов.

Обозначение	Объемная доля МС $\phi$ , %	Массовая доля МС $m$ , %	Плотность $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Рассчитанный коэффициент пористости $k$
СФ27	27	10	0.90±0.02	1.4
СФ55	55	25	0.64±0.02	2.1
ЭС	-	-	1.15±0.01	-

Образцы ЭС изготавливались из низковязкой модифицированной эпоксидной диановой смолы Этал-370, в которую добавляли отвердитель аминного типа Этал-45М в соотношении по объему 1:2. При подготовке образцов сферопластиков в смесь эпоксидной смолы и отвердителя добавлялось необходимое количество стеклянных МС со средним диаметром ~83 мкм и толщиной стенки ~1 мкм. Смеси сутки отвердевали при комнатных условиях. Параметры образцов представлены в таблице 1. Микроструктура СФ55 и микросфер изображена на рис. 4в, г.

В экспериментах скорость ударников составляла от 256 до 829 м/с. Диапазоны исследованных давлений составили  $0.504 \div 1.279$ ,  $0.158 \div 0.697$ ,  $0.792 \div 2.696$  ГПа для СФ27, СФ55 и ЭС соответственно. При таких режимах нагружения профили сферопластиков имеют ступенчатый вид, связанный с расщеплением вошедшей в образец УВ (рис. 5). Вначале на исследуемую поверхность выходит предвестник, за ним следует пластическая УВ, в которой микросферы полностью или частично разрушаются. Профили ЭС подобной структурой не обладают.

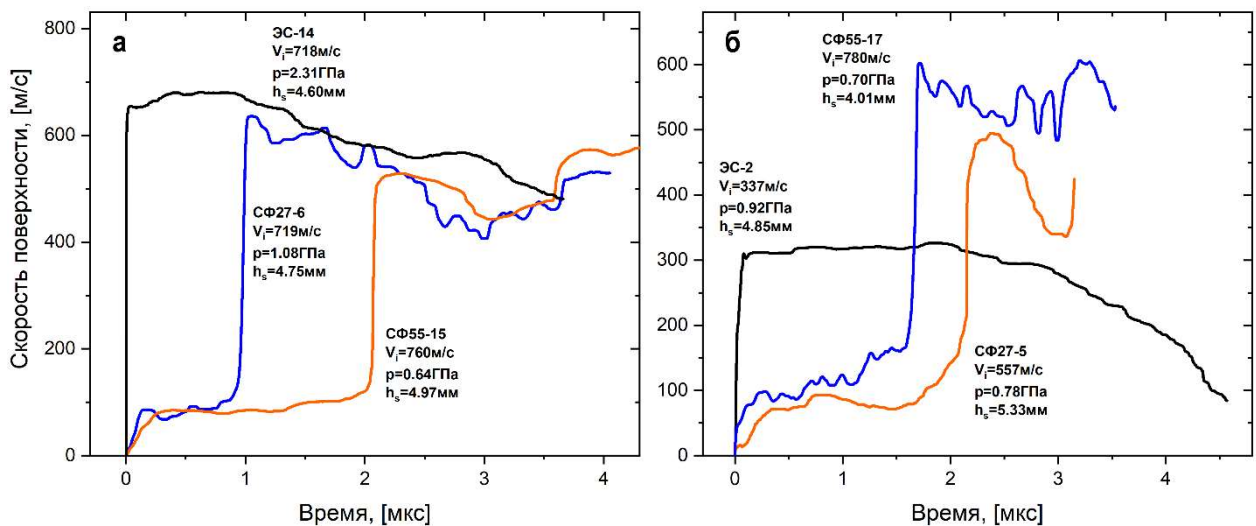


Рис. 5. Профили скорости СФ27, СФ55 и ЭС при (а) близких скоростях ударников  $\sim 730$  м/с и (б) давлениях  $\sim 0.8$  ГПа.

Третий скачок скорости на профилях сферопластиков (например, в эксперименте СФ27-5 при  $\sim 3$  мкс на рис. 5б) связан с реверберацией УВ в образце, которая была возможна из-за того, что динамические жесткости экрана и окна были выше, чем у материалов этих образцов. Падение скорости после третьего скачка или между вторым и третьим вызвано волной разгрузки, пришедшей с тыльной поверхности ударника.

При формировании двух-волновой конфигурации в расчетах параметров ударного сжатия необходимо учитывать, что пластическая УВ распространяется по веществу, сжатому предвестником до плотности большей начальной и которому уже сообщена некоторая массовая скорость. В работе приведена детальная методика таких расчетов.

