

На правах рукописи

Саламатов Виталий Георгиевич

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Специальность 01.04.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Томск - 2009

Работа выполнена в отделе структурной макрокинетики Томского научного центра сибирского отделения РАН (ОСМ ТНЦ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Кирдяшкин Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Немова Татьяна Николаевна

доктор физико-математических наук,
профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Ведущая организация: **Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, г. Черноголовка**

Защита состоится « 27 » октября 2009 года в 14 часов 30 минут на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ауд. 228 (10 корпус ТПУ)

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь, к. ф.-м. н., доцент

О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) относится к перспективным методам получения широкого класса неорганических материалов. СВС является разновидностью гетерогенного горения и характеризуется преимущественной локализацией процессов химической конвертации реакционной системы в конденсированных фазах с образованием тугоплавких продуктов взаимодействия. Спецификой данного процесса являются: высокие значения температуры (до 3200 К), малые характерные времена реакционного превращения ($10^{-1} \div 10^{-3}$ с) и высокий температурный градиент волны горения (более 10^8 К/м). Процесс синтеза включает в себя сложный набор взаимовлияющих структурных и химических превращений вещества реакционной системы в различных фазовых состояниях (твердом, жидком, газообразном). Все это создает значительные трудности исследования процессов СВС.

Известно, что спектрально-оптические методы обладают высокой эффективностью для прямой диагностики быстропротекающих высокотемпературных процессов горения. Однако применительно к СВС эти методы на сегодняшний день существенно ограничены в возможностях динамического контроля параметров тепловых полей, состояния конденсированной и газовой фаз, а также других характеристик реакционной волны, которые необходимы для углубленного понимания механизма процесса.

Относительно недавно обнаружено, что протекание СВС характеризуется сильным отклонением реакционной системы от условий равновесия. Процесс сопровождается генерацией газовой плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц (до 10^{22} м⁻³), потоком «горячих» электронов с энергетическим спектром до 150 эВ, радиочастотным излучением СВЧ-диапазона и другими неравновесными эмиссионными эффектами, имеющих нетепловую природу. В этом случае знание спектрального состава электромагнитного излучения СВС в широком диапазоне длин волн необходимо для контроля промежуточных этапов физико-химических превращений реакционной системы и получения дополнительной информации о механизме энергопереноса в ходе процесса. К настоящему времени отсутствуют сведения о параметрах спектра излучения СВС в коротковолновом оптическом и рентгеновском диапазонах.

Цель диссертационной работы.

Исследование тепловой, структурной динамики и спектрального состава коротковолнового электромагнитного излучения гетерогенных систем в процессах СВС с использованием высокоскоростных методов оптической диагностики. Уточнение физических моделей СВС на основе полученных экспериментальных данных.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи.

1. Разработка оптических регистрирующих систем и методов высокоскоростного контроля теплового, структурного состояний вещества в волне СВС.

2. Изучение теплофизических характеристик волны горения порошковых систем Ti–B–Cu, Ti–Mo–N₂ и FeTiO₃–Al–Si–C с использованием разработанных оптических методов.

3. Исследование состава и динамики излучения СВС в коротковолновом оптическом и рентгеновском диапазонах.

Научная новизна работы.

1. Разработаны оригинальные пирометрические методики для изучения тепловой структуры волны СВС, основанные на обработке данных видеозаписи процесса методом цветовой пирометрии и путем сопоставления сплошных спектров излучения конденсированных продуктов реакции и эталонной светоизмерительной лампы.

2. Разработана оригинальная методика исследования структурной динамики волны горения гетерогенных систем, основанная на съемке процесса в отраженных лучах лазерного излучения через набор светофильтров, настроенных на длину волны лазера.

3. Впервые создана и апробирована экспериментальная установка для проведения комплексного оптического контроля температурных полей, характеристик структурных превращений гетерогенных систем в волне горения с разрешением в пространстве до 10 мкм, во времени до 5 мс и в температурном интервале 1000÷3200 К, а также динамического измерения спектрального состава электромагнитного излучения СВС в диапазоне 200÷1100 нм.

4. Получены новые данные о характеристиках тепловой структуры волны нестационарного горения в системах Ti–B–Cu, Ti–Mo–N₂ и FeTiO₃–Al–Si–C. Уточнены механизмы влияния эффектов капиллярного перераспределения расплавов в волне горения на формирование структуры продуктов.

5. Впервые установлено, что СВС в порошковых системах Ti–B, Ni–Al, Zr–B, Fe₂O₃–Al сопровождается интенсивным ультрафиолетовым излучением, состоящим из сплошного и селективного спектров. На основе данных спектрального анализа показано, что в реакционной зоне генерируются ионизированные пары металлов первой и второй кратности ионизации.

6. Впервые показано, что коротковолновая граница эмиссионного спектра СВС в системе Ti–B простирается вплоть до области «мягкого» рентгена с энергией квантов 4.5÷5.5 кэВ.

Методы исследования, применяемые в работе.

В работе использованы пирометрические и термодинамические методы измерения температуры, методы автоматизированного сбора и обработки данных, микрорентгеноспектральный и электронно-растровый методы физико-химического анализа продукта горения, теории твердопламенного и фильтрационного горения.

Практическая значимость работы.

Разработанные в работе оптические методы могут быть использованы в научно-исследовательской практике для контроля процессов гетерогенного горения, а также для разработки СВС–технологии получения пористых проницаемых материалов. Полученные новые данные об эмиссионных эффектах СВС могут быть полезны для создания автономных источников интенсивного ионизирующего излучения.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Исследование физико-химических процессов СВС многофункциональных материалов, в том числе с использованием физических полей», ГР № 01.2.00100846. Работа получила поддержку РФФИ (грант № 05-03-32139-а, № 08-03-0032, № 05-03-98000-р_объ_а, № 08-03-99032-р_офи), фонда CRDF (грант TO-016-02) и фонда Бортника Грант («Умник» № 4808 р/7038).

Реализация результатов.

Разработанные в диссертационной работе экспериментальные методики используются для исследования процессов СВС в ОСМ ТНЦ СО РАН и в образовательном процессе студентов ФТФ ТГУ (специальность физика кинетических явлений).

Защищаемые положения:

1. Методики динамической регистрации тепловых полей и структурных превращений гетерогенных систем в процессах СВС.

2. Результаты исследований тепловой структуры волны нестационарного горения в системах Ti–Mo–N₂, Ti–B–Cu и FeTiO₃–Al–Si–C и капиллярных эффектов в процессе формирования продуктов реакции.

3. Характеристики генерации ультрафиолетового и «мягкого» рентгеновского излучения при протекании СВС в порошковых системах Ti–B, Ni–Al, Zr–B, Fe₂O₃–Al.

