

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Ростилова Тимофея Андреевича

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

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

#### **Актуальность**

Пористые материалы широко используются в современных высокотехнологичных конструкциях и технике. Многие из них в ходе своей эксплуатации могут подвергаться высокоскоростному нагружению, и прогнозирование результатов такого воздействия невозможно без знания ударно-волновых свойств материалов.

При создании высокопористых материалов часто используются стеклянные микросферы в качестве наполнителя. Связующим обычно служат эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные смолы и их модификации, а также синтетические каучуки и резины. Расчёт свойств таких материалов при ударно-волновом воздействии затруднён из-за их сложной внутренней структуры, поэтому для разработки корректных физических моделей требуется получение надёжных экспериментальных данных. В этой связи работа Т.А. Ростилова, в которой проведены экспериментальные исследования свойства пористых материалов в условиях ударного сжатия, является актуальной.

#### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Новизна исследования заключается в том, что автор провел подробное исследование ударной сжимаемости сред, содержащих микросферы, определил влияние матрицы и концентрации микросфер на эти свойства. Также в работе впервые были получены данные для пористого никеля с наноразмерными порами при относительно небольших давлениях ударного сжатия (до 4 ГПа).

Регистрация волновых профилей осуществлялась одним из наиболее современных и информативных экспериментальных методов, методом лазерной интерферометрии VISAR, позволяющим с временным разрешением порядка одной наносекунды измерять изменение скорости границы образец/окно при выходе на неё волны сжатия. Важно отметить, что измерения проведены в диапазоне давлений, когда ударная волна имеет

сложную двухступенчатую структуру. Взаимодействие этих волн при отражении от границы с окном было учтено при расчёте ударных адиабат.

В результате проведенных исследований получены ударные адиабаты исследованных веществ и показано, как они изменяются с увеличением пористости, а также определена ширина фронта ударной волны, характеризующая динамическую вязкость материала. Новизна полученных результатов состоит в установлении эмпирических соотношений между скоростью деформации во фронте волны сжатия и амплитудой давления в ударных волнах. Обнаружено существенное отличие параметров, входящих в эти соотношения, от известных данных для металлов.

### **Апробация и достоверность полученных результатов**

Результаты работы докладывались на ряде научных конференций лично автором и представлены в достаточном для защиты количестве публикаций списка ВАК, часть которых также индексируется в базе Web of Science.

Достоверность представленных данных обусловлена большим количеством экспериментальных данных, полученных с помощью современного и хорошо апробированного высокоточного оборудования, а также согласием результатов с известными экспериментальными данными других исследователей.

Личный вклад автора не вызывает сомнений, что подтверждается его прямым участием в подготовке и проведении экспериментов, результаты которых легли в основу диссертация. Все представленные к защите результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

### **Научная и практическая значимость**

Полученные результаты вместе с детально описанными методиками расчетов параметров ударного сжатия, расширяют представление о процессе ударно-волнового нагружения пористых сред, содержащих микросферы, и никеля с наноразмерными порами. Описана сложная волновая картина, наблюдающаяся в этих материалах, и показана необходимость её учёта при обработке результатов измерений. В целом представленные данные могут служить надежным опорным материалом при рассмотрении особенностей деформации пористых материалов при ударном сжатии, в том числе при рассмотрении влияния концентрации пор на этот процесс.

Результаты исследования смеси воды с микросферами содержат полезную информацию о динамике возникновения горячих точек, лежащих в основе представлений о процессах инициирования и развития детонации в эмульсионных взрывчатых веществах. Сведения по ударно-волновым свойствам нанопористого никеля важны, поскольку составляют основу экспериментальных данных, необходимую для построения широкодиапазонных уравнений состояния конструкционных материалов.

Практическая значимость работы заключается в полученных экспериментальных результатах о поведении пористых сред при интенсивном импульсном воздействии, что необходимо для разработки практических рекомендаций по их использованию в качестве элементов защиты в различных конструкциях.

Полученные результаты работы представляют как научный, так и практический интерес и могут быть применены в ряде научно-исследовательских центров: ИПХФ РАН, Институт гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН, ФИЦ ХФ РАН, ИМЕТ РАН, ВНИИЭФ, ВНИИТФ.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Текст диссертации включает введение, четыре главы, библиографию (110 наименований); её общий объем составляет 123 страницы, включая 43 рисунка и 8 таблиц.

