

На правах рукописи

Рубцов Иван Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ  
КОНДЕНСИРОВАННОГО УГЛЕРОДА ПРИ ДЕТОНАЦИИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ  
МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,  
физика экстремальных состояний вещества

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

**Научный  
руководитель**

**Тен Константин Алексеевич**

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики взрыва

**Официальные  
оппоненты**

**Вуль Александр Яковлевич**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики кластерных структур, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

**Петров Евгений Анатольевич**

доктор технических наук, профессор, декан инженерного спецфакультета, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

**Ведущая  
организация**

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»), г. Снежинск

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 г. в 15-00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.150.01 при ФГБУН Институте химической кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН) по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИХКГ СО РАН и на сайте <http://kinetics.nsc.ru>. Текст автореферата размещён на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, Институтская, 3, ИХКГ СО РАН, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.150.01; e-mail: [ref\\_dissovet@kinetics.nsc.ru](mailto:ref_dissovet@kinetics.nsc.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2021 года

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат химических наук



И.П. Поздняков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Впервые синтез наноалмаза (НА) из углерода молекул энергетических материалов (ЭМ) с отрицательным кислородным балансом был открыт в 1963 году во Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики имени академика Е.И. Забабахина (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск). В 1982 году синтез НА был повторно открыт независимо в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН совместно с ФНПЦ «Алтай» и в Институте проблем материаловедения.

С 1988 года в мире издано больше тысячи работ, посвященных изучению конденсации углерода (в основном в виде НА) при детонации ЭМ. Подавляющее число работ связано с изучением сохраненных продуктов взрыва. Основные усилия исследователей были направлены на увеличение выхода НА и технологию очистки шихты (сохраненного углеродного остатка). Динамических экспериментов с непосредственным измерением во время взрыва в то время проводить не могли, но в части работ было высказано мнение, что НА образуются в зоне химической реакции.

Второй всплеск интереса к изучению процессов конденсации углерода при детонации ЭМ возник при изучении триаминотринитробензола (ТАТБ) в ядерных центрах России и США, когда было показано, что предположение о дополнительном выделении энергии (~30% в течении 300 нс за зоной химической реакции) лучше описывает экспериментальные данные по ускорению металлических фольг. Позднее была предложена расчетная модель учитывающая длительное энерговыделение не только для ТАТБ, но и для ряда остальных ЭМ с отрицательным кислородным балансом. Данная модель учитывает дополнительную энергию, выделяющуюся при экзотермической коагуляции углеродных частиц, и позволила объяснить результаты проведенных экспериментов.

Возможность использования коротких высоко-периодических вспышек синхротронного излучения (СИ) от ускорителей высоких энергий позволяет проследивать временную эволюцию сигнала малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) при детонации

ЭМ, а анализ его распределения по углу позволяет восстановить динамику средних размеров частиц конденсированного углерода при детонации ЭМ. При исследовании конденсации углерода в детонационной волне регистрируется сигнал МУРР от неоднородностей плотности в малые углы. В этом случае неоднородностями плотности выступают наночастицы конденсированного углерода.

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время отсутствует понимание (не хватает экспериментальных данных) о физико-химических процессах, происходящих на фронте детонации (как и почему атомы углерода формируют структуру конденсированного углерода, в т.ч. алмаза).

В настоящее время большинство работ по изучению конденсации углерода при детонации ЭМ изучают сохраненный конденсированный углерод. При этом не учитывают, где он сформировался: в зоне химической реакции, в процессе догорания в волне Гейлора или в процессе очистки. Так, в некоторых работах показано, что размер НА после очистки больше его размера в неочищенных продуктах, и это еще один фактор необходимости проведения измерения прямо во время взрыва, желательно в зоне химической реакции.

Полученные прямые экспериментальные данные о параметрах вещества в зоне химической реакции позволят уточнить уравнения состояния продуктов взрыва, повысить эффективность и безопасность использования взрывчатых материалов, в том числе для боеприпасов; а также улучшить динамический синтез детонационного алмаза.

МУРР является эффективной динамической методикой измерения размеров частиц в нанометровом диапазоне, и регистрация угловых распределений МУРР с пикосекундной экспозицией в дальнейшем найдет применение и в изучении других динамических процессов (ударные волны, разрушение материалов).

