

**Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина»
(ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ

им. академ. Е.И. Забабахина»



М.Е. Железнов

2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу по соисканию степени
доктора физико-математических наук Прууэла Эдуарда Рейновича
«Скоростная рентгеновская томография и уравнение состояния продуктов
детонации конденсированных взрывчатых веществ»
по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Прууэлла Эдуарда Рейновича посвящена комплексному экспериментальному и теоретическому исследованию параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ – структуре детонационного течения и уравнению состояния продуктов взрыва. В течение длительного времени специалисты в области разработки и исследования взрывчатых веществ стремятся решить ряд задач, касающихся: соблюдения оптимума между мощностью и безопасностью при разработке взрывчатого вещества, исследования физико-химических, физико-механических, газодинамических свойств взрывчатого вещества для определения стабильности его характеристик. Проводится численное моделирование процессов распространения взрывчатого превращения с целью построения уравнения состояния взрывчатого вещества и его продуктов взрыва. В арсенале исследователей быстропротекающих

процессов выделяются методы, основанные на использовании синхротронного излучения. Их особенности состоят в уникальных свойствах по высокому временному и пространственному разрешению. Получаемые результаты публикуются в значительном числе научных трудов, к авторам которых относится и диссертант.

В диссертационной работе описана реконструкция экспериментальной станции (выполненная под непосредственным руководством соискателя) для проведения исследований методом скоростной рентгенографии с использованием синхротронного излучения на базе ускорителя электронов ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Выполнены экспериментальные исследования, позволяющие получить рентгенографические изображения исследуемого детонационного течения непосредственно в процессе взрыва. Для исследования течений с цилиндрической симметрией разработана оригинальная методика, позволяющая определять распределение плотности и ряд газодинамических параметров течения при детонации зарядов конденсированных взрывчатых веществ. С использованием методов статистической физики, автором построена модель термодинамики реагирующей смеси плотных газов для условий взрыва конденсированных энергетических материалов.

Целью диссертационной работы Прууэла Э.Р. является разработка согласованных экспериментальной и расчётной методик определения газодинамических параметров детонационного течения.

Научная ценность и новизна работы заключается в получении новых экспериментальных результатов на модернизированной экспериментальной станции для исследования детонационных процессов с помощью синхротронного излучения на ускорителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Станция позволяет проводить рентгенографические исследования с зарядами массой 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 $\rho(r, z, t)$, давления

$p(r, z, t)$, вектора массовой скорости $\vec{v}(r, z, t)$, а также адиабаты разгрузки продуктов детонации в виде политропного уравнения состояния $p(\rho)$. Получены параметры Чепмена-Жуге и адиабаты разгрузки продуктов детонации индивидуальных и смесевых взрывчатых веществ. Реализован новый подход, который заключается в подборе одного базиса параметров, подходящего для широкого набора термодинамических условий и исследуемых смесей в результате чего выполнено тестирование модели уравнения состояния плотных реагирующих газов. Впервые проведено сравнение с широким массивом данных: данные Американского института стандартов при сжатии до 1 ГПа, при сжатии в алмазных наковальнях до давления 100 ГПа, ударные адиабаты сжиженных газов, зависимости параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ от начальной плотности, адиабаты разгрузки продуктов детонации.

Практическая значимость работы заключается в создании экспериментальной методики скоростной рентгенографии, позволяющей получать количественные характеристики параметров детонационного течения, что дает возможность контролировать стабильность параметров известных взрывчатых веществ и исследовать новые составы. Полученные экспериментальные данные используются для контроля безопасности и работоспособности составов, применяемых в специальных устройствах Российских федеральных ядерных центров (г. Снежинск и г. Саров). Разработанное и протестированное уравнение состояния плотных реагирующих газов позволяет предсказывать детонационные свойства новых составов без проведения экспериментов по известной энтальпии образования и начальной плотности. Разработанный программный комплекс позволяет успешно проводить вычисления и используется для проведения научных расчётов, оптимизации горючих смесей в технологических процессах и для анализа задач взрыво- и пожаробезопасности.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и приложения, содержит 207 страниц машинописного

текста, 124 рисунка, 3 таблицы. Список литературы включает 172 наименования.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность диссертационной работы, отмечена степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи, представлена научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, достоверность и апробация результатов работы.

В главе 1 представлено развитие пучковых методов исследования быстропротекающих процессов. Приведен обзор и подробное описание экспериментальных станций, использующих пучковые методы диагностики быстропротекающих процессов, их технические характеристики, применяемые методики и объекты исследований. Детально представлены возможности модернизированной станции на ускорительном комплексе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН. Приведено описание методики проведения рентгенографического эксперимента по исследованию детонационного течения.

В главе 2 показано восстановление газодинамических параметров течения. Приводится описание нескольких методик обработки данных рентгенографического эксперимента: восстановление плотности, газодинамических параметров детонационного течения, а также уравнения состояния продуктов взрыва. Определены значения параметров детонации Чепмена-Жуге для широкого круга взрывчатых веществ.

В главе 3 приводится обзор уравнений состояния продуктов взрыва имеющих в настоящее время практическое значение. Особенно подробно выполнено описание двух моделей реагирующих газовых смесей и газовзвесей для описания процессов горения и детонации, таких, как уравнение состояния разреженных реагирующих газов и уравнение состояния плотных реагирующих газов. Уделено значительное внимание тестированию моделей.