Достоверность полученных результатов и выводов основывается на физическом обосновании проведенных исследований и воспроизводимости экспериментальных измерений; определяется применением новейших оптических методов исследования волны СВС, современных методах анализа структуры и фазового состава продуктов реакции, сопоставлением экспериментальных результатов, полученных автором, с имеющимися литературными данными.

Личный вклад автора. Все работы по теме диссертации осуществлены лично автором или при его непосредственном участии: постановка задачи, разработка методик, проведение эксперимента, анализ и обобщение полученных результатов, формулировка выводов по диссертации.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы докладывались на: IV и V Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2004 г., 2006 г.), Первой Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2005 г.), IX International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis (Dijon, France, 2007 г.), IV Международном симпозиуме «Горение и плазмохимия» (Алматы, Казахстан, 2007 г.), 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2008 г.), 6th International Seminar on Flame Structure (Brussels, Belgium, 2008 г.), а также на научных семинарах отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 22 работах в российских и зарубежных журналах, в сборниках трудов и материалах конференций и симпозиумов, в том числе 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 125 наименований и приложения. Работа изложена на 130 страницах, содержит 7 таблиц, 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, поставлены цели, определены задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены защищаемые положения и личный вклад автора.

Первая глава диссертации содержит 2 раздела. В **первом разделе** даны основные понятия о процессе СВС и рассмотрены существующие представления о механизме и режимах протекания реакции. Во **втором разделе** проведен анализ современных спектрально-оптических методов диагностики высокотемпературных процессов и их применения для изучения СВС. Указанные методы позволяют: измерить максимальную цветовую температуру в локальном объеме и распределение яркостной температуры вдоль выделенного направления волны горения; проводить оценку состава выделяющихся газов по спектроскопическим измерениям эмиссионных линий в видимой части спектра. Сформулирована задача о необходимости развития высокоскоростных спектрально-оптических методов исследования волны гетерогенного горения: измерение пространственного распределения тепловых полей, структурных изменений поверхности конденсированных фаз вещества и спектрометрии состояния газовой фазы в коротковолновом оптическом и рентгеновском диапазонах. Отмечается, что комплексное применение указанных методов позволит получить новую информацию о механизме реакции.

Рассмотрен ряд работ, посвященных изучению электронной и ионной эмиссии с поверхности конденсированных фаз, ионизации газа при горении ряда гетерогенных систем.

Вторая глава является методической. Приведены характеристики исходных реагентов реакционных систем, методы приготовления смесей и исследования синтезированных материалов. Описаны разработанные оптические методики, и экспериментальная установка для проведения комплексного оптического контроля тепловых полей, структурных превращений гетерогенных систем в волне горения и спектрального состава излучения СВС.

Характеристики реакционных систем, методы приготовления смесей и исследования синтезированных материалов.

Исходными компонентами реакционных систем служили порошки: Ti (ПТМ); В (98% частоты); Cu (ПМС-1); Mo (ТУ48-19-69-73); FeTiO₃ (ТУ48-4-267-95); Al (АСД-4); Si (КР-3), С (ПМ-15), Ni (ГОСТ 9722-71), Fe₂O₃ (ТУ 6-09-1418-78), Zr (ПЦРК1). Для удаления влаги и легколетучих примесей компоненты предварительно подвергались термовакuumной обработке в сушильном шкафу СНВС-4,5.4,5.4/3-И1. СВС проводили в газообразном азоте (ГОСТ 9293-74), аргоне (ГОСТ 10157-79), гелии (МАРКА А ТУ-51-940-80) и в воздушной среде при давлениях от 70 Па до 1,5 МПа. Компоненты смешивали в соотношениях: Ni + 31.5 мас. % Al, Fe₂O₃ + 25.3 мас. % Al, Ti+9.3 мас.%B+70 мас.%Cu; Ti + 35 мас. % Mo; 54.58 мас.% FeTiO₃ + 19.62 мас.% Al+23.1 мас.% Si+2.7 % мас. С; Ti + 31.1 мас. % B;

Zr + 19.2 мас. % В и формовали в виде плоских брикетов насыпной плотности, а также в виде цилиндров диаметром $20 \cdot 10^{-3}$ м, с плоской боковой поверхностью, имеющих относительную плотность $\rho_{от} = 0.3 \div 0.6$.

Продукты реакции исследовались с использованием оптической и электронно-растровой микроскопии (Philips Sem 515), а также с помощью микрорентгеноспектрального анализатора (Camebax-Microbeam).

Разработанная экспериментальная установка для динамического контроля тепловых, спектральных и структурных характеристик СВС включает в себя – цифровую видеокамеру Panasonic DA 1EV с объективом от микроскопа МБС-10, высокоскоростную цветную видеокамеру Motion ProX3 с объективом Pentax C31204, лазер на парах CuBr ($\lambda = 510.6$ нм и 578.2 нм, мощность $P = 15$ Вт), спектрометры для анализа излучения в различных диапазонах длин волн, АЦП La20USB «Руднев–Шиляев» для записи сигнала термопары, ПК, а также специальную систему синхронизации измерений. Излучение реакционной системы анализировалось с помощью спектрометров: HR4000 (Ocean Optics B.V., диапазон 200÷300 нм); EPP2000C-25 (StellarNet Inc., диапазон 300÷400 нм); Спектра (ИТМ, Томск, диапазон 300÷1100 нм). Калибровка спектрометров проводилась по непрерывному спектру вольфрамовой лампы СИ 10-300у (видимый диапазон), а также по селективному спектру излучения эксиламп XeCl-BD-S (интервал 307÷309 нм, $P = 1.1$ кВт) и XeBr-CD (интервал 280÷284 нм, $P = 0.7$ кВт).

Методика регистрации структурных превращений гетерогенных систем в волне горения. Образцы с плоской боковой поверхностью (рис. 1) устанавливались в реакционной камере с окном. Горение смесей инициировалось с помощью вольфрамовой спирали, нагретой электрическим током. Изменения топологии реакционных систем в ходе реакции контролировали путем съемки процесса в отраженных лучах лазерного излучения (рис.1) через набор светофильтров ОС17 + СЗС21, ОС17 + СЗС 21, настроенных на длину волны лазера.

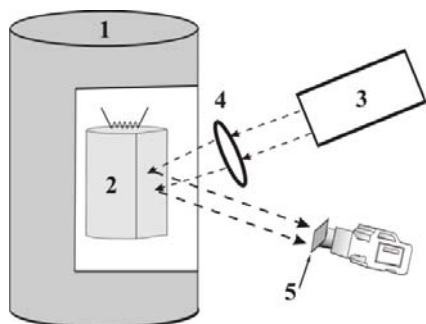


Рис. 1 – Схема видеосъемки СВС в отраженных лучах лазера.