В исследованных диапазонах массовых скоростей экспериментальные точки на плоскости  $D - u_p$  линейно аппроксимировались в виде  $D = c_0 + bu_p$  с размерностью [км/с]:

$$D = -0.10 + 1.96u_p, \quad 0.309 \leq u_p \leq 0.734 \text{ км/с}, \quad \varphi = 55\%, \quad (5)$$

$$D = 0.37 + 2.19u_p, \quad 0.273 \leq u_p \leq 0.693 \text{ км/с}, \quad \varphi = 27\%, \quad (6)$$

$$D = 2.64 + 1.55u_p, \quad 0.233 \leq u_p \leq 0.656 \text{ км/с}, \quad \varphi = 0\%, \quad (7)$$

На плоскости  $D - u_p$  ударные адиабаты лежат тем ниже, чем больше концентрация МС и пористость (рис. 6а), что находится в согласии с экспериментальными данными по ударному сжатию пористых сред [1]. Скорости предвестников у СФ27 и СФ55 в целом согласуются с адиабатой ЭС, если экстраполировать её в область малых значений  $u_p$ . Вероятно, это обстоятельство отражает ключевую роль матрицы в формировании предвестника в сферопластиках.

Ударные адиабаты в координатах  $p - V$  содержат ряд особенностей (рис. 6б). Во-первых, адиабаты СФ27 и СФ55 имеют ступенчатый вид, связанный с их упругопластическими свойствами. Предел упругости Гюгонио понижается с ростом концентрации микросфер, его усредненные



значения для СФ27 и СФ55 равны  $0.22 \pm 0.07$  ГПа и  $0.12 \pm 0.04$  ГПа, соответственно. Во-вторых, адиабата СФ55 в области пластического сжатия имеет аномальный вид – большим давлениям соответствуют большие удельные объемы, что является следствием значительного разогрева сильнопористого вещества в УВ [3]. В-третьих, состояния за пластической волной для обоих сферопластиков лежат между адиабатами ЭС и стекла (если не учитывать области частичного разрушения пор при малых давлениях), поскольку массовая доля стекла в этих материалах оказывает влияние на их ударную сжимаемость. При этом очевидно, что с ростом давления адиабата СФ55 пересечет адиабату ЭС. Чем больше концентрация стеклянных МС, тем ближе к ударной адиабате стекла лежит начальный участок пластической части адиабаты сферопластика.

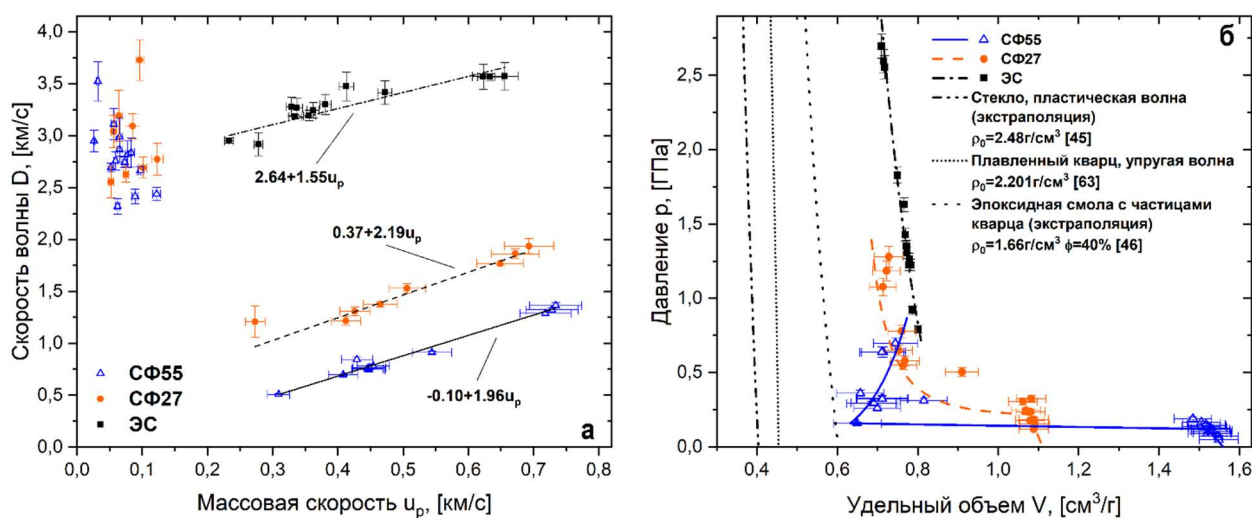


Рис. 6. Ударные адиабаты ЭС, СФ27, СФ55: (а) в координатах скорость волны – массовая скорость, (б) в координатах давление – удельный объем.

Результаты определения параметров соотношений (2) – (4) представлены на рис. 7. Оценка эффективного коэффициента вязкости для СФ55 не выполнялась ввиду аномального вида его ударной адиабаты. При построении степенных соотношений в форме (2) и (3) для сферопластиков вместо величины давления за фронтом пластической УВ  $p_2$  использовалась величина скачка давления именно в этой волне  $p_2 - p_1$  [16]. В работе [A1] использовалась величина  $p_2$ , и значения экспонент  $n$  и коэффициентов  $N$  несколько отличались от представленных на рис. 7.

