

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

### на диссертационную работу Прууэла Эдуарда Рейновича «Скоростная рентгеновская томография и уравнение состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ»,

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

Работа посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому исследованию параметров детонации конденсированных взрывчатых материалов – структуре детонационного течения и уравнению состояния продуктов взрыва. В рамках работы модернизирована станция для проведения скоростных рентгенографических исследований детонационного течения, сформулирована и реализована модель уравнения состояния продуктов детонации энергетических материалов.

#### **Актуальность.**

Несмотря на опасность обращения, конденсированные энергетические материалы являются безальтернативной основой компактных мощных импульсных источников энергии. Широкое использование в технологии и научном эксперименте сформулировало ряд проблем использования энергии взрыва: для добывающей промышленности – это вопросы экономической эффективности и безопасности обращения; для устройств специального назначения это вопросы стабильности существующих составов и разработка новых, более эффективных. Для решения этих задач необходимо согласованное развитие экспериментальных методик, позволяющих получать прецизионные данные о поведении вещества в условиях взрыва, и численных моделей с глубокой научной основой, прокалиброванных на известных экспериментальных данных и обладающих предсказательной силой.

#### **Структура диссертации.**

Диссертация имеет традиционную структуру, состоит из введения, трех основных глав, заключения, списка литературы и приложений.

**В первой главе** приводится описание экспериментальной станции и методики скоростной рентгенографии детонационного течения. Приведено сравнение с мировыми аналогами, показаны преимущества реализованной методики.

**Во второй главе** приводится описание нескольких методик обработки данных рентгенографии. Проведен анализ математической корректности методик восстановления газодинамических параметров течения по измеренной в эксперименте рентгеновской тени. Получены адиабаты разгрузки продуктов детонации ряда известных и новых взрывчатых составов.

**В третьей главе** дано описание модели уравнения состояния реагирующих смесей разреженных и плотных газов. В приложения вынесено обширное сравнение с доступными экспериментальными данными.

**В заключении** приведены общие выводы и обоснования достижения поставленных в работе целей. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

Объем работы составляет 207 страниц, список литературы содержит 172 работ и отражает необходимые ключевые публикации по теме диссертации.

#### **Научная новизна.**

Модернизирована экспериментальная станция для исследования детонационных процессов с помощью синхротронного излучения на ускорителе ВЭППЗ ИЯФ СО РАН. Станция позволит проводить рентгенографические исследования с рекордными возможностями: массами зарядов до 50 г, широким полем наблюдения 40 мм и временем между рентгеновскими кадрами 124 нс.

Реализована оригинальная методика, позволяющая определять распределение газодинамических параметров цилиндрически симметричного течения: плотности, давления, вектора массовой скорости и адиабаты разгрузки продуктов детонации в виде политропного уравнения состояния  $p(\rho)$ . Получены параметры Чепмена – Жуге и адиабаты разгрузки продуктов детонации чистых и смесевых взрывчатых составов на основе тэна, гексогена, тротила, ТАТБ (триаминотринитробензол), БТФ (бензотрифуроксана), ГАВ (гексанитрогексаазаизовюрцитан, ГНИВ, CL-20), эмульсионного взрывчатого вещества на основе аммиачной селитры и композиций энергетических материалов с добавками алюминия.

Методологическая новизна реализованного подхода заключается в подборе одного базиса параметров, подходящего для широкого набора термодинамических условий и исследуемых смесей. Впервые проведено сравнение с широким массивом данных: данные Американского института стандартов при сжатии до 1 ГПа, сжатие в алмазных наковальнях до давлений 100 ГПа, ударные адиабаты сжиженных газов, зависимости параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ от начальной плотности, адиабаты разгрузки продуктов детонации.

#### **Научная и практическая значимость.**

Созданная экспериментальная методика скоростной рентгенографии позволяет получать количественные и качественные характеристики параметров детонационного течения. Она позволяет контролировать стабильность параметров известных взрывчатых веществ и исследовать новые составы. Полученные экспериментальные данные используются для контроля безопасности и энергетических характеристик составов, применяемых в специальных устройствах. Разработанные оригинальные методики позволяют получать количественные значения газодинамических параметров детонационного течения – это актуальная научная задача.

#### **Достоверность и апробация результатов.**

Достоверность экспериментальных результатов по определению газодинамических параметров детонационного течения подтверждается сравнением с экспериментальными и расчетными данными других работ. Достоверность разработанной модели уравнения состояния плотных реагирующих газов подтверждается сравнением с экспериментальными данными в широком диапазоне давлений, температур. При этом использовались

разнообразные экспериментальные данные по сжатию веществ в алмазных наковальнях, ударным адиабатам сжиженных газов и параметрам детонации газообразных и конденсированных взрывчатых смесей.

Результаты работы представлены на ряде авторитетных Российских и международных конференций в области физики взрыва, уравнений состояния и экспериментальных методик с использованием синхротронного излучения.