1 – реакционная камера; 2 – образец; 3 – лазер; 4 – линза; 5 – набор светофильтров.

Это позволяло получать четкое видеоизображение топологии системы в течение всех циклов превращений за счет высокой яркости светового потока, отраженного от поверхности образца, который в выделенном интервале длин волн превосходит интенсивность теплового излучения реакционной волны. Область подсветки на образце 5÷15 мм регулировалась путем фокусировки лазерного излучения линзой. Скорость нагрева подсвеченной лазером поверхности образца не превышала 1.5 К/с, что исключало тепловое воздействие излучения на протекание реакции.

Фазовые и структурные состояния системы идентифицировались по различию излучательной и отражательной способности конденсированных компонентов, а

также по их изменениям в процессе реакции. Например, металлические капли имеют характерный блеск в отраженных лучах и меньшую яркость теплового свечения относительно оксидного расплава, формирование пор приводит к уменьшению степени отражения лазерного излучения. Процесс плавления сопровождается переходом частиц в сферическую форму с повышенной отражающей способностью поверхности.

Методики пирометрического измерения температуры в волне СВС.

Горение цилиндрических образцов организовывалось аналогично условиям, соответствующих рис. 1, за исключением внешней подсветки. Видеосъемка проводилась через нейтральные светофильтры или без них. Также определялся состав излучения участка поверхности образца (0.6 x 0.6 мм) с помощью спектрометра «Спектра». Для вывода излучения использовалось кварцевое светопроводное волокно.

Условие подобия состава излучения волны горения непрерывному спектру теплового излучения эталонной вольфрамовой лампы дает возможность определения реальной температуры реакционной системы при прохождении СВС путем цветовой пирометрии. При горении высокоплотных образцов это условие, как правило, выполняется (рис. 2).

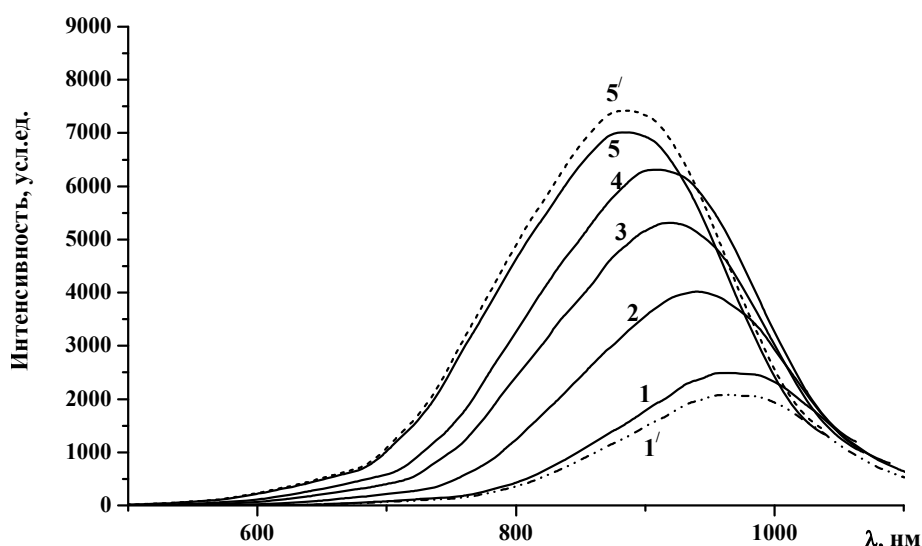


Рис. 2 – Спектры излучения поверхности образца (кривые 1-5) при горении смеси Ti + 35 мас. % Mo в азоте и вольфрамовой лампы (кривые 1', 5') при температурах 1070 К, 2200 К, соответственно. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 – соответствуют моментам времени 0 мс, 15 мс, 30 мс, 45 мс, 60 мс.

Измерение динамических температурных полей СВС проводилось путем обработки данных полученного видеоизображения и основано на сопоставлении отношений монохроматических интенсивностей излучения локальных участков волны СВС и центральной части ленты эталонной вольфрамовой лампы СИ - 10 - 300У, градуированной по температуре ($1023 \div 3200 \text{ K} \pm 15 \text{ K}$).

Количественные значения монохроматических интенсивностей (в интервале 0 ÷ 255 условных единиц) на различных длинах волн излучения - 620 нм (красный цвет), 540 нм (зеленый цвет) и 470 нм (синий цвет) - определялись в каждом пикселе изображения на компьютере.

Корректность определения динамических температурных полей разработанным методом ограничена следующими факторами:

– Сочетание оптического увеличения используемого объектива с размером пикселя на светочувствительной матрице видеокамеры позволяет получить на кадре изображение участка поверхности образца 4х3 мм (720х576 пикселей) с пространственным разрешением 5.5 мкм на строку. Минимальный размер участка волны горения, на котором возможно измерить распределение тепловых полей составляет ≈ 55 мкм (участок 10х10 пикселей).

– погрешности построения температурного поля волны горения могут быть обусловлены наличием пористости образца. Данные измерений температурных неоднородностей искажаются вследствие взаимной подсветки внутренних поверхностей поры. В этом случае корректное определение температурного поля на микроскопическом масштабе возможно только в пределах внешней поверхности отдельных структурных элементов образца (исходных частиц, капельных продуктов реакции и т. д.). Если масштаб визирования существенно превышает размер структурных элементов, то влияние указанные погрешностей сводится к минимуму.

– диапазон определяемой температуры в проведенных экспериментах ограничен ≈ 500 °С., что связано с ограниченностью практической яркостной широты ПЗС-матрицы применяемой видеокамеры (30÷250 условных единиц яркости).

– частота определения температурных характеристик волны СВС ограничена скоростью видеосъемки. Для применяемой видеокамеры эта величина составляет 50 измерений в секунду. Экспозиция одного кадра составляет 0.25 мс.

Систематическая ошибка измерения температуры определяется соотношением: $\Delta T = \Delta T_{\lambda} + \alpha_1 \cdot \Delta I + \alpha_2 (\Delta S_{\lambda} + \Delta S_{\gamma}) \sim 60$ К, где $\Delta T_{\lambda} = 15$ К – погрешность температурной тарировки лампы, $\Delta I = 0.25$ А – погрешность установки силы тока накала лампы, $\Delta S_{\lambda} = 0.009$, $\Delta S_{\gamma} = 0.009$ – погрешности определения отношений монохроматических интенсивностей на красной и зеленой длинах волн излучения лампы и образца, $\alpha_1 = 73$ °К/А – чувствительность изменения величины температуры лампы к изменению силы тока (I), $\alpha_2 = 1400$ °К – чувствительность изменения величины

цветовой температуры к изменению отношений монохроматических интенсивностей излучения.