В то время, как значения показателя степени  $n$  для сферопластиков имеют значения, характерные для гетерогенных сред ( $1 < n < 4$ ), величина  $n = 5.5$  у эпоксидной смолы не согласуется с ЗЧС. Расхождение может быть следствием отличий механизмов пластической деформации металлов, для которых преимущественно и выполняется  $n \approx 4$ , и полимеров [31].

В работе проведен анализ стационарности ударных волн в экспериментах сферопластиком СФ55 и эпоксидной смолой. Было показано, что в большинстве экспериментов с этими веществами УВ распространялись в режимах как минимум близких к стационарным.



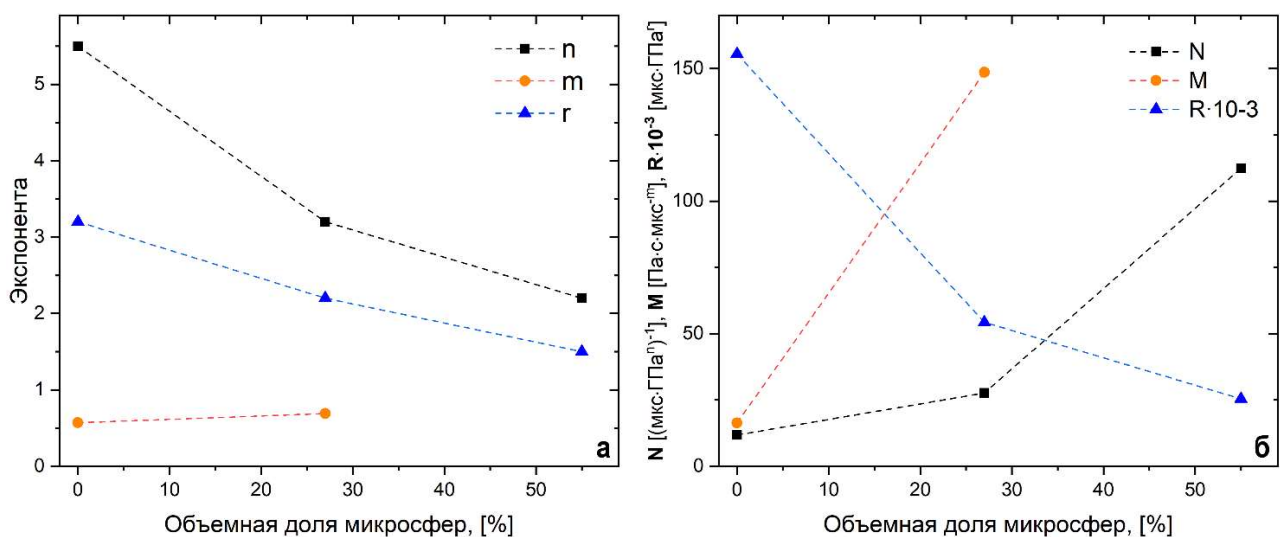


Рис. 7. Графики зависимости: (а) экспонент  $n$ ,  $m$ ,  $r$  и (б) коэффициентов пропорциональности  $N$ ,  $M$ ,  $R$  от объемной доли микросфер  $\phi$ .

У эпоксидной смолы показатель степени в соотношении (3) равен 0.57, что близко к стандартному 0.5. При этом из-за недостатка экспериментальных данных по ходу такой зависимости у различных веществ не понятно является ли разница между  $m=0.57$  и 0.5 такой же существенной, как между  $n=5.5$  и 4. В случае соотношения (4) можно с уверенностью говорить, что полученный для ЭС показатель степени  $r=0.32$  не сильно отличается от стандартного значения 0.3, поскольку у алюминия  $r=0.312$  в широком диапазоне давлений [24]. Данные соотношениям (3), (4) для сферопластиков демонстрируют, как могут изменяться их показатели степени и коэффициенты пропорциональности с ростом пористости.

По результатам исследования можно сделать вывод, что поведение сферопластиков при ударном сжатии в диапазоне относительно небольших давлений является сложным и обусловлено тремя особенностями: повышенным разогревом из-за теплового эффекта, формированием предвестника и гетерогенной структурой образца.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментов по одноосному ударному сжатию смеси полые стеклянные микросферы – вода и проведен сравнительный анализ ударно-волновых свойств микросферических сред.

В области разрушенной в ударной волне микросферы возникает локальное повышение температуры – *горячая точка* [32]. К механизмам образования горячих точек относятся: адиабатическое сжатие газа, заключенного в поре; вязкое внутреннее трение вещества, втекающего в пору, о её стенки; формирование кумулятивной микроструи, бьющейся о поверхность поры [11, 33]. Температура горячих точек в ЭМВВ и сферопластиках может в разы превышать температуру ударно-сжатой матрицы [11, 33].

