

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**доктора физико-математических наук А.Ю. Долгобородова  
на диссертационную работу Прууэла Эдуарда Рейновича  
«Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного  
углерода при детонации энергетических материалов методом  
малоуглового рентгеновского рассеяния»**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертационная работа Прууэла Э.Р. посвящена комплексному экспериментальному изучению процессов детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) методом скоростной рентгенографии с использованием синхротронного излучения совместно с разработкой теоретического подхода для расчетов параметров детонации широкого круга ВВ.

**Актуальность работы** определяется необходимостью получения достоверной экспериментальной информации о параметрах продуктов взрыва в реальных взрывчатых составах, а также создания надежных численных моделей для решения задач по разработке новых эффективных и безопасных составов промышленного и военного назначения. Высокое пространственное и временное разрешение разработанной методики позволяет получать уникальные данные о структуре течения за фронтом детонационной волны, а программный комплекс позволяет определять термодинамические и газодинамические параметры течений в широком диапазоне давлений и температур.

Основной целью диссертационной работы являлась разработка согласованных экспериментальной и расчетной методик определения газодинамических параметров детонационного течения.

Диссертация общим объемом 207 страниц состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии и четырех приложений.

Во введении обоснованы актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость диссертации, приведены выносимые на защиту положения, сведения о личном вкладе соискателя, данные об апробации работы и благодарности.

В первой главе приведены результаты по развитию пучковых методов исследования быстропротекающих процессов. Дан обзор методов пучковой

диагностики и существующих в мире экспериментальных станций. Подробно описаны возможности станции на ускорительном комплексе ВЭППЗ ИЯФ СО РАН. Параметры станции в области исследования объектов с малой рентгеновской плотностью являются уникальными. Установка позволяет получать 100 временных кадров, с промежутком 124 нс и с экспозицией одного кадра 124 нс. Каждый кадр состоит из 512 пространственных каналов с шагом 0.1 мм.

Приведено описание методики проведения рентгенографического эксперимента по исследованию детонационного течения. Для исследования детонации ВВ использовались две постановки: с продольным и поперечным расположением заряда ВВ относительно плоскости зондирующего луча СИ. Первая постановка позволяет определять скорость детонации и динамику развития волнового процесса. Во втором случае определялась динамика рентгеновской тени в поперечном сечении, что позволяло получать данные для томографии структуры внутреннего течения. Описаны процедуры калибровки и восстановления пространственного распределения средней плотности вещества для разных моментов времени.

Во второй главе приводится описание 3-х методик обработки данных рентгенографического эксперимента: восстановление распределения плотности, газодинамических параметров детонационного течения по подобранному давлению и уравнению состояния продуктов взрыва. Разработано семейство эффективных методов восстановления параметров детонационного течения для условий цилиндрической симметрии течения. Используя адаптированную сеточную аппроксимацию, удается восстановить распределение плотности в исследуемом сечении.

Предложен метод определения механических параметров стационарного течения газа: полей плотности, давления и вектора массовой скорости по измеренной в эксперименте рентгеновской тени детонационного течения. Метод основан на подборе пространственного распределения давления, при котором формируется течение с рентгеновской тенью, хорошо соответствующей эксперименту.

Совместное использование данных скоростной рентгеновской томографии плотности и разработанной методики позволило определить пространственные распределения плотности, скорости и давления для стационарной детонации цилиндрически-симметричных зарядов ВВ.

Основная ошибка метода определяется недостаточным временным разрешением (124 нс), приводящим к заниженным параметрам Чепмена-Жуге.

В третьей главе приводится описание двух моделей уравнения состояния реагирующих газовых смесей и газовзвесей для описания процессов горения и детонации.

Для разреженных газов с использованием методов статистической физики разработана модель термодинамики реагирующей смеси газов и конденсированных компонент. Для определения детального равновесного химического состава рассматривается NVT ансамбль и численно находится минимум свободной энергии смеси всех возможных компонент. Разработан программный комплекс термодинамических расчетов для разреженных газов, который позволяет проводить ряд вычислений: определять равновесный химический состав смеси газов на основе элементов *He, Ne, Ar, Kr, Xe, H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, S, Fe* в широком диапазоне температур; вычислять давление, энтальпию, внутреннюю энергию, теплоемкость и показатели адиабат; осуществлять построение равновесных и замороженных ударных адиабат; определять термодинамические параметры горения при постоянном объеме или давлении; определять параметры стационарных детонационных волн.