Тестирование методики.

Измеренные значения температур плавления проволок чистых металлов (Ni, Ti) нагреваемых электрическим током, составляют: $T_{пл}(Ni) = 1750$ К и $T_{пл}(Ti) = 1990$ К и отличаются от

справочных данных ($T_{пл}(Ni) = 1725$ К, $T_{пл}(Ti) = 1940$ К) не более, чем на 25 К и 50 К.

Проводились эксперименты по сравнению значений температуры волны горения, измеренной термопарной и

Рис. 3 – Схема измерения температуры внутри образца.

- 1 – реакционная камера,
- 2 – образец, 3 – термопара,
- 4 – отверстие в образце,
- 5 – видеокамера, 6 – АЦП.

пирометрической методиками. Для этого в образцах со стороны плоской боковой поверхности сверлили глухое

цилиндрическое отверстие для вывода излучения, и устанавливалась термопара ВР5 – ВР20 ($d=40$ мкм) в соответствии с рис. 3. Как показали измерения, различия температуры в центре образца, измеренной различными методами в системах Ti–Mo–N₂ и Ni–Al, не превышает 20 К и 30 К.

Методика исследования динамических эмиссионных спектров волны СВЧ в расширенном оптическом диапазоне.

Смесь насыпной плотности в количестве $1\div1.5$ г помещалась в цилиндрическую кварцевую кювету диаметром 20 мм, размещенную на поверхности молибденовой фольги. Инициирование реакции СВЧ производилось в реакционной камере (рис. 4) путем медленного нагрева фольги электрическим током в течение $1\div3$ минут. При достижении критической температуры $900\div1200^\circ\text{K}$ смесь самовоспламенялась и реакция протекала в режиме, близком к тепловому взрыву с образованием облака взвеси. Начало процесса контролировалось термопарой, размещенной в смеси.

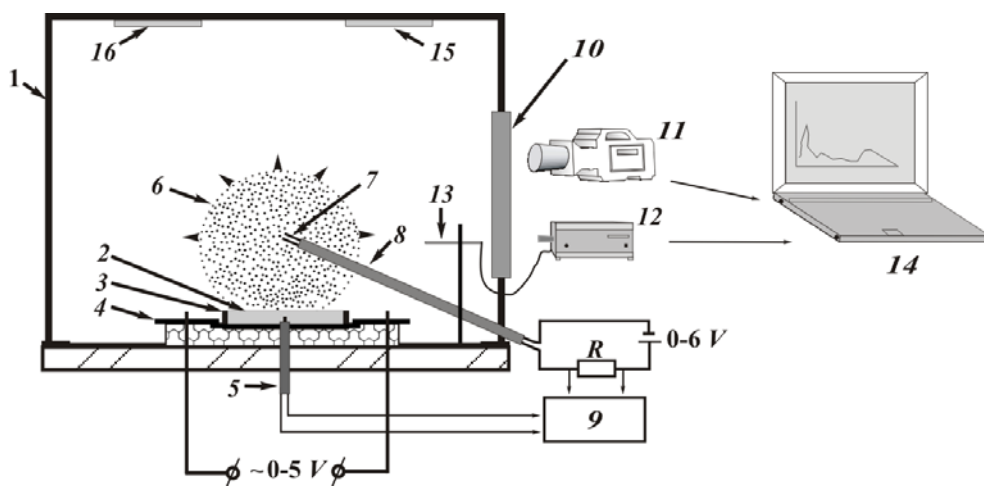


Рис. 4 – Схема измерения динамических эмиссионных спектров.

1–реакционная камера; 2–исходная смесь; 3–кварцевая кювета; 4–молибденовая фольга; 5– термопара; 6–облако взвеси; 7–металлические электроды; 8–керамический изолятор; 9–осциллограф; 10–оптическое кварцевое стекло; 11–скоростная видеокамера; 12–спектрометр; 13–кварцевое светопроводное волокно ($d=0.6$ мм); 14–компьютер; 15–фотоизмерительная сборка; 16–рентгеновский дозиметр.

Излучение реакционных систем в оптическом диапазоне ($\lambda = 200\div1100$ нм) регистрировалось спектрометрами через оптическое кварцевое стекло реакционной камеры, а также через кварцевое светопроводное волокно.

Регистрация ионизирующего излучения за пределами оптического диапазона производилась по засветке рентгеновской фотопленки РФ-3, а также с помощью рентгеновского дозиметра Arrow-Tech, Inc (Model 138). Для предотвращения от воздействия оптического излучения фотопленка помещалась в светонепроницаемый конверт из плотной черной бумаги толщиной 80 мкм. На поверхности фотопленки в ряде экспериментов устанавливалась пластиковая лента толщиной 120 мкм, которая экранировала часть ее поверхности. Фотоизмерительная сборка (алюминиевая фольга (10 мкм), фотопленка, поглощающая пластина, конверт) и дозиметр

устанавливались в верхней части вакуумной камеры на расстоянии 20-25 см над поверхностью порошковой смеси.

Процесс реагирования смесей наблюдали с использованием скоростной видеосъемки. С помощью электродов, размещенных в центре камеры, на которые подавалось постоянное напряжение от внешнего источника, осуществлялся динамический контроль электропроводности продуктов реакции.

Эффект диспергирования продуктов СВС в ходе теплового взрыва обеспечивает интенсификацию выходящего излучения, что связано с повышением свободной излучающей поверхности конденсированных фаз и прозрачности реакционной среды.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры волны нестационарного горения в гибридных и безгазовых системах на примере горения порошковых смесей: Ti + 35 мас.% Mo в азоте, Ti + 9.3 мас.% B + 70 мас.% Cu и 54.58 мас.% FeTiO₃+19.62 мас.% Al+23.1 мас.% Si+2.7 % мас. C в аргоне с использованием динамической пирометрии и видеозаписи процесса в отраженных лучах лазерного излучения.

Согласно полученным результатам, горение смеси Ti + 35 мас.% Mo в азоте реализуется в поверхностном режиме. Указанный режим характеризуется распространением реакционной волны сначала в узком приповерхностном слое образца (рис. 5, кадры 0–0.48 с) с последующим проникновением горения от поверхности к его центру, что видно по повышению интенсивности свечения отверстия (рис. 5, кадры 1 – 13 с) после прохождения поверхностной волны. Особенностью наблюдаемого горения является наличие локальных реакционных очагов и сложная трехмерная структура температурного поля реакционной волны.

