

## ОТЗЫВ

официального оппонента профессора, доктора технических наук

Е.А. Петрова

на диссертационную работу Рубцова Ивана Андреевича

«ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ

КОНДЕНСИРОВАННОГО УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ»

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

Диссертационная работа Рубцова И.А. посвящена экспериментальному исследованию физико-химических процессов, протекающих в детонационной волне. Физика детонационных процессов исследуется с середины прошлого века, но до сих пор изучена недостаточно. Недостаточность информации о параметрах в зоне детонации обусловлено ограниченностью существующих методик исследования при высоких давлениях и малых временах процесса. В 80-90 годах прошлого века основной прогресс в исследовании был связан с регистрацией профилей давлений и массовой скорости на границе заряда ВВ. Создание и развитие детонационного метода синтеза наноалмазов привело к появлению новых методов таких как, исследование электропроводности продуктов детонации и использование меченных атомов в молекуле ВВ. В этих методах наноалмаз выступает как своеобразная метка для изучения процессов в детонационной волне. В 2000-х годах в Институте гидродинамики СО РАН была разработана методика с использованием синхронного излучения для дистанционного исследования быстропротекающих процессов. Последовательная регистрация мало-углового рентгеновского рассеяния (МУРР) впервые позволила исследовать динамику роста наночастиц во взрывных процессах. Автор в своей работе продолжил эти исследования на более современной установке и в условиях эксперимента реальных к практике. В связи с этим работа является важной и актуальной. Актуальность работы также подтверждается 4-мя грантами РФФИ и грантом Министерства науки и высшего образования РФ в рамках которых выполнялась работа.

**Целью диссертационной работы** является исследование динамики размеров конденсированного углерода при детонации энергетических материалов разного диаметра по измеренным распределениям малоуглового рентгеновского рассеяния в зарядах энергетических материалов по диаметру близких к используемым на практике.

В обеспечении главной цели автором работы: проведена реконструкция экспериментальной станции; разработан алгоритм экспериментального подхода для регистрации динамики МУРР; проведены эксперименты и измерены динамика МУРР при детонации зарядов ВВ диаметром до 40 мм (с суб-наносекундной экспозицией); разработаны методики обработки исходных экспериментальных данных с учетом особенностей станции и проанализированы результаты по динамике процесса конденсации углерода.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 119 страниц, содержит 53 рисунка.

Во введении дается краткая оценка современного состояния исследований в области решаемой научной проблемы, обоснование необходимости проведения работы.

Обоснованы актуальность и новизна темы, ее практическая значимость, указаны области применения результатов работы, перечислены основные цели и задачи исследования.

В первой главе проведен анализ состояния решаемой проблемы, включающий в себя обзор истории синтеза наноалмазов, описание структуры конденсированного углерода и ее многоуровневости, уравнения состояния продуктов детонации и использование синхротронного излучения для изучения конденсации углерода при детонации энергетических материалов.

Во второй главе описаны основные характеристики экспериментальной станции «Экстремальное состояние вещества», описан специальный скоростной рентгеновский детектор DIMEX, а также методика проведения эксперимента по измерению малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением и приведены экспериментальные результаты.

В третьей главе доказана возможность применения метода малоуглового рентгеновского рассеяния на полихроматическом излучении, а также представлены разработанные методики обработки экспериментальных данных по восстановлению информации об объекте и экспериментальные результаты. Рассмотрены возможные методические ошибки при вычислении размеров наночастиц.

В четвертой главе приводится основной результат данной работы – двухстадийный механизм конденсации углерода и обсуждение особенностей конденсации углерода, а также описываются перспективы дальнейшего развития данной работы.

Каждая глава заканчивается заключением к главе. В заключительной части сформулированы основные результаты и выводы работы.

**Научная новизна** работы заключается в следующем: впервые измерены временные характеристики процесса и размеры частиц конденсированного углерода на зарядах массой 200 грамм, то есть в условиях реальных к практике; получены результаты по длительной динамике размеров рассеивающих структур конденсированного углерода, показавшие что динамика размеров конденсированного углерода превышает зону химической реакции; продемонстрирована возможность, разработаны численные модели восстановления информации по угловым распределениям малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением и предложен механизм формирования конденсированного углерода. Научная новизна работы подтверждается публикациями автора в 5-ти статьях в рецензируемых журналах, входящих в международные реферативные базы данных Web of Science и Scopus.