Необходимо отметить следующие результаты диссертационной работы:

1. Под непосредственным руководством Прууэла Э.Р. выполнена модернизация экспериментальной станции на ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН для исследования детонационных процессов. Модернизированная экспериментальная станция, безусловно, соответствует мировому уровню, а по масштабам исследуемых зарядов является мировым рекордом: масса исследуемых зарядов до 50 г, широкое поле наблюдения 40 мм, время между рентгеновскими кадрами 124 нс. Станция позволяет решать как фундаментальные научные проблемы физики взрыва, так и технологические задачи, связанные с безопасностью и эффективностью использования взрывчатых веществ.
2. Разработаны эффективные методики восстановления распределения плотности, газодинамических параметров детонационного течения (при условии цилиндрической симметрии течения), а также построение уравнения состояния продуктов взрыва. Показано, хорошее согласие численного моделирования с экспериментальными результатами, полученными по рентгеновской тени.
3. Реализована модель плотных газов с учётом равновесного химического состава. Модель основывается на классическом молекулярно-динамическом моделировании небольшого ансамбля взаимодействующих молекул и прямом определении давления и полной энергии системы. Модель позволяет определять термодинамические параметры плотных газов в условиях взрыва в диапазоне температур от нормальных условий до 5000 К и давлений до 50 ГПа. Описанная модель реализована в виде программного комплекса, позволяющего проводить расчеты термодинамических параметров реагирующих газов и ряда простых газодинамических течений, в том числе ударных и детонационных волн.

Важность полученной Прууэлом Э.Р. информации обусловлена тем, что в настоящее время в производственные комплексы РФЯЦ-ВНИИТФ внедрены модели уравнения состояния продуктов взрыва и кинетические

модели взрывчатых превращений во взрывчатых веществах. В этих моделях экспериментальная информация по динамике распространения детонационного процесса и распределению средней плотности вещества в различные моменты времени, полученная в опытах с различными взрывчатыми веществами с применением регистрации рентгеновского рассеяния синхротронного излучения, была напрямую использована для обоснованного выбора параметров.

Диссертационная работа Прууэла Э.Р. выполнена на высоком уровне, обладает целостностью и понятной логикой. В работе, на основании выполненных автором исследований, разработаны экспериментальные и теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, а объём диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к научно-квалификационной работе на соискание степени доктора физико-математических наук. Автореферат диссертации соответствует основным положениям диссертации, её содержанию. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

По содержанию диссертации можно сделать ряд замечаний.

1. В пункте 1.4.3, в котором рассматривается пример результатов продольных измерений вдоль оси заряда из смеси октогена с алюминием, нелогично смотрится рисунок 1.17, демонстрирующий распределения массы на луче для ВВ ТАТБ.
2. В тексте встречается словосочетание «чистое взрывчатое вещество», хотя под ним подразумевается индивидуальное взрывчатое вещество.
3. В диссертационной работе приведен анализ корректности математических постановок восстановления газодинамических параметров течения, но не приведены погрешности определения давления, массовой скорости и плотности.
4. В заключении (страница 139) указано, что получены параметры Чепмена-Жуге и адиабаты разгрузки продуктов детонации чистых и смесевых взрывчатых составов, в том числе эмульсионного взрывчатого вещества на основе аммиачной селитры и композиций энергетических материалов с

добавками алюминия. При этом в тексте диссертации полученные результаты для композиций с добавками алюминия отсутствуют.

5. При оформлении диссертации допущены следующие недочёты. В тексте встречаются орфографические ошибки, в некоторых словах пропущены буквы, а в некоторых предложениях пропущены слова. По тексту диссертации замечен повтор страницы 22.

Указанные замечания не умаляют ценности работы и не снижают достоинства диссертационного исследования.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Прууэла Эдуарда Рейновича «Скоростная рентгеновская томография и уравнение состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ» по уровню выполнения, объёму, актуальности, новизне и значимости полученных результатов представляет собой полноценное законченное научное исследование, соответствующее требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, в т.ч. соответствует пункту 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года в действующей редакции. Автор работы, Прууэл Эдуард Рейнович, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Отзыв на диссертационную работу заслушан и утверждён на научно-техническом совете НИО-4 ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина».

Отзыв подготовил:

Кашицев Владимир Иванович

Доктор технических наук по специальности 20.02.21 – «Средства поражения и боеприпасы», главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела №48, научно-исследовательского отделения №4, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»




В.И. Кашицев

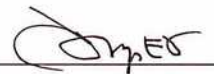
« 10 » 11 2022 г.

Согласовано:

Председатель научно-технического совета научно-исследовательского отделения №4, заместитель главного конструктора РФЯЦ-ВНИИТФ - начальник научно-исследовательского отделения №4, кандидат технических наук по специальности 20.02.21 – «Средства поражения и боеприпасы»


 _____ А.Ю. Гармашев
 « 10 » 11 _____ 2022 г.

Ученый секретарь научно-технического совета научно-исследовательского отделения №4, заместитель начальника научно-исследовательского отделения №4, кандидат технических наук по специальности 01.04.17 – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»


 _____ Е.Б. Смирнов
 « 10 » 11 _____ 2022 г.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина») 456770, г. Снежинск, Челябинской обл., ул. Васильева 13, а/я 245. Телефон: Тел. +7 (35146) 5 45 72, +7 (35146) 5 50 23, Факс. 8 (35146) 5 45 72 E-mail: vniitf@vniitf.ru

Подписи Кашицева В.И., Гармашева А.Ю. и Смирнова Е.Б. заверяю
 Ученый секретарь научно-технического совета ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», кандидат физико-математических наук


 _____ В.Н. Ногин
 « 10 » 11 _____ 2022 г.