### **Степень разработанности темы исследования**

Кинетика конденсации углерода в процессе детонации ЭМ на данный момент остается малоизученной (экспериментально). В

основном все работы посвящены исследованию сохраненного углеродного остатка, собранного после взрыва.

Тот небольшой круг экспериментальных работ, ведущихся по изучению динамики конденсации углерода с помощью синхротронного излучения, посвящен зарядам диаметром менее 20 мм. Так до проведения данной работы в мире не было экспериментальных установок позволяющих исследовать динамику конденсации углерода во время детонации зарядов ЭМ диаметром более 20 мм.

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

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать экспериментальный подход для регистрации динамики МУРР;
2. Провести экспериментальные исследования и измерить динамику угловых распределений МУРР при детонации зарядов ЭМ диаметром до 40 мм (с суб-наносекундной экспозицией);
3. Разработать численные модели обработки экспериментальных данных с учетом особенностей станции;
4. Восстановить динамику размеров конденсированного углерода (рассеивающих неоднородностей продуктов взрыва);
5. На основе анализа экспериментальных данных сделать выводы о кинетике процесса конденсации углерода и его структур.

### **Научная новизна**

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

МУРР с высоким временным разрешением и предложен механизм формирования конденсированного углерода.

Полученные результаты являются уникальными для зарядов ЭМ массой около 200 грамм, так до проведения данной работы в мире не было экспериментальных установок, позволяющих исследовать динамику конденсации углерода во время детонации зарядов ЭМ диаметром более 20 мм.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Экспериментальные 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 компонент. Также результаты работы могут быть полезны при синтезе углеродных наноматериалов, в т.ч. НА.

Полученные результаты используются для уточнения уравнений состояния продуктов детонации взрывчатых составов, используемых Российскими ядерными центрами (РФЯЦ-ВНИИТФ и РФЯЦ-ВНИИЭФ), также по результатам работы даны рекомендации АО «ГосНИИмаш» по синтезу НА.

### **Методология и методы исследования**

В качестве основного экспериментального метода использован метод малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением в сочетании с разработанными программными алгоритмами для обработки экспериментальных данных.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментальный подход, который позволяет регистрировать динамику угловых распределений малоуглового рентгеновского рассеяния (дифракционное кино) при детонации зарядов энергетических материалов диаметром до 40 мм.
2. Время формирования конденсированной фазы углерода (изменения угловых распределений малоуглового рентгеновского

рассеяния) значительно превосходит длительность зоны химической реакции и составляет несколько микросекунд.

3. Численные модели обработки экспериментальных данных малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением, учитывающие особенности регистрации быстропротекающих процессов, которые позволили восстановить динамику среднего размера рассеивающих неоднородностей методом Гинье, динамику распределения частиц по размерам и динамику двухуровневой структуры конденсированного углерода (размера частиц и кластеров).

4. Двухстадийный механизм формирования конденсированного углерода: существует два характерных времени формирования конденсированной фазы и изменения ее формы. В первой быстрой фазе, с учетом 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, размер частиц практически не меняются.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

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.

Признание значимости результатов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах и высокими оценками на конференциях.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Семинар взрывных отделов ИГиЛ СО РАН от 17.06.2019 г., 28.06.2021г.

- Семинар ИЯФ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИК СО РАН, Проектного офиса ЦКП «СКИФ» «Реализация методов малоуглового рентгеновского рассеяния с использованием СИ» 18.02.2019 г.
- 6th International Detonation Symposium, Кембридж, США, 2018 г.
- 5th International Symposium on Explosion, Shock Wave and High-strain-rate Phenomena, Пекин, 2016 г.
- Международная конференция Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны, г. Саров, 2017, 2019 г.
- Международная конференция Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, 2017, 2021 г.
- Международная конференция «Современные углеродные наноструктуры» Санкт-Петербург, 2017, 2019 г.
- Международная конференция Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике, Новосибирск, 2020 г.
- Международная конференция «Синхротронное и терагерцовое излучение: генерация и применение» 2016, 2018 г.
- Международная конференция «Уравнения состояния вещества» Эльбрус, 2016, 2018 г.
- Научно-техническая конференция «Проектирование систем» Москва, 2017, 2020, 2021 г.
- Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Материалы и технологии XXI века» Бийск, 2019 г.
- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов» Бийск, 2018, 2021 г.