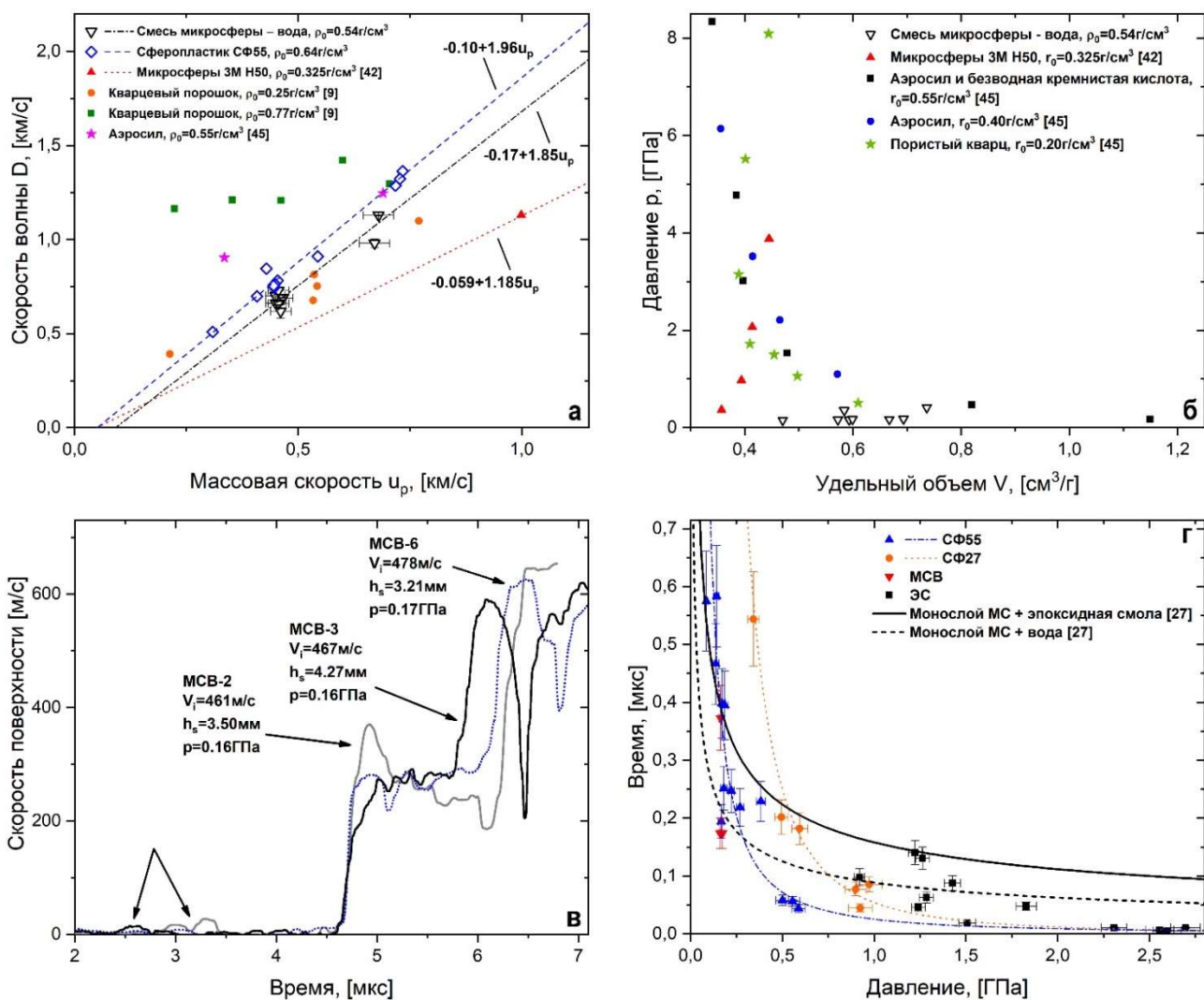


Рис. 8. Ударные адиабаты: (а) МСВ, чистых МС [34], аэросила [22] и порошков кварца [7] в координатах скорость волны – массовая скорость; (б) МСВ, чистых МС [34] и пористого кварца различной природы [22] в координатах давление – удельный объем. (в) Профили скорости границы образец – водяное окно, они отцентрированы по первому скачку скорости – начальный отсчет времени произволен. (г) Зависимости времен нарастания фронтов и формирования горячих точек от давления.

Для создания образцов использовались стеклянные МС со средним диаметром  $\sim 83$  мкм и толщиной стенки  $\sim 1$  мкм, аналогичные использованным в главе 2 для сферопластиков. В россыпь микросфер, заключенную в стенки экспериментальной сборки, медленно наливали воду до момента её появления над поверхностью россыпи – излишки воды снимались. Плотности смеси и массовая доля МС в ней составили  $0.54 \text{ г/см}^3$  и 28%, соответственно.

Постановка эксперимента и геометрия сборок были такие же как в экспериментах со сферопластиком (рис. 4а). Использовались экраны и ударники из сплава Д16т. Толщины ударников составляли 10 мм, образцов – от 3.5 до 7 мм.