**Во введении** изложена общая структура диссертации, описаны поставленные задачи и проблемы, решению которых посвящена работа. Представлен также литературный обзор, отражающий современное состояние дел в данной области исследований.

**В первой главе** рассмотрены схемы экспериментов по ударному сжатию конденсированных сред, методы расчета ударно-волновых параметров. Детально описана методика измерения скорости деформации во фронте ударной волны по результатам измерения профиля скорости диагностируемой поверхности образца. Приведены сведения о метательной установке Стрела-2М и интерферометрической методики VISAR.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментов по одноосному ударному сжатию сферопластиков и чистой эпоксидной смолы при давлениях от десятых долей до единиц ГПа. Приводятся сведения по ударно-волновым свойствам пористых сред и композитных материалов. На основании проведенных экспериментов определено влияние концентрации микросфер в эпоксидной матрице на ударную адиабату, структуру ударной волны и соотношения, связывающие давление ударного сжатия и скорость деформации во

фронте. Показано, что в расчетах параметров ударного сжатия необходимо учитывать параметры за фронтом волны-предвестника и детально рассмотрена методика подобных расчетов.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию ударно-волновых свойств смеси микросферы – вода при режимах нагружения от 0.15 до 0.42 ГПа. Проведено сравнение между полученными результатами и данными по сфероэластикам и чистым микросферам. Показано, что матрица оказывает сильное влияние на формирование волны-предвестника в подобных средах. Выполнено сравнение времени нарастания фронтов ударных волн в сфероэластиках и рассматриваемой смеси с временами формирования горячих точек в аналогичных средах. Сделаны некоторые общие выводы о влиянии структуры материалов с микросферами на их ударно-волновые свойства.

**В четвертой главе** изложены результаты экспериментов по одноосному ударному нагружению прессованного нанопрошка никеля при 1.7 и 4.1 ГПа. Фронтальные части полученных профилей ударных волн имеют сложную структуру, которая была объяснена с учетом циркуляции волны-предвестника между исследуемым торцом образца и фронтом ударной волны.

**В заключении** отмечаются основные результаты диссертационной работы.

Автореферат достаточно полно отражает объем и содержание проделанной работы, кратко излагает полученные результаты, основные положения и выводы диссертации.

### **Замечания по диссертационной работе**

В качестве замечаний, можно отметить следующее:

1. следовало бы уточнить, почему двухволновая конфигурация называется упруго-пластической волной. Эта терминология, возможно, приемлема, но тогда необходимо показать, что сфероэластики при низких давлениях являются упругими средами, которые характеризуются объёмной сжимаемостью и модулем сдвига, а предвестник распространяется с продольной скоростью звука;
2. в оформлении работы допущены некоторые погрешности. В частности, на Рис.28б не указана точность определения удельного объема для эпоксидной смолы; на Рис.39б следовало бы привести аппроксимацию экспериментальных данных для воды с микросферами, чтобы утверждение об аномальной сжимаемости было очевидно. Выводы в конце глав не всегда кратко и конкретно отражают основные результаты.

## Заключение

Эти замечания не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку работы, которая является, несомненно, актуальной, а полученные результаты содержат научную новизну. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. (ред.11.09.2021г.), а ее автор Ростилев Тимофей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил официальный оппонент кандидат физико-математических наук, заведующий Лабораторией детонации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики Российской академии наук Уткин Александр Васильевич.

Официальный оппонент,  
к.ф.-м.н., заведующий Лабораторией детонации ИПХФ  
РАН  
142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект  
академика Семенова, 1  
+7 (496) 522-41-25, [utkin@icp.ac.ru](mailto:utkin@icp.ac.ru)

Уткин А.В.

Подпись старшего научного сотрудника Института проблем химической физики РАН  
Уткина Александра Васильевича удостоверяю:

Ученый секретарь ИПХФ РАН  
доктор химических наук  
142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект  
академика Семенова, 1  
8(49652) 2-19-32, [psi@icp.ac.ru](mailto:psi@icp.ac.ru)



Психа Б.Л.

08.12.2021

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, 1, тел.: +7 (496) 522-44-74, [www.icp.ac.ru](http://www.icp.ac.ru), e-mail: [office@icp.ac.ru](mailto:office@icp.ac.ru))