**Практическая значимость** заключается: в совершенствовании экспериментальной установки и методов обработки данных позволивших изучать процессы в детонационной волне с массой ВВ 200 грамм; в разработке концепции по созданию новой более эффективной и информативной экспериментальной установки. Данные, изложенные в диссертации, используются для построения моделей конденсации углерода и учета энергии формирования частиц углерода в зоне химической реакции и за ней. Они также важны для калибровки и верификации уравнений состояния продуктов детонации, учитывающих детальный химический состав газовых и конденсированных продуктов. Также результаты работы могут быть полезны при синтезе углеродных наноматериалов, в том числе наноалмазов.

**Достоверность** представленных в работе результатов обусловлена использованием современных экспериментальных методик и подходов, а также

воспроизводимостью полученных данных. Вновь полученные результаты согласуются как с известными ранее, так и с данными аналогичных исследований зарубежных коллег, ведущихся параллельно.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний и неточностей в оформлении.

1. Как согласуются размеры первичных частиц конденсированного углерода с ранними работами Института гидродинамики и современными работами других исследователей?

2. Во введении и литературном обзоре, вопросам образования алмазов уделялось большое внимание, но в анализе экспериментальных результатов кинетика применительно к образованию алмазов не обсуждается. Какие практические рекомендации по синтезу НА выданы АО «ГосНИИмаш»?

3. В главе 3 при описании методики экспериментальных данных при расчетах сигнала МУРР форма частицы принята сферической. В литературном обзоре показано, что в ТНТ, ТГ, ТАТБ в продуктах синтеза кроме сферических частиц формируются углеродные волокна до десятков нанометров. Полученные экспериментальные данные угловых распределений МУРР для ТНТ, ТАТБ имеют слабую амплитуду и сложно поддаются анализу. Автор связывает это с малым содержанием алмаза или они очень малы. Возникает вопрос? Можно ли отнести все изложенное выше к ограничениям, снижающим возможности метода?

4. Как можно объяснить снижение размера кластерных частиц с увеличением диаметра или массы ВВ в экспериментах?

5. Имеются неточности, например, в диссертации на странице 96 ссылка 128 не соответствует содержанию; в автореферате не показаны плотности зарядов, исследуемых ВВ; при описании одних и тех же углеродных структур (стр. 11 автореферата, стр. 81 диссертации), автор использует разные термины (то конгломераты, то кластеры).

Сделанные замечания не затрагивают основных результатов и выводов диссертации и не снижают общего положительного впечатления от рассматриваемой диссертации, как о законченной научно-исследовательской работе, выполненной на современном научно-техническом уровне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Рубцова Ивана Андреевича «Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного углерода при детонации энергетических материалов методом малоуглового рентгеновского рассеяния» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком научно-техническом уровне, в которой получены результаты с использованием метода малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением для изучения кинетики процесса конденсации углерода при детонации энергетических материалов.

Научные положения и выводы, сформулированные автором, не вызывают сомнений. Результаты диссертационной работы оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью. Большая часть результатов отражена в высокорейтинговых публикациях и апробирована на международных и всероссийских профильных конференциях. Содержание автореферата соответствует и в достаточном объеме отражает материалы диссертационной работы.

Диссертационная работа в полной мере соответствует паспорту специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, в том числе п.1 «экспериментальные методы исследования химической структуры и динамики химических превращений», п.7 «связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения» и п. 8 «взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые горением и взрывчатым превращением».

Считаю, что диссертационная работа Рубцова Ивана Андреевича «Исследование динамики размеров наночастиц конденсированного углерода при детонации энергетических материалов методом малоуглового рентгеновского рассеяния» отвечает пункту 9 «Положения о присуждении ученых 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 ее автор, 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.

Официальный оппонент

Петров Евгений Анатольевич

Доктор технических наук, профессор

Специальность 05.17.07 – химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

декан инженерного спецфакультета

Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

659305, Алтайский край, г. Бийск, улица имени Героя Советского Союза Трофимова, 27

Телефон: (3854) 43-22-84, (3854) 30-59-77

Электронная почта: isf@bti.secna.ru

16 ноября 2021 г.

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

Подпись декана инженерного спецфакультета, д.т.н., профессора Е.А. Петрова заверяю

Ученый секретарь Ученого Совета БТИ АлтГТУ,

к.т.н.

16 ноября 2021 г.



/Е.В. Сыпин