

**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

2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертационную работу Рубцова Ивана Андреевича
«Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного углерода
при детонации энергетических материалов
методом малоуглового рентгеновского рассеяния»
по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Рубцова И.А. посвящена исследованию физико-химических процессов, происходящих при детонации конденсированных энергетических материалов (ЭМ), с использованием синхротронного излучения. Исследования конденсации углерода при детонации энергетических материалов с отрицательным кислородным балансом были начаты более полувека назад в связи с работами по синтезу детонационных наноалмазов. В этих работах, в основном, исследовались сохраненные продукты детонации (шихта), собранные после взрыва во взрывной камере. Экспериментально исследовать кинетику процесса конденсации углерода в то время не представлялось возможным, поэтому место и время конденсации считалось совпадающим с зоной химической

реакции, поскольку параметры среды соответствовали устойчивой фазе состояния алмаза.

Интерес к этим работам усилился в связи с расширением работ по изучению 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола (ТАТБ) в ядерных центрах США и России в середине 90-х годов. Измеренные скорости пластин, метаемых с помощью ВВ ТАТБ, лучше сходились с расчётами, если за фронтом детонации продолжается выделение энергии. Расчёты показывали, что полное время конденсации углерода на порядок превышало время существования зоны химической реакции. Этот вопрос остаётся актуальным и в настоящее время.

В диссертационной работе получены экспериментальные данные о параметрах вещества в зоне химической реакции и вне этой зоны, что позволяет использовать их для уточнения моделей кинетики детонации во взрывчатых веществах (ВВ) и совершенствования моделей уравнения состояния продуктов взрыва (ПВ), а также улучшить динамический синтез получения конденсированного углерода. Использование в диссертационной работе метода малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) с высоким временным разрешением позволяет проводить невозмущающие дистанционные измерения и получить информацию о фазовых и химических превращениях ЭМ во фронте и за фронтом детонационной волны. Данный метод является эффективным способом динамического измерения размеров частиц в нанометровом диапазоне, а регистрация угловых распределений МУРР с пикосекундной экспозицией в дальнейшем найдёт применение и в изучении других динамических процессов, например, при исследовании ударных волн и разрушении материалов.

Целью диссертационной работы Рубцова И.А. являлось выявление динамики размеров конденсированного углерода при детонации энергетических материалов разного диаметра по измеренным распределениям малоуглового рентгеновского рассеяния.

Научная ценность и новизна работы заключается в получении результатов по длительной динамике размеров конденсированного углерода, которые превышают зону химической реакции. Продемонстрирована возможность и разработаны численные модели восстановления информации по угловым распределениям МУРР с высоким временным разрешением, а также предложен механизм формирования конденсированного углерода. Полученные Рубцовым И.А. результаты являются уникальными для зарядов ЭМ массой около 200 грамм, так как до проведения данной работы не было экспериментальных установок, позволяющих исследовать динамику конденсации углерода во время детонации зарядов ЭМ диаметром более 20 мм.

Практическая значимость работы заключается в использовании полученных экспериментальных данных для построения моделей конденсации углерода и учёта энергии формирования частиц углерода в зоне химической реакции и за ней. Результаты важны для калибровки и верификации уравнений состояния ПВ, учитывающих детальный химический состав газовых и конденсированных компонентов. Также результаты работы могут быть полезны при синтезе углеродных наноматериалов, в том числе наноалмазов (НА).

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка используемых обозначений и списка литературы. Диссертационная работа содержит 119 страниц машинописного текста, 53 рисунка, 1 таблицу. Список литературы включает 138 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, описаны новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация работы, структура и объём диссертации.

В главе 1 представлен литературный обзор, включающий в себя исторический очерк синтеза НА, описание структуры конденсированного

углерода, уравнения состояния продуктов детонации и использование синхротронного излучения для изучения конденсации углерода во время детонации ЭМ.

В главе 2 указаны основные характеристики экспериментальной станции «Экстремальное состояние вещества», описан скоростной рентгеновский детектор DIMEX, а также методика проведения эксперимента по измерению МУРР и приведены экспериментальные результаты.

В главе 3 показана возможность работы метода МУРР на полихроматическом излучении, а также описаны разработанные методики обработки экспериментальных данных по восстановлению информации об объекте.

В главе 4 приводится анализ особенностей конденсации углерода, основным результатом данной работы является двухстадийный механизм конденсации углерода и описываются перспективы дальнейшего развития данной работы.