В экспериментах ударники разгонялись до скоростей в диапазоне 460÷708 м/с, что приводило к нагружению образцов до давлений 0.15÷0.42 ГПа. Экспериментальные точки на плоскости  $D - u_p$  описываются линейным соотношением вида  $D = c_0 + bu_p$  с размерностью [км/с]:

$$D = -0.17 + 1.85u_p, \quad 0.449 \leq u_p \leq 0.680 \text{ км/с.} \quad (8)$$

Ударная адиабата МСВ (8) близка к адиабате СФ55 (5) (рис. 8а), что свидетельствует о существенном влиянии микросфер на ударно-волновые свойства сред с большими концентрациями этого наполнителя. Она также лежит рядом с экспериментальными точками, полученными для кварцевого порошка ( $\rho_0=0.25 \text{ г/см}^3$ ) [7] и аэросила ( $\rho_0=0.55 \text{ г/см}^3$ ) [22], и выше адиабаты чистых стеклянных МС с  $\rho_0=0.325 \text{ г/см}^3$  и средним диаметром частиц 34.1 мкм [34].

На плоскости  $p - V$  (рис. 8б) большим давлениям соответствуют большие удельные объемы, что свидетельствует об аномальном ходе ударной адиабаты МСВ уже при 0.16 ГПа. Однако, диапазон исследованных давлений слишком мал, чтобы делать дальнейшие выводы.

Профили скорости на границе образец МСВ – вода имеют ступенчатую структуру, которая, однако, не связана с формированием предвестника (рис. 8в). Первоначальный скачок скорости до 250÷300 м/с связан с выходом пластической УВ на исследуемую поверхность, а второй скачок до 600÷650 м/с с её переотражением внутри образца. Волна разгрузки, пришедшая с тыльной поверхности ударника, вызывает падение скорости за вторым скачком. Интересной особенностью профилей МСВ-2 и 3 является малый скачок скорости перед первым появлением пластической волны (отмечен стрелками на рис. 8в). Однако, полученных данных недостаточно для того, чтобы связать этот скачок скорости с предвестником той или иной природы [5]. Отсутствие ярко выраженных предвестников в МСВ при относительно невысоких давлениях, по сравнению со сферопластиками, свидетельствует о значительной роли матрицы при формировании этих волн.

На рис. 8г изображены зависимости времени нарастания фронта ударной волны от давления для СФ27, СФ55, ЭС, МСВ и зависимости времени формирования горячей точки от давления для монослоев стеклянных микросфер, заполненных эпоксидной смолой или водой [33]. Времена нарастания фронта (СФ27, СФ55) и формирования горячей точки (монослой) наиболее заметно уменьшаются с ростом давления при 0.25÷1 ГПа; при этом на уровне 0.5 ГПа время нарастания фронта в СФ55 на ~150 нс меньше, чем время формирования горячей точки в эпоксидном монослое. Близость времен нарастания СФ55 и МСВ является, наряду с данными по их ударным адиабатам, подтверждением того, что их свойства во многом определяются параметрами микросфер.

**В четвертой главе** рассмотрена структура ударной волны в прессованном порошке из наночастиц никеля при относительно невысоких давлениях. Описано влияние ревербераций волны-предвестника внутри образца на результаты экспериментов.

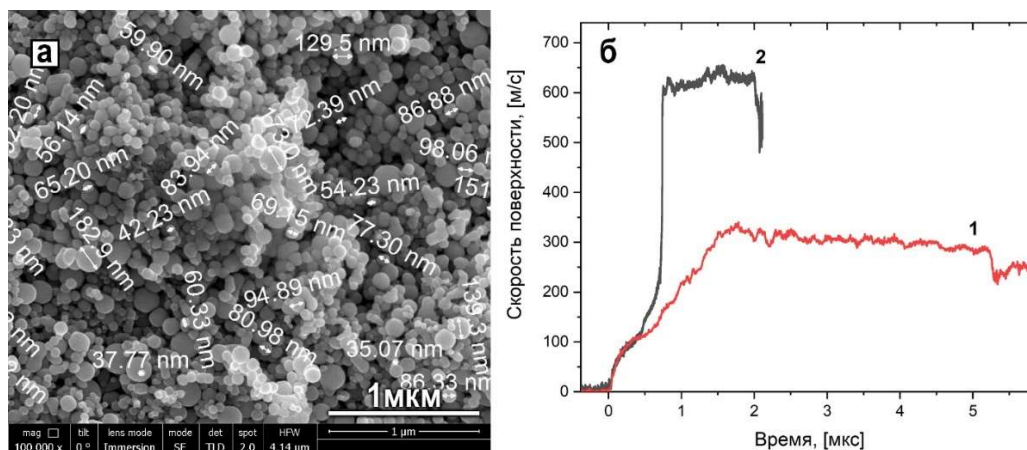


Рис. 9. (а) Наноструктура pNi. (б) Профили скорости границы образец – водяное окно в экспериментах с pNi. В качестве начала отсчета выбрано первое появление предвестника на исследуемой границе.