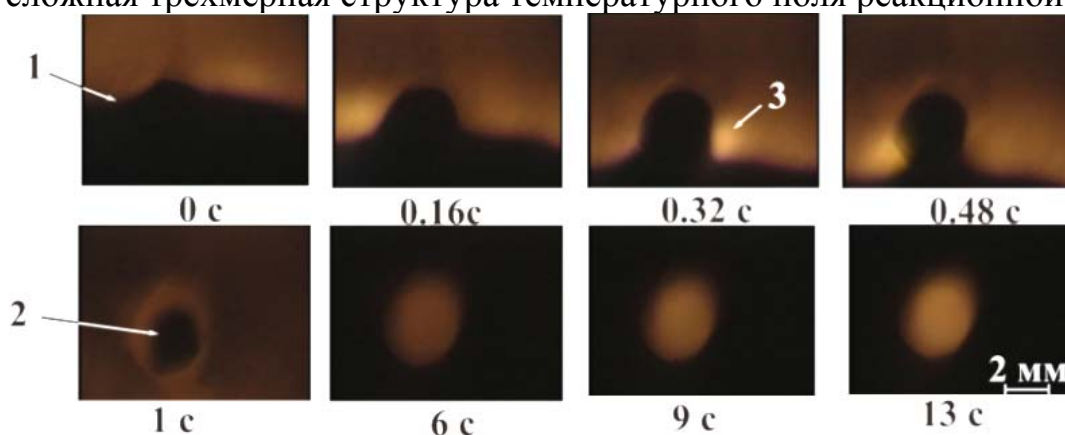


Рис.5 – Кинограмма процесса горения порошковой смеси Ti + 35 мас.% Mo в азоте. 1–фронт поверхностной волны горения, 2– отверстие в образце, 3– реакционный очаг. $d(\text{Ti}) < 63 \text{ мкм}$, $d(\text{Mo}) < 10 \text{ мкм}$, $\rho_{\text{от}} = 0.35$, давление азота 1.5 МПа.

Термограммы участков поверхностной волны горения с очагами и без очагов, а также в центральной части образца представлены на рис. 6, а. Измерения показали, что максимальная температура поверхностной волны вне очага (T_1) на 200 К ниже температуры, которая достигается в центре образца (T_2). Это объясняется эффектом аккумуляции тепла при фильтрации азота в центральную часть образца. Это согласуется с наблюдаемым оплавлением центральной части образца (рис. 6, б), где температура на 110 К выше точки плавления титана.

Температура поверхностной волны горения внутри очагов (T_3) превышает температуры T_1 и T_2 , что объясняется известными эффектами аккумуляции тепла в локальных очагах горения в условиях тепло-химической неустойчивости реакции азотирования [Ивлева Т.П., Мержанов А.Г., Шкадинский К.Г. Математическая модель спинового горения // Докл. АН СССР, 1978, Т. 239, № 5].

Разница времен (Δt) достижения максимальной температуры на поверхности и внутри образца позволяет оценить линейную скорость распространения реакционной волны от поверхности к центру образца: $R/\Delta t \approx 0.9$ мм/с. Последнее значение существенно меньше скорости горения по поверхности – 6.2 мм/с.

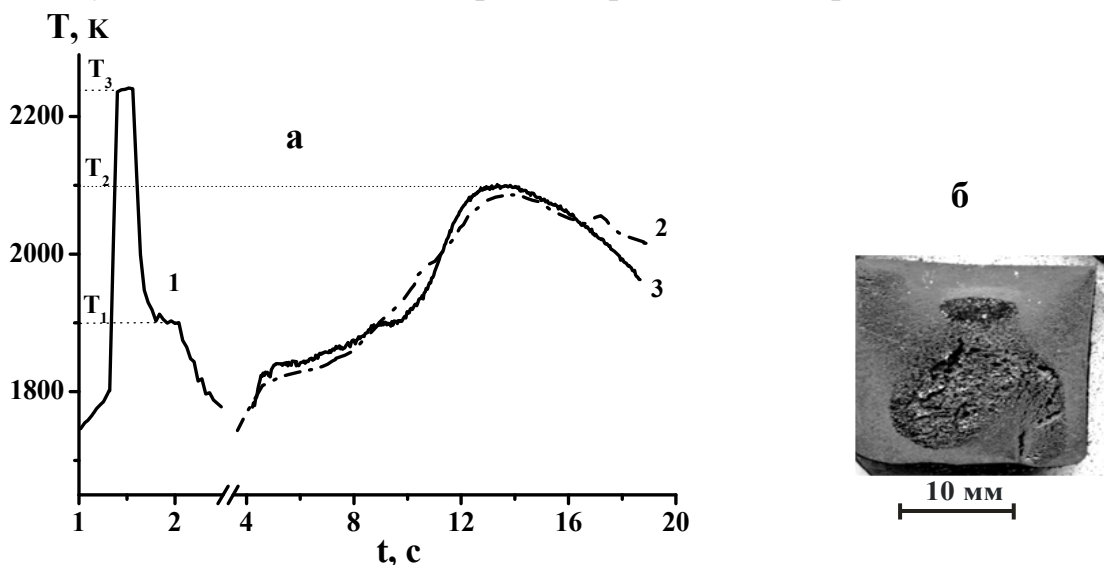


Рис. 6 – Характеристики горения и структурообразования в системе $Ti + 35$ мас. % $Mo+N_2$. а– изменение температуры участка поверхности образца (1) и в центре образца (2,3) в процессе горения, 1,3–измерение температуры пирометрией, 2–измерение термопарой, б–структура поперечного разреза продукта горения.

$d(Ti) < 63$ мкм, $d(Mo) < 10$ мкм, $\rho_{от} = 0.35$, давление азота 1.5 МПа.

Особенностью волны безгазового горения металлотермической системы $FeTiO_3-Al-Si-C$ является наличие локальных реакционных очагов ($3.0 \div 5.0$ мм), движущихся в плоскости фронта (рис. 7).