#### **Личный вклад соискателя**

Автор провел математический расчет реального спектра излучения, провел математический расчет МУРР, осуществлял



подготовку экспериментальныхборок, участвовал в разработке концепции и реконструкции станции (постройке радиационной защиты, юстировке взрывной камеры), проводил настройку станции (коллиматора и детектора) перед экспериментом, лично проводил взрывные эксперименты совместно с соавторами основных публикаций согласно требованиям проведения работ на экспериментальной станции, разработал и реализовал в виде программного кода модели восстановления структуры рассеивающих центров, осуществлял интерпретацию экспериментальных данных и подготовку публикаций, участвовал в разработке концепции экспериментальной станции «Быстропротекающие процессы» на источники СИ ЦКП «СКИФ». Все представленные к защите в диссертации результаты получены лично автором.

### **Соответствие специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества**

Диссертационная работа соответствует 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» паспорта специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 119 страниц, из них 100 страниц текста, включая 53 рисунка. Библиография включает 138 наименований на 17 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** отражена 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 объем диссертации.

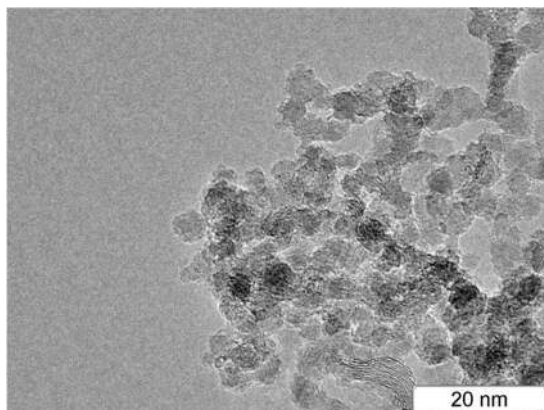
В **Главе 1** представлен литературный обзор, включающий в себя обзор истории синтеза НА, описание структуры конденсированного углерода, уравнения состояния продуктов детонации и использование синхротронного излучения для изучения конденсации углерода во время детонации ЭМ.

Большой интерес к работам по изучению процесса конденсации углерода возник в начале 2000-х годов при изучении взрывчатых составов на основе ТАТБ. Тогда было показано, что предположение о выделении части энергии за зоной химической реакции позволяет лучше описать экспериментальные данные. Таким образом, определение количества длительно выделяющейся энергии необходимо для совершенствования теоретических моделей детонации и требует экспериментальных данных по кинетике конденсации углерода за детонационным фронтом.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященных исследованием детонационного углерода, но большая их часть посвящена изучению сохраненного углеродного остатка различными методиками, а для исследования процесса конденсации углерода на ранних стадиях требуются методики *in situ*. Такой методикой является малоугловое рентгеновское рассеяние СИ. Она является невозмущающей и позволяет проследить динамику процесса конденсации углерода в детонационном процессе.

Сегодня методика малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением для исследования взрывных процессов активно развивается. Аналогичная станция построена и введена в эксплуатацию в США на ускорительном комплексе Advanced Photon Source (APS). Станция использует современный источник СИ и по многим техническим характеристикам является мировым лидером и активно развивается.

Стоит отметить, что одной из проблем количественного описания конденсированного углерода в продуктах детонации взрывчатых веществ является его сложная структура (Рисунок 1). Формируются частицы разного размера, объединяющиеся в конгломераты. Одним из возможных способов описания является двухуровневая структура конденсированного углерода в сохраненных продуктах взрыва, которая состоит из частиц и кластеров, формируемых этими частицами.