Вторая модель позволяет проводить расчеты равновесных термодинамических параметров плотных реагирующих газов и флюидов с учетом межмолекулярных взаимодействий. Используя методы статистической физики и молекулярной динамики, построена модель уравнения состояния смеси реагирующих плотных газов для условий взрыва. Модель основывается на классическом молекулярно-динамическом моделировании небольшого ансамбля молекул, взаимодействующих с парным потенциалом  $\exp(-6)$ , при этом давление и полная энергия системы вычисляются путем интегрирования всех парных сил и потенциальных энергий взаимодействия между молекулами. Протестированный диапазон параметров составляет по температуре – от 100 до 10 000 К и до давлений 100 ГПа. Базовыми параметрами для заданных условий являются плотность, температура и химический элементный состав исследуемой смеси. Разработанный программный комплекс позволяет определять равновесный химический состав, давление, внутреннюю энергию, теплоемкость, показатель адиабат, скорость звука, а также параметры детонации Чепмена-Жуге взрывчатых смесей.

В заключении приведены выводы по основным результатам работы.

В приложениях приведены численные значения параметров разработанного уравнения состояния, данные по калибровке модели с использованием известных данных по изотермическому сжатию и ударным адиабатам, а также данные по сравнению вычисленных параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ с экспериментальными данными.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне с использованием современных экспериментальных методов и теоретических подходов, что позволяет сделать заключение о надежности и достоверности полученных результатов. Результаты работы получили свое отражение в достаточном количестве публикаций в российских и зарубежных изданиях из перечня ВАК, докладывались на ряде международных и российских конференциях. Результаты, полученные в работе, безусловно, являются новыми, интересными и имеют важное научное и прикладное значение.

По тексту диссертации есть ряд замечаний:

1. По-видимому, текст диссертации был написан частями, которые недостаточно согласованы между собой, что привело к ряду повторов. Так, например, в разных местах повторяются одни и те же формулы: на стр. 120 приведены выражения для определения термодинамических параметров, которые уже были на стр. 102; уравнение Гюгонио повторяется на стр. 105 и 124, одинаковые формулы (2.13) стр.77 и (3.21) стр. 131.

2. Имеются опечатки, в основном это неправильные окончания слов, пропущенные буквы и запятые. В некоторых случаях из-за этого предложения становятся малопонятными. Например, стр. 65 "Для заряда ТАТБ1 можно говорить об общем уравнении состояния для всех продуктов взрыва. За исключением линий тока, близких к краю адиабаты разгрузки, в координатах давление-плотность близки" - Близких к краю адиабаты разгрузки?? или все-таки заряда?

3. В главе 2, раздел 2.1.3 указано «Для широкого списка взрывчатых веществ были определены распределения плотности детонационного течения». Однако в самом тексте есть данные только по ТЭНу и эмульсионному ВВ (без указания состава, плотности и т.д.), а для других ВВ данных нет. Нужно было бы привести список ВВ, для которых получены эти распределения с указанием источников, где эти данные содержатся.

4. Автореферат диссертации в целом правильно отражает основные результаты работы. Имеется одно замечание. На рис. 16б приведено значение температуры продуктов детонации тротила с указанием неправильной ссылки на работу Воскобойникова (1960), на самом деле эти измерения проведены позже, в работе Гоголи (1994). В приложении В6 к диссертации эта ошибка исправлена.

Однако в целом, указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки работы.

Считаю, что диссертационная работа «Скоростная рентгеновская томография и уравнение состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ» соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в том числе отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а ее автор, Прууэл Эдуард Рейнович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент

Долгобородов Александр Юрьевич

Доктор физико-математических наук

специальность 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Зав. лабораторией ударно-волновых воздействий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

тел. 8(495)4832295, e-mail: aldol@ihed.ras.ru

7 ноября 2022 г.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подпись зав. лабораторией ударно-волновых воздействий ОИВТ РАН

д.ф.-м.н. Долгобородова А.Ю.

ЗАВЕРЯЮ

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д.ф.-м.н.

7 ноября 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

тел. 8(495)4859009, e-mail: amirovravil@yandex.ru



— Р. Х. Амиров