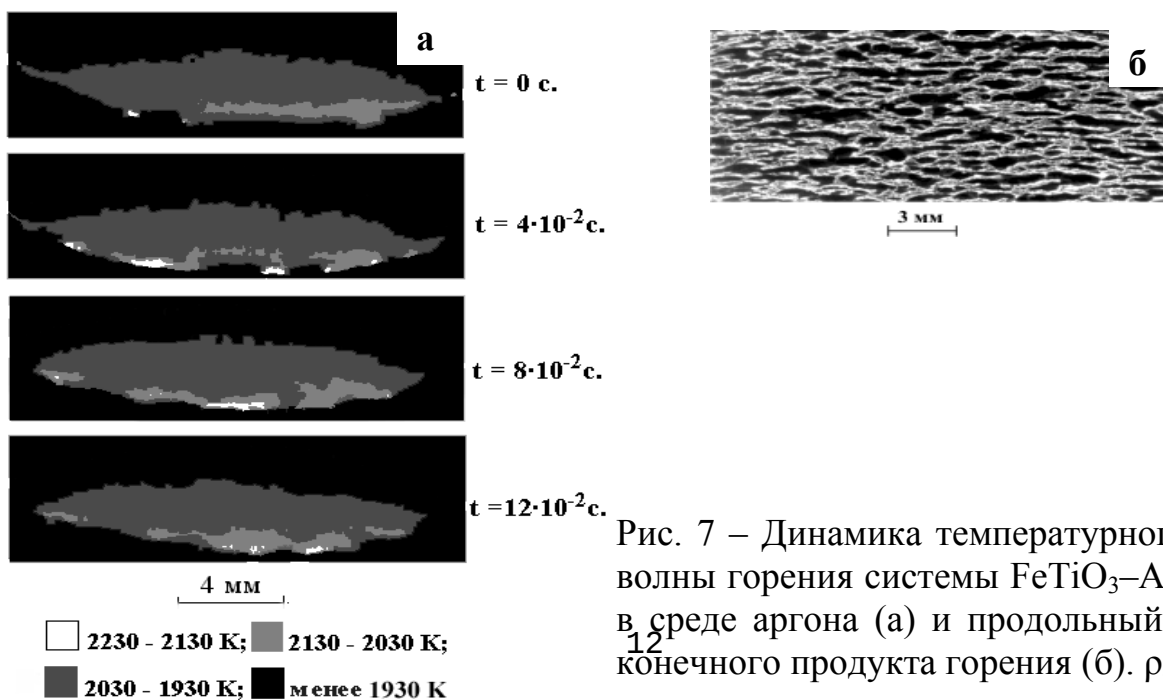


Рис. 7 – Динамика температурного поля волны горения системы $FeTiO_3-Al-Si-C$ в среде аргона (а) и продольный разрез конечного продукта горения (б). $\rho_{от} = 0.5$.

Согласно проведенным измерениям тепловой структуры волны горения методом динамической пирометрии, температура внутри очагов достигает величины 2230 К. Измеренное значение температуры близко к температуре плавления наиболее тугоплавкого продукта реакции – Al_2O_3 (2320К) – и на 100÷200 К (рис.7 а) превышает температуру окружающих участков реакционной волны. Полученные результаты позволяют объяснить формирование анизотропной структуры пористого продукта реакции (рис.7 б). Образование вытянутых пор вызвано локальным плавлением образца в микрообластях распространения очагов.

Как показали исследования, горение порошковой смеси $\text{Ti}+9.3 \text{ мас.}\% \text{B}+70 \text{ мас.}\% \text{Cu}$ протекает в нестационарном режиме с формированием упорядоченного спинового очага (рис.8 а). Реакционный очаг с постоянной скоростью движется по винтовой линии на поверхности образца, инициируя распространение затухающей волны вдоль его оси. После завершения каждого оборота вокруг оси образца спинового очага продолжает движение в зоне затухающей волны с температурой (1320 К), близкой к точке кристаллизации меди (1357 К). Распределение температуры внутри очага T_s и в затухающей волне T_f представлено на рис. 8 б. Как показали измерения, температура очага (2200 К) может превышать максимальную температуру других участков реакционного фронта на 600 К.

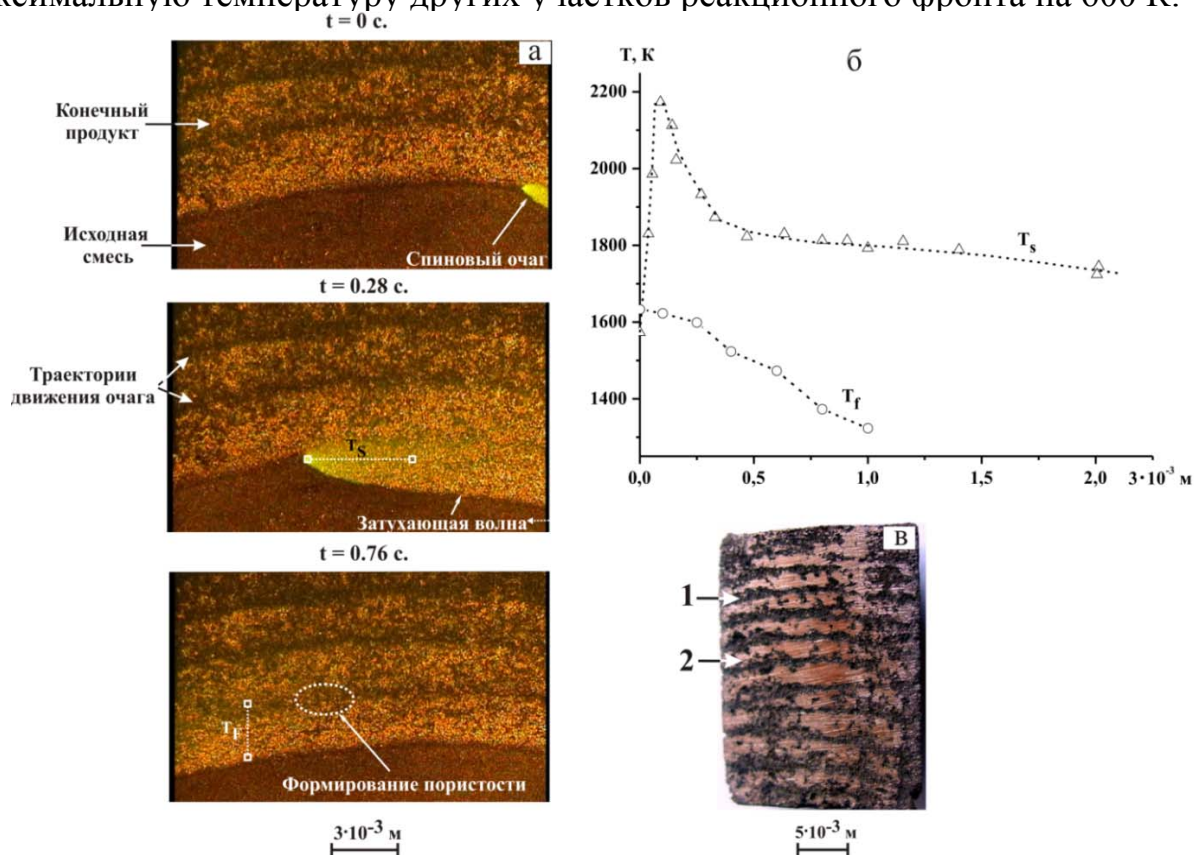


Рис. 8. – Характеристики горения и структурообразования в системе $\text{Ti}+9.3 \text{ мас.}\% \text{B}+70 \text{ мас.}\% \text{Cu}$. а–кинограмма процесса горения в среде аргона в условиях лазерной подсветки; б–распределение температуры внутри очага T_s и в затухающей волне T_f по данным пирометрии; в–структура продольного разреза

продукта реакции: 1 - слой повышенной пористости и пониженной концентрации Cu; 2 - слой пониженной пористости и повышенной концентрации Cu. $d(\text{Ti})=d(\text{Cu})=25\text{ мкм}$, $d(\text{B})\sim 1\text{ мкм}$ $\rho_{\text{от}}=0.45$.