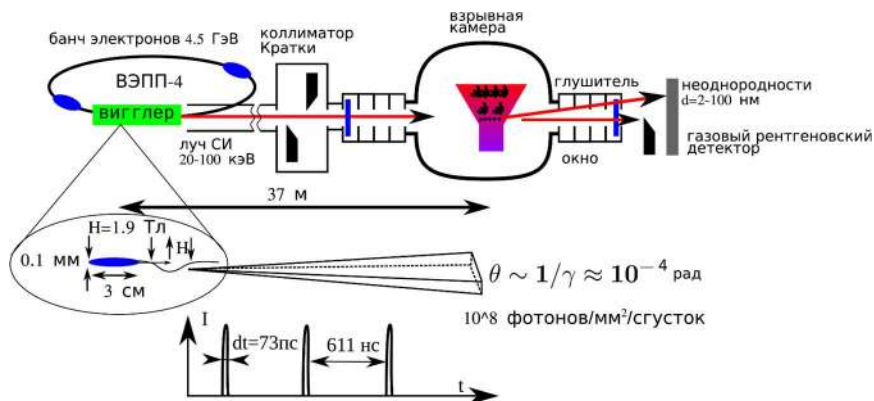
**Рисунок 1.** Фотография с просвечивающего электронного микроскопа сохраненных продуктов взрыва смеси тротила с гексогеном.

С точки зрения фундаментальной науки, изучение процесса конденсации углерода обеспечивает экспериментальный вклад в разработку моделей кинетики реакции при детонации ЭМ, а высококачественные уравнения состояния, с учетом конденсации углерода, являются необходимым шагом на пути к моделированию поведения ЭМ в различных условиях и системах.

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

Общая схема установки представлена на рисунке 2. СИ образуется при движении в магнитном поле (ускорении)

заряженных частиц (например, электронов), при этом спектр такого излучения находится в широком диапазоне длин волн. В наших экспериментах СИ генерировалось специальным вставным устройством в накопителе ВЭПП-4 – вигглером с индукцией магнитного поля 1.9 Тл. Использовался двухбанчевый режим работы ускорительного комплекса с током около 10 мА, энергией электронных сгустков 4.5 ГэВ и периодичностью 611 нс (продолжительность импульса СИ составляла 73 пс).

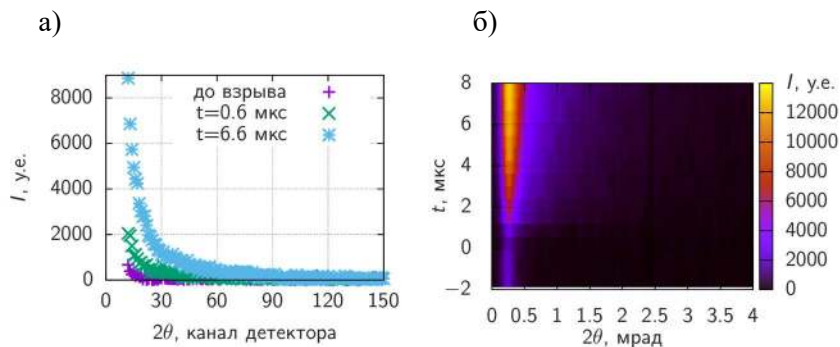


**Рисунок 2.** Общая схема экспериментальной установки.

Падающий на образец (заряд ЭМ) пучок СИ формируется коллиматором Кратки, после прохождения образца прямой пучок «зарезается» ножом, а рассеянное излучение регистрируется сверхбыстрым одномерным детектором DIMEX. За время импульса СИ (73 пс) детектор DIMEX записывает в свою память угловое распределение интенсивности МУРР (в дальнейшем это распределение МУРР будет называться кадром).

На рисунке 3а представлены несколько кадров первичных экспериментальных данных углового распределения МУРР при детонации смеси тротил-гексоген 50/50 диаметром 40 мм. Угол рассеяния  $2\theta$  измеряется в каналах детектора или миллирадианах (1 канал = 0.02914 мрад). Нулевой кадр по времени совмещен с прохождением фронта детонации. На кадрах видно увеличение интенсивности МУРР в течении 6 мкс, а также увеличение наклона кривых МУРР. В полном виде экспериментальные данные

представлены на рисунке 3б, где цветом обозначена интенсивность, по оси x отложен угол рассеяния, а по оси y – время.



**Рисунок 3.** Угловое распределение МУРР при детонации заряда тротил-гексоген диаметром 40 мм в разные моменты времени. Несколько кадров через 6 мкс (а), полный фильм (б).