Таблица 2. Параметры ударного сжатия pNi.

№	$V_i$ , м/с	$h_s$ , мм	Предвестник			Пластическая ударная волна			
			$D_1$ , км/с	$p_1$ , ГПа	$u_{p1}$ , км/с	$D_2$ , км/с	$\bar{D}_2$ , км/с	$p_2$ , ГПа	$u_{p2}$ , км/с
1	296	2.10	2.441	0.463	0.040	-	1.248	1.672	0.249
2	837	2.06	2.604	0.490	0.040	1.486	1.442	4.108	0.579

Образцы подготавливались путем прессования наночастиц никеля в среде, заполненной аргоном. Средний размер частиц составлял порядка 35÷55 нм (рис. 9а). Когда образцы оказывались в воздушной атмосфере, они начинали окисляться кислородом – в результате через сутки их масса увеличивалась на 2% и далее не менялась. Плотность образцов составила 4.72 г/см<sup>3</sup> ( $k=1.98$ ).

Схема экспериментов изображена на рис. 4а. Толщины образцов, скорости ударников и параметры ударного сжатия приведены в таблице 2. В эксперименте 1 использовался медный ударник толщиной 12.92 мм, а в эксперименте 2 ударник из сплава Д16т с толщиной 10.00 мм, экраны не использовались.

На рис. 9б изображены профили скорости на границе образец – водяное окно в экспериментах 1 и 2. Фронтные части обоих профилей имеют ярко выраженную волнообразную форму, связанную с многократными реверберациями предвестника между исследуемой поверхностью и надвигающимся фронтом пластической УВ. Каждое взаимодействие предвестника и пластической УВ приводит к замедлению последней. В работе с использованием хт-диаграммы для эксперимента 2 проведена оценка истинной скорости пластической УВ  $D_2$  (скорости УВ до первого взаимодействия с отраженным предвестником). Она оказалась равна 1.486 км/с, что больше наблюдаемой скорости пластической волны  $\bar{D}_2$  на 3%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов более чем 50 экспериментов по одноосному ударному сжатию сферопластиков, эпоксидной смолы, смеси микросферы – вода при давлениях от десятых долей до единиц ГПа и литературных данных по средам, содержащим микросферы, были определены общие закономерности и различия в процессах ударного сжатия этих веществ.
2. Ударные адиабаты смеси стеклянные микросферы – вода и высоконаполненного сферопластика близки, что свидетельствует о сильном влиянии большой концентрации микросфер на их ударно-волновые свойства. При этом на профилях ударных волн эпоксидных сферопластиков наблюдалась отчетливая двух-волновая конфигурация, связанная с выделением волны-предвестника, в то время как остается открытым вопрос о формировании подобной конфигурации в смеси микросферы – вода. Это позволяет сделать вывод о ключевой роли матрицы в формировании предвестника. Предел упругости Гюгонио у сферопластиков с одинаковыми матрицей и типом микросфер понижается с ростом объемной доли наполнителя, и как следствие, пористости – со значения 0.22 ГПа при  $\varphi=27\%$  до 0.12 ГПа при  $\varphi=55\%$ .
3. При высокой объемной доле микросфер ( $\varphi=55\%$ ) ударная адиабата эпоксидного сферопластика на плоскости давление – удельный объем в области пластического сжатия имеет аномальный вид, при котором большим давлениям соответствуют большие удельные объёмы. Такой вид является следствием сильного разогрева высокопористого вещества в ударной волне. Данные по смеси микросферы – вода также свидетельствуют об аномальном виде её ударной адиабаты.
4. Для сферопластиков и эпоксидной смолы определены эмпирические степенные соотношения, связывающие максимальную с скорость продольной деформации  $\dot{\epsilon}_x$ , эффективный коэффициент вязкости  $\eta$ , время нарастания фронта ударной волны  $\tau$  и давление  $p$ . Подобные соотношения для этих материалов ранее не были представлены в литературе. У эпоксидной смолы показатель степени  $n$  в соотношении  $\dot{\epsilon}_x \sim p^n$  равен 5.5, что превышает значение  $n \approx 4$ , характерное для многих металлов и некоторых других сплошных материалов. Расхождение может отражать тот факт, что механизмы пластической деформации полимеров и металлов существенно различаются. Полученный результат является новым и требует дальнейшей экспериментальной и теоретической верификации. У сферопластиков показатель степени  $n$  понижается с ростом концентрации микросфер и лежит в диапазоне  $1 < n < 4$ , что согласуется с имеющимися данными по пористым и гетерогенным средам. Данных по соотношениям  $\eta \sim \dot{\epsilon}_x^{-m}$  и  $\tau \sim p^{-r}$  в литературе представлено

значительно меньше, чем по  $\dot{\epsilon}_x \sim p^n$ , особенно для пористых сред. Можно лишь сделать вывод о том, что у эпоксидной смолы значения экспонент  $n$  и  $m$  близки к стандартным 3 и 0.5, соответственно.