Исследования в отраженных лучах лазерного излучения показывают, что на траектории движения очага происходит повышение пористости образца, что регистрируется по формированию темных полос (рис. 8а). Это подтверждается данными исследования продольного разреза продукта реакции (рис. 8 в). Наблюдаемый эффект объясняется капиллярным перераспределением расплава меди в слое затухающей волны под действием градиента температуры, который, согласно измерениям, составляет $\sim 150\text{ К/мм}$. Время формирования пористого слоя составляет $\sim 0.3\div 0.5\text{ с}$ и близко к оценке времени капиллярного перераспределения расплава по формуле Пуазейля: $t \sim (8\cdot l\cdot \mu)/(ds\cdot \Delta\delta) \approx 0.2\text{ с}$, где $l \approx 10^{-3}\text{ м}$ – толщина зоны фильтрации, $\mu \sim 3\cdot 10^{-3}\text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$ – вязкость расплава меди, $\Delta\delta \sim 0.1\text{ Н/м}$ – изменение поверхностного натяжения расплава в зоне фильтрации за счет разницы температур $\sim 300\text{ К}$, $d_s \sim 10^{-6}\text{ м}$ – минимальный диаметр твердых частиц (бора) в зоне фильтрации.

Полученные результаты позволяют предположить, что спиновый режим горения и формирование анизотропной структуры являются взаимосогласованными процессами, природа которых связана с термокапиллярной фильтрацией расплава меди на масштабе волны горения.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований оптических эмиссионных эффектов процесса теплового взрыва в расширенном оптическом $200\text{--}1100\text{ нм}$ и рентгеновском диапазонах на примере порошковых систем: Ti–B, Ni–Al, $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--Al}$ и Zr–B.

Упрощенная схема химической конвертации смесей в ходе СВС представляется в следующем виде: $\text{Ti} + 2\text{B} \rightarrow \text{TiB}_2 + 293\text{ кДж/моль}$, $\text{Ni} + \text{Al} \rightarrow \text{NiAl} + 140\text{ кДж/моль}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 853\text{ кДж/моль}$ и $\text{Zr} + 2\text{B} \rightarrow \text{ZrB}_2 + 199\text{ кДж/моль}$, где $T_{\text{ад}}$ (без учета предварительного подогрева) составляет 3190 К , 1910 К , 3200 К , 3310 К , соответственно.

Как показали исследования, за счет потока газовыделений (газификация летучих примесей, испарение компонентов) в ходе процесса СВС происходит формирование излучающего облака взвеси (рис. 9,а) диаметром до 20 см . Облако состоит из капель конденсированного продукта (рис.9,б) размером $10\text{--}200\text{ мкм}$ и ионизированного газа.

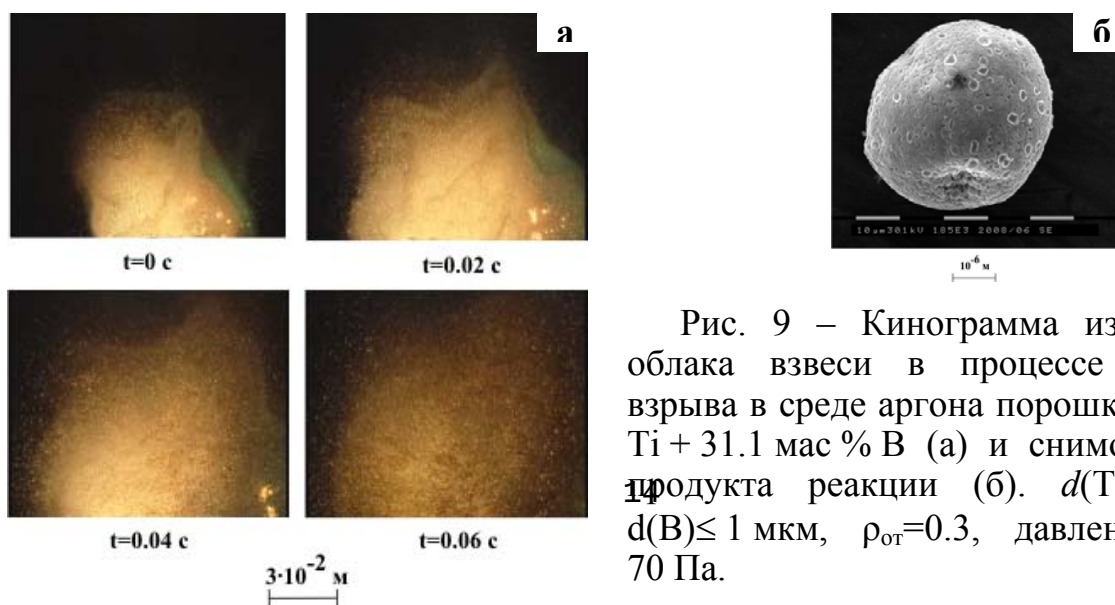


Рис. 9 – Кинограмма излучающего облака взвеси в процессе теплового взрыва в среде аргона порошковой смеси Ti + 31.1 мас % В (а) и снимок частицы продукта реакции (б). $d(\text{Ti}) < 60\text{ мкм}$, $d(\text{B}) \leq 1\text{ мкм}$, $\rho_{\text{от}}=0.3$, давление аргона 70 Па .

Образование капель происходит путем капиллярной коалесценции расплавленных частиц исходных компонентов с последующим развитием химической реакции внутри капель на стадии образования облака. Характерные времена протекания процесса: длительность разогрева капель до максимальной температуры $t_c \approx 1 \div 10$ мс (данные скоростной микровидеосъемки), длительность ионизированного состояния облака $t_i \sim 40\text{--}60$ мс (наличие сигнала тока между электродами), максимальное время оптического излучения $t_o \sim 100\text{--}150$ мс. Величины t_c , t_i – отражают длительность химических превращений, а разница между ними определяется несинхронностью прохождения реакции в различных каплях облака взвеси. Значение t_o характеризует интегральную длительность процесса, включая реакцию и охлаждение продуктов.