Необходимо отметить результаты диссертационной работы:

1. Разработан экспериментальный подход, позволяющий с помощью методики регистрации угловых распределений МУРР исследовать динамику процесса конденсации углерода при детонации ЭМ диаметром до 40 мм.
2. Экспериментально получено, что время изменения угловых распределений МУРР (формирования конденсированной фазы углерода) составляет несколько (4 - 6) микросекунд.
3. Разработаны численные модели обработки экспериментальных данных, позволившие получить динамику среднего размера рассеивающих неоднородностей методом Гинье, динамику распределения частиц по размерам и динамику двухуровневой структуры конденсированного углерода (частиц и кластеров) при детонации смеси тротила с гексогеном диаметром 20, 30 и 40 мм.
4. Предложен механизм формирования конденсированного углерода, позволивший описать экспериментальные данные МУРР, заключающийся в

том, что существует два характерных времени формирования конденсированной фазы и изменения её формы. В первой быстрой фазе, с учётом временного разрешения методики, за время не более 1 мкс в основном формируются частицы и начальные кластеры. Во второй фазе, на протяжении нескольких микросекунд происходит дальнейший рост кластеров, при этом, размеры частиц практически не меняются.

Важность полученной Рубцовым И.А. информации обусловлена тем, что в настоящее время в производственные комплексы РФЯЦ-ВНИИТФ внедрены модели детонации высокоплотных ВВ с отрицательным кислородным балансом, в которых учитывается медленное энерговыделение в ПВ, связанное с экзотермическим процессом роста кластеров ультрадисперсного алмаза (УДА).

В этих моделях информация по динамике роста среднего размера УДА $d(t)$ для различных ВВ, полученная в опытах с регистрацией малоуглового рентгеновского рассеяния синхротронного излучения, была напрямую использована для обоснованного выбора параметров.

Особенностью моделей является то, что часть теплоты детонации (калорийности) выделяется вне зоны химической реакции. В результате химпик не является стационарной структурой и трансформируется в процессе распространения детонационных волн. В газодинамических экспериментах, в том числе проведенных в РФЯЦ-ВНИИТФ, это проявляется как масштабный эффект – зависимость эффективного давления Жуге от размера образца ВВ.

Диссертационная работа Рубцова И.А. выполнена на высоком уровне, обладает целостностью и понятной логикой. В работе решены все поставленные научные задачи, а объём диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к научно-квалификационной работе на соискание степени кандидата наук. Автореферат диссертации соответствует основным положениям диссертации, её содержанию. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

По содержанию диссертации можно сделать ряд замечаний.

1. Экспериментальные исследования проведены на полихроматическом пучке синхротронного излучения, однако для проведения количественного анализа предпочтительнее использовать монохроматическое излучение.
2. В работе исследуется влияние масштабного фактора (диаметр ВВ) на рост конденсации частиц и кластеров углерода, однако не дано пояснение, какие параметры детонационного процесса (давление, температура, плотность и др.) при этом будут являться определяющими.
3. При оформлении диссертации допущены следующие недочёты: в тексте встречаются орфографические ошибки, в том числе в некоторых словах пропущены буквы, замечен повтор одинаковых по смыслу предложений (страница 20 и 28), на рисунках 51 – 53 отсутствует обозначение величины, характеризующей размер частиц и кластеров углерода.

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

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Рубцова Ивана Андреевича «Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного углерода при детонации энергетических материалов методом малоуглового рентгеновского рассеяния» по уровню выполнения, объёму, актуальности, новизне и значимости полученных результатов представляет собой полноценное законченное научное исследование, соответствующее требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в т.ч. соответствует пункту 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (в ред. Постановлений Правительства РФ от 21.04.2016 № 335, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024, от 01.10.2018 № 1168, от 20.03.2021 № 426), а автор работы, Рубцов Иван Андреевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата 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 (протокол № 040-28/12071дсп от 23.11.2021 г.).

Отзыв подготовил:


Кучко Дмитрий Петрович

Кандидат технических наук по специальности 20.02.16 – «системы контроля и испытания вооружения и военной техники, военная метрология», начальник научно-исследовательского отдела №45, научно-исследовательского отделения №4, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»


 Д.П. Кучко
« 23 » 11 2021 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
« 23 » 11 2021 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
« 23 » ноября 2021 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 Кучко Д.П., 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
«  » 2021 г.