- Исследована структура ударной волны в прессованном порошке из наночастиц никеля при 1.7 и 4.1 ГПа. Сложная структура профиля ударной волны, наблюдаемая в экспериментах, объяснена с помощью рассмотрения ревербераций волны-предвестника между исследуемой поверхностью и фронтом пластической ударной волны. Из-за этих ревербераций ударное нагружение образца неоднородно, поскольку скорость ударной волны понижается при каждом взаимодействии с отраженным предвестником. Таким образом, ударное сжатие  $p$ - $n$  в области давлений, при которых формируется двух-волновая конфигурация, определяется не только его свойствами и режимом нагружения, но и толщиной образца, которая напрямую влияет на количество ревербераций.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Медведев А.Б., Трунин Р.Ф. Ударное сжатие пористых металлов и силикатов // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 8. С. 829–846.
- Dattelbaum D.M., Coe J.D. Shock-driven decomposition of polymers and polymeric foams // *Polymers*. 2019. V. 11. № 3. 493.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1996. 688 с.
- Davison L. Shock-wave structure in porous solids // *J. Appl. Phys.* 1971. V. 42. № 13. P. 5503–5512.
- Boade R.R. Compression of Porous Copper by Shock Waves // *J. Appl. Phys.* 1968. V. 39. № 12. P. 5693–5702.
- Herrmann W. Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials // *J. Appl. Phys.* 1969. V. 40. № 6. P. 2490–2499.
- Borg J.P., Chapman D.J., Tsembeles K. et al. Dynamic compaction of porous silica powder // *J. Appl. Phys.* 98, 073509 (2005).
- Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 248 с.
- Gupta N., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., Pinisetty D. Applications of polymer matrix syntactic foams // *JOM*. 2014. V. 66. № 2. P. 245–254.
- Pradel P., Malaise F., de Resseguier T. et al. Stress wave propagation and mitigation in two polymeric foams // *AIP Conference Proceedings* 1979. 2018. 110015.
- Юношев А.С., Пластинин А.В., Сильвестров В.В. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // *ФГВ*. 2012. Т. 45. № 3. С. 79–88.
- Юношев А.С., Сильвестров В.В., Пластинин А.В., Рафейчик С.И. Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // *ФГВ*. 2017. Т. 53. № 2. С. 91–97.
- Якушев В.В., Ананьев С.Ю., Уткин А.В., Жуков А.Н., Долгобородов А.Ю. Ударная сжимаемость смесей микро- и наноразмерных порошков никеля и алюминия // *ФГВ*. 2018. Т. 54. № 5. С. 45–50.
- Якушев В.В., Ананьев С.Ю., Уткин А.В., Жуков А.Н., Долгобородов А.Ю. Скорость звука в ударно-сжатых образцах из смеси микро- и нанодисперсных порошков никеля и алюминия // *ФГВ*. 2019. Т. 55. № 6. С. 108–114.
- Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. P. 4669–4575.

16. *Swegle J.W., Grady D.E.* Shock viscosity and the prediction of shock wave rise times // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 58. № 2. P. 692–701.
17. *Grady D.E.* Structured shock waves and the fourth-power law // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. 013506.
18. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: “Янус-К”. 1996. 408 с.
19. *Губский К.Л.* Лазерная анемометрия в исследованиях ударно-волновых процессов и экстремального состояния вещества: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.21; [Место защиты: Нац. исслед. ядерный ун-т]. – М., 2012. – 132 с.
20. *Dolan D.H.* Foundations of VISAR analysis. Sandia National Laboratories, Technical Report № SAND2006-1950, 2006.
21. *Barker L.M., Hollenbach R.E.* Shock wave study of the  $\alpha\rightleftharpoons\epsilon$  phase transition in iron // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45. № 11. P. 4872–4887.
22. *Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В.* Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. 446с.
23. *Канель Г.И., Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В.* Оценка вязкости глицерина по ширине слабой ударной волны // *ТВТ.* 2017. Т. 55. № 2. С. 380–395.
24. *Crowhurst J. C., Armstrong M.R., Knight K.B. et al.* Invariance of the dissipative action at ultrahigh strain rates above the strong shock threshold // *PRL.* 107, 144302 (2011).
25. *Vogler T.J., Borg J.P., Grady D.E.* On the scaling of steady structured waves in heterogeneous materials // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112. 123507.
26. *LaJeunesse J.W., Hankin M., Kennedy G.B. et al.* Dynamic response of dry and water-saturated sand systems // *J. Appl. Phys.* 122, 015901 (2017).
27. *Банникова И.А., Зубарева А.Н., Уткин А.В. и др.* Метастабильные состояния, релаксационные механизмы и разрушение жидкостей при интенсивных воздействиях // *Физ. мезомех.* 2016. Т. 19. № 3. С. 69–77.
28. *Grady D.E.* Strain-rate dependence of the effective viscosity under steady-wave shock compression // *Appl. Phys. Lett.* 1981. V. 38. № 10. P. 825–826.
29. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Гаркушин Г.В. и др.* Изменение кинетики ударно-волнового деформирования и разрушения титана ВТ1-0 в результате отжига // *ФТТ.* 2016. Т. 58. № 6. С. 1153–1160.
30. *Swegle J.* Non-steady wave profiles and the fourth-power law // *Shock compression of condensed matter 1991* / Ed. by S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbes, D. G. Tasker – Elsevier Science Publishers B. V., 1992. P. 249–252.
31. *Zaretsky E.B., Kanel G.I.* Response of poly(methyl methacrylate) to shock-wave loading at elevated temperatures // *J. Appl. Phys.* 2019. V. 126. 085902.
32. *Bowden F.P., Yoffe A.* Hot spots and the initiation of explosion // *Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena.* 1945. V. 3. № 1. P. 551–560.
33. *Караханов С.М., Пластинин А.В., Бордзиловский Д.С., Бордзиловский С.А.* Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // *ФГВ.* 2016. Т. 52. № 3. С. 105–113.
34. *Simpson R., Helm F.* The Shock Hugoniot of Glass Microballoons // *Technical Report UCRL-ID-119252, Lawrence Livermore National Laboratory: Livermore, CA, USA, 1994.*