В результате проделанной экспериментальной работы впервые в мире получены экспериментальные кривые рассеяния во время детонации взрывчатых веществ (смеси тротила с гексогеном, тротила и ЭМ на основе триаминотринитробензола) диаметром до 40 мм.

Полученные экспериментальные данные угловых распределений МУРР при детонации ТНТ и ТАТБ имеют слабую амплитуду, большой уровень шума и сложно поддается анализу. Это можно объяснить тем, что в конденсированном углероде этих ЭМ мало алмаза или они малы (по сравнению с ТГ), что подтверждается литературными данными.

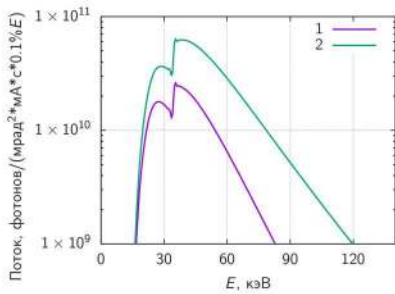
В **Главе 3** показана возможность работы метода малоуглового рентгеновского рассеяния на полихроматическом излучении, а также описаны разработанные методики обработки экспериментальных данных по восстановлению информации об объекте.

Классическая теория МУРР построена для монохроматического излучения, однако в динамических экспериментах использование монохроматического излучения невозможно ввиду малого количества фотонов.

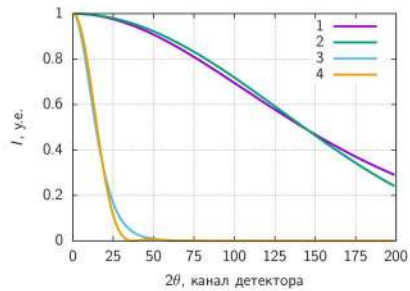
Поскольку исследуемый процесс является быстропротекающим, время экспозиции составляет 73 пс, существующей интенсивности пучка СИ недостаточно для использования монохроматического излучения в измерениях МУРР, т.к. интенсивность рассеянного излучения на несколько порядков меньше, чем в прямом пучке. Поэтому в экспериментах использовалось излучение с реальным (сквозным) спектром.

На спектральную характеристику излучения СИ на станции влияют несколько факторов: во-первых, это спектральная характеристика самого источника, во-вторых, это зависимость эффективности регистрации детектора от энергии фотонов, и, в-третьих, это поглощение в образце. Объединение всех этих факторов называется реальным (сквозным) спектром, который представлен на рисунке 4.

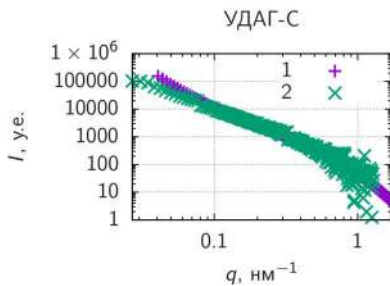
Для применимости классической теории МУРР и обработки данных методом Гинье была введена эффективная энергия фотонов. Эффективная энергия определялась методом наименьших квадратов таким образом, чтобы отклонение между расчетным сигналом МУРР от реального спектра излучения на станции и расчетным сигналом МУРР от эффективной энергии было минимальным. Возможность такой замены, а также тот факт, что разным частицам соответствует разный наклон сигнала МУРР (Рисунок 5) позволяет сделать вывод о корректности такой замены и возможности использования такого спектра для восстановления информации о рассеивающем объекте. Также это было показано экспериментально – сравнением угловых распределений МУРР от сохраненных продуктов взрыва на специализированной станции по измерению МУРР «БиоМУР» (Курчатовский источник синхротронного излучения (КИСИ), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва) с экспериментальными данными, полученными в статике на станции «Экстремальное состояние вещества» (в условиях приближенных к реальному эксперименту) (Рисунок 6).



**Рисунок 4.** Реальный спектр излучения на станции «Экстремальное состояние вещества», 1 – до июля 2017 г., 2 – с января 2018 г.



**Рисунок 5.** МУРР с учетом реального спектра (1 для частиц размером 4 нм, 3 – 40 нм) и для эффективной энергии (2 для частиц размером 4 нм, 4 – 40 нм).