Всего по материалам диссертационной работы подготовлено 41 публикация. Из них 14 статей с определяющим вкладом автора опубликовано в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации и в ведущих международных журналах.

#### **Соответствие специальности.**

Диссертационная работа соответствует п. 1 "экспериментальные методы исследования химической структуры и динамики химических превращений", п. 3 "Молекулярная динамика, межмолекулярные потенциалы и молекулярная организация веществ" и п. 7 "Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн", паспорта научной специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества (отрасль науки — физико – математические).

#### **Рекомендации и замечания.**

По тексту диссертации имеется ряд замечаний:

Задача (см. п. 2.2.2) о восстановлении параметров течения по заданной зависимости давления от координат  $p(r, z)$  является плохо обусловленной, поскольку функция  $p(r, z)$  заранее неизвестна. В результате ее решения, полученные адиабаты  $p = p(\rho)$  для зарядов ТАТБ1, ТАТБ2 содержат изломы, которых не должно быть, и плохо аппроксимируют зависимость  $p \sim \rho^3$  (см. рис. 2.20, 2.21).

2. В задаче о восстановлении уравнения состояния продуктов детонации (ПД)  $p = p(\rho)$  (см. п. 2.2.3) неточно вычисляются параметры ПД на границе с воздухом. При решении задачи о распаде разрыва искомые параметры находятся из условия пересечения адиабаты разгрузки ПД и ударной адиабаты воздуха. В реальном процессе ударная волна в воздухе уходит от контактной границы ПД – воздух. Поскольку при осесимметричном течении параметры газа за ударной волной не являются постоянными, поэтому на контактной границе ПД – воздух, давление воздуха будет отличаться от давления за ударной волной в воздухе.

3. В п. 3.3. рассмотрена задача об определении уравнения состояния плотных реагирующих газов с использованием метода Монте – Карло, по которой имеется несколько замечаний:

а). При определении вероятности реализации заданного равновесного химического состава (см. п. 3.3.2) используется формула (3.14). Эта формула справедлива для разреженных газов,

когда взаимодействием между молекулами можно пренебречь. Для рассмотренных плотных газов это приближение не выполняется;

б). Нет обоснования сходимости предложенного итерационного метода к истинному равновесному состоянию. Не ясно, является ли полученный в результате итераций химический состав правильным;

в). При определении двух параметров  $\varepsilon$  и  $b$  в потенциале  $e_{\text{хрб}}$  использовался потенциал Леннарда-Джонса. Не ясно, из каких условий в потенциале  $e_{\text{хрб}}$  подбирался третий параметр  $\alpha$ ;

г). Давление и энергия среды при заданном химическом составе находились методом молекулярной динамики из расчета NVT ансамбля, состоящего из  $N \sim 50 - 100$  молекул. При таком малом числе молекул возникают значительные флуктуации параметров порядка  $1/\sqrt{N}$ , которые приводят к возникновению ошибки в средних параметров более чем 10%;

4. В заключении на стр. 139 приведено неясное утверждение «Учет кривизны детонационного фронта в методе подбора давления позволит определять газодинамические параметры в зоне химической реакции детонационного фронта. С точки зрения эксперимента и построения моделей, это сложный объект для исследований, где трудно говорить об уравнении состояния и газодинамических характеристиках течения». Поскольку область реакции имеет макроскопический размер, то при расчете параметров в этой области можно использовать термодинамические параметры (температуру, давление и т.д.). Однако в этом случае химический состав уже будет меняться по толщине этой области, и для его расчета нужно использовать соответствующие кинетические уравнения реакций.

5. Диссертация написана очень кратко, опущены многие технические детали. При описании методов интерполяции сплайнами 3-го порядка не приведены размеры и число сеток, в которых заданы значения интерполированных величин.

6. Третья глава слабо связана с первыми двумя главами. Логично было бы методом 3 главы получить уравнение состояния, которое затем использовать для расчета детонационной волны методом Годунова и сравнения рассчитанной плотности с измеренной в эксперименте.

6. В задаче о восстановлении газодинамических параметров потенциального течения, уравнение (2.5) решалось явным итерационным методом. Однако в работе не указана итерационная схема. По-видимому, в уравнение (2.5) добавлялось нестационарное слагаемое, пропорциональное  $\partial\phi/\partial t$ . Не ясно, как решалось уравнение (2.8). Какая точность полученного решения, приведенного на рис. 2.13.

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

## Заключение.

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную автором на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты исследований достоверны, выводы, заключения и рекомендации аргументированы и обоснованы. Результаты работы опубликованы и апробированы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

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

Киселев Сергей Петрович

доктор физико-математических наук, профессор, специальность: 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы; 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела;

ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

тел. +7 913 932 7479, эл. почта kiselev@itam.nsc.ru

07.11.2022

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

Киселев Сергей Петрович, д.ф.-м.н., профессор

Подпись Киселева С.П. заверяю

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН

к.ф.-м.н. Кратова Ю.В.

07.11.2022