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. *Rostilov T.A., Ziborov V.S.* Experimental study of shock wave structure in syntactic foams under high-velocity impact // *Acta Astronaut.* 2021. V. 178. P. 900–907.
- A2. *Зибров В.С., Канель Г.И., Ростиллов Т.А.* Экспериментальное исследование характера деформации сферопластиков при ударном сжатии // *ФГВ.* 2020. Т. 56. № 2. С. 124–129.

- A3. *Зиборов В.С., Ростилов Т.А.* Скорость деформации при ударном сжатии в полимеризованной эпоксидной смоле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика и математика. 2019. № 4. С. 90–97.
- A4. *Ростилов Т.А., Зиборов В.С.* Особенности деформирования сферопластиков при высокоскоростном ударе // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство “Перо”, 2021. – Мб. [Электронное издание]. С. 1026–1027.
- A5. *Ziborov V.S., Rostilov T.A.* Experimental study of the viscosity of polymerized epoxy resin under shock compression // XXXVI International conference on interaction of intense energy fluxes with matter, March 1-6 2021, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Abstracts Section 2. Shock Waves, Detonation and Combustion.
- A6. *Зиборов В.С., Ростилов Т.А.* Экспериментальное исследование свойств волны ударного сжатия в среде с заданной пористостью // Тезисы XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Том I. Под ред.: д.ф.-м.н. Султанова В.Г., д.ф.-м.н. Салганского Е.А. 2020. С. 49.
- A7. *Ростилов Т.А., Зиборов В.С.* Скорость деформации во фронте ударной волны в полимеризованной эпоксидной смоле // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Фундаментальная и прикладная физика. – Москва: МФТИ, 2020. – 520 с. С. 401–403.
- A8. *Ziborov V.S., Rostilov T.A.* Features of shock compression wave propagation in a medium with given porosity // XXXV International conference on equations of state for matter, March 1-6 2020, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Book of Abstracts. P. 127.
- A9. *Ziborov V.S., Kanel' G.I., Rostilov T.A.* The experimental study of deformation character of spheroplastics under shock compression // XXXIV International conference on interaction of intense energy fluxes with matter, March 1-6 2019, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Book of Abstracts. P. 124.
- A10. *Rostilov T.A. Ziborov V.S., Kanel G.I.*, VISAR-measuring profiles of the average mass velocity in the propagation of the shock wave compression in spheroplastic // XXXIII International conference on equations of state for matter, March 1-6 2018, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Book of Abstracts. P. 143.
- A11. *Зиборов В.С., Ростилов Т.А., Тетенков А.В.* Исследование распространения волн ударного сжатия в эпоксидных компаундах, моделирующих эмульсионные среды, методом ВИЗАР // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский Авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. С. 416–417.
- A12. *Ziborov V.S., Kanel G.I., Rostilov T.A., Tetenkov A.V.* Use of laser interferometer VISAR for the investigation of the dynamic properties of substance modeling the emulsion explosive // XXXII International conference on interaction of intense energy fluxes with matter, March 1-6 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, Book of Abstracts. P. 167.

Ростилов Тимофей Андреевич  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
 РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СРЕДАХ  
 С ЗАДАННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

Автореферат

Подписано в печать _____		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 0,82	Усл.-печ.л. 1
Тираж 100 экз.	Заказ N	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2