**Рисунок 6.** Сравнение сигналов МУРР от сохраненных продуктов взрыва (УДАГ-С, производства ФНПЦ «Алтай»), полученных на КИСИ (1) и ВЭПП-4 (2). По оси X отложен вектор рассеяния  $q = 4\pi \sin(\theta)/\lambda$ .

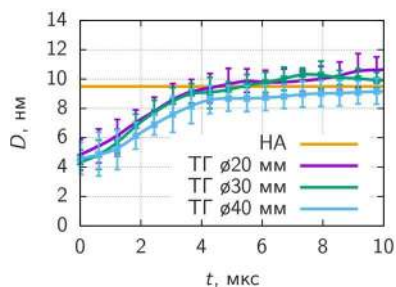
Для обработки экспериментального сигнала было разработано 3 методики:

1. Определение динамики среднего размера рассеивающих неоднородностей методом Гинье – по изменению угла наклона распределений МУРР в координатах логарифм интенсивности от квадрата вектора рассеяния. Результаты обработки экспериментальных данных динамики угловых распределений МУРР при детонации смеси тротила с гексогеном данным методом представлены на рисунке 7.

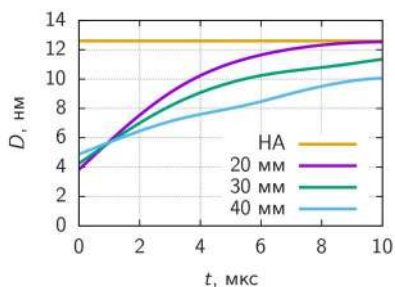
2. Определение динамики распределения частиц по размерам – сравнение экспериментального сигнала с расчетным от набора сферических частиц разного размера. Результаты обработки экспериментальных данных динамики угловых распределений

МУРР при детонации смеси тротила с гексогеном данным методом представлены на рисунке 8.

3. Определение динамики двухуровневой структуры – сравнение экспериментального сигнала с расчетным. При этом расчетный сигнал считался от сгенерированной базы кластеров (кластеры из частиц разного размера, с различным количеством частиц). Результаты обработки экспериментальных данных динамики угловых распределений МУРР при детонации смеси тротила с гексогеном данным методом представлены на рисунке 9.



**Рисунок 7.** Динамика размеров рассеивающих неоднородностей конденсированного углерода при детонации зарядов смеси тротила с гексогеном диаметром 20, 30 и 40 мм полученная методом Гинье.



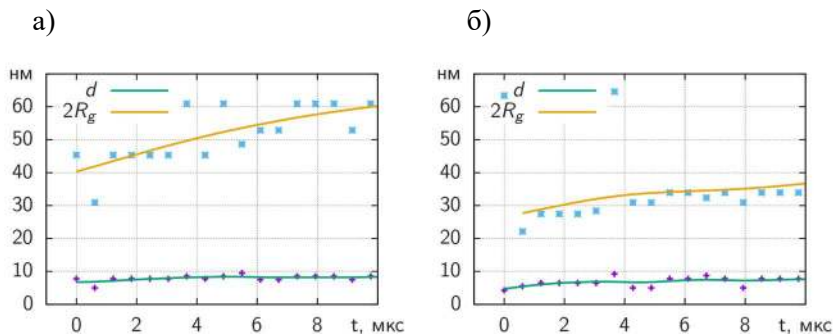
**Рисунок 8.** Динамика размеров рассеивающих неоднородностей конденсированного углерода при детонации зарядов смеси тротила с гексогеном диаметром 20, 30 и 40 мм полученная из распределения частиц по размерам.

Таким образом, в качестве результата удалось получить зависимости размеров частиц и кластеров (Рисунок 9), распределения частиц по размерам (Рисунок 8), а также среднего размера рассеивающих неоднородностей (конденсированной фазы углерода) (Рисунок 7) от времени непосредственно в детонационном течении.

Стоит отметить, что разработанные методики нечувствительны к количеству рассеивающего углерода и определяют только размеры частиц и структуру коагуляционных кластеров (средний размер рассеивающих неоднородностей, распределение частиц по размерам). Эта важная особенность упрощает обработку



экспериментальных данных и позволяет не учитывать интенсивность падающего излучения. Определение количества рассеивающих центров является актуальной задачей, но выходит за рамки настоящей работы.