Состав излучения облака взвеси исследуемых порошковых систем в оптическом диапазоне 300–1100 нм представляется быстроменяющейся суперпозицией сплошного и селективного спектров (рис. 10).

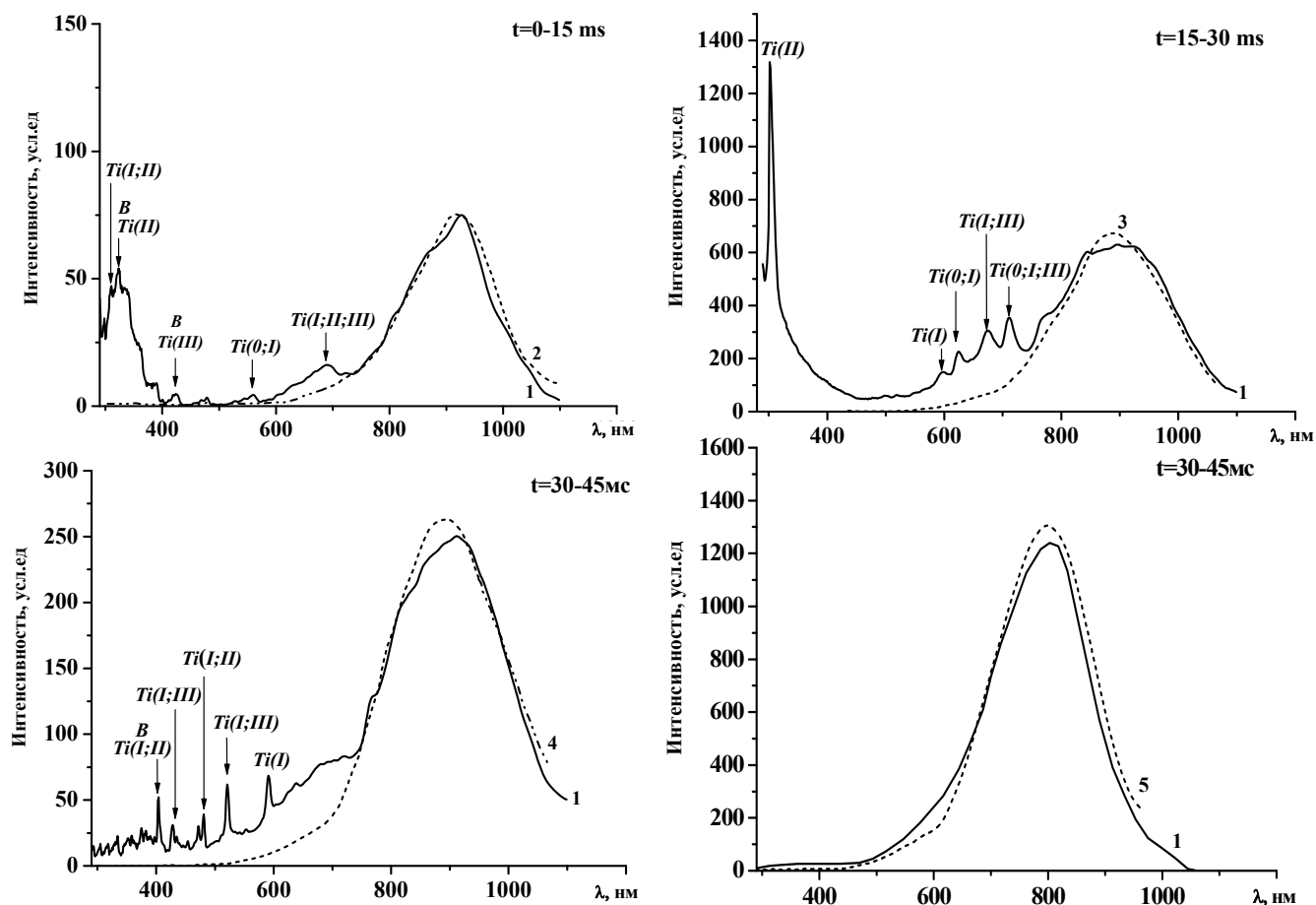


Рис. 10 – Динамика спектра излучения смеси $\text{Ti} + 31.1 \text{ мас \% В}$ в процессе теплового взрыва в среде аргона при давлении 70 Па (кривая 1). Кривые 2,3,4,5–спектры излучения лампы СИ-10-300у при температурах 1270 К, 1810 К, 2150 К, 2670 К, соответственно.

В, Ti (I), Ti (II), Ti (III) и др. – символы спектральных линий атомарных компонентов реакции в нейтральном и ионизированном состояниях.

Сплошной спектр в инфракрасной части является типичным для серых тел, что путем сравнения со спектром эталонной вольфрамовой лампы позволяет оценить осредненную температуру конденсированных продуктов облака взвеси на различных этапах развития реакционного процесса. Селективный спектр отражает наличие флуоресценции частично ионизированных паров компонентов системы (Ti, V, Zr, Fe, Al, Ni). Было обнаружено, что при протекании реакции в течение интервала времени t_i формируется интенсивный ультрафиолетовый спектр, имеющий нетепловую природу. Наблюдаемые спектры существенно неравновесны. Их особенностью является наличие высокоэнергетической ультрафиолетовой составляющей (энергия квантов $h\nu \geq 4$ эВ). Далее системы излучают лишь тепловой спектр (рис. 10).

Согласно проведенным оценкам, мощность излучения (интеграл интенсивности в заданном диапазоне длин волн) в ультрафиолетовом интервале 300–400 нм составляет 35÷75% относительно мощности излучения в длинноволновой части 400–1100 нм. Интенсивности излучения облака взвеси в УФ-диапазоне близки к интенсивности излучения стандартных эксиламп Xe Br –CD (280÷284 нм) и XeCl-BD-S (интервал 307÷309 нм) (рис. 11) и, согласно данным сравнительных измерений, значительно превышают уровень аналогичного коротковолнового излучения газовых пламён (водородного, углеводородного).

В наблюдаемых селективных спектрах присутствуют линии излучения ионизированных компонентов реакции первой и второй кратности ионизации, что свидетельствует о высокой энергии химического возбуждения элементов системы, превышающей сумму потенциалов ионизации (более 25 эВ) и излучающего перехода (более 6 эВ). Для идентификации спектральных линий были использованы следующие базы данных: Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. 4-изд.; М.: Наука, 1977 и Ralchenko, Yu., Kramida, A.E., Reader, J., and NIST ASD Team (2008). NIST Atomic Spectra Database.