**Рисунок 9.** Зависимости размера частиц (зеленая линия) и кластеров (желтая линия) от времени при детонации заряда смеси тротила с гексогеном диаметром 20 мм (а) и 40 мм (б).

В **Главе 4** приводится обсуждение особенностей конденсации углерода, основной результат данной работы – двухстадийный механизм конденсации углерода и описываются перспективы дальнейшего развития данной работы.

Двухстадийный механизм конденсации углерода заключается в следующем: можно выделить два характерных времени формирования конденсированной фазы и изменения ее формы. В первой быстрой фазе, с учетом 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.

Следует отметить, что в проведенных экспериментах не наблюдается яркой зависимости процесса конденсации углерода от диаметра заряда ЭМ (в исследуемом диапазоне, от 20 до 40 мм).

Реализованная методика показала свою эффективность в исследовании детонационных процессов. В качестве дальнейшего развития работы ведется разработка и в дальнейшем будет создана

новая экспериментальная станция «Быстропротекающие процессы» на источнике синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ» в наукограде Кольцово (Новосибирская область). На сегодняшний день разработана и предложена концепция экспериментальной станции. Основное направление этой станции связано с реализацией метода малоуглового рентгеновского рассеяния со сверхбыстрым временным разрешением, с учетом опыта работы на имеющемся сегодня оборудовании.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

К основным результатам проведенной работы следует отнести следующее:

1. Разработан экспериментальный подход, который с помощью развития методики динамической регистрации угловых распределений МУРР (дифракционное кино с суб-наносекундной экспозицией) позволил 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 ее формы. В первой быстрой фазе, с учетом 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.

Полученные в работе экспериментальные данные уже используются в расчетах Российских ядерных центров. Также по

результатам работы даны рекомендации АО «ГосНИИмаш» по синтезу детонационных алмазов и предложена концепция экспериментальной станции по сверхбыстрой регистрации МУРР на источнике СИ ЦКП «СКИФ» в качестве дальнейшего развития работы.

### Публикации по теме диссертации

5 статей в рецензируемых международных журналах, входящих в международные реферативные базы данных Web of Science и Scopus изданиях (рекомендованных ВАК)

1. **Rubtsov, I. A.** Synchrotron radiation method for study the dynamics of nanoparticle sizes in trinitrotoluene during detonation / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, B. P. Tolochko, L. I. Shechtman, V. V. Zhulanov // *Physics Procedia*. – 2016. – V. 84. – P. 374–381.
2. **Rubtsov, I. A.** The growth of carbon nanoparticles during the detonation of trinitrotoluene / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – V. 754. – P. 052004.
3. **Rubtsov, I. A.** Methods to restore the dynamics of carbon condensation during the detonation of high explosives / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, S. I. Kremenko, M. S. Voronin, L. I. Shekhtman, V. V. Zhulanov, B. P. Tolochko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1147. – P. 012038.
4. Satonkina, N. P. Elongated conductive structures in detonation soot of high explosives / N. P. Satonkina, A. P. Ershov, A. O. Kashkarov, **I. A. Rubtsov** // *RSC Advances*. – 2020. – V. 10. – P. 17620–17626.
5. **Rubtsov, I. A.** Restoring size of detonation nanodiamonds from small-angle X-Ray scattering of polychromatic synchrotron radiation beam / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, Ya. V. Zubavichus, G. S. Peters, A. A. Veligzhanin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – V. 1787, N 1. – P. 012029.

1 статья в журнале из Перечня ВАК:

6. **Рубцов, И. А.** Измерение малоуглового рентгеновского рассеяния от наночастиц углерода при детонации энергетических материалов / И. А. Рубцов, К. А. Тен, Э. Р. Прууэл, В. М. Титов, А. О. Кашкаров // Боеприпасы XXI век. – 2017. – № 1. – С. 221–223.

1 статья в трудах конференции:

7. **Rubtsov, I. A.** Carbon condensation during detonation of high explosives of various diameters / I. A. Rubtsov, K. A. Ten, V. M. Titov, E. R. Prueel, A. O. Kashkarov, S. I. Kremenko, B. P. Tolochko // Proceedings Sixteenth International Detonation Symposium. Publication N ONR-43-5762-19. – 2019. – P. 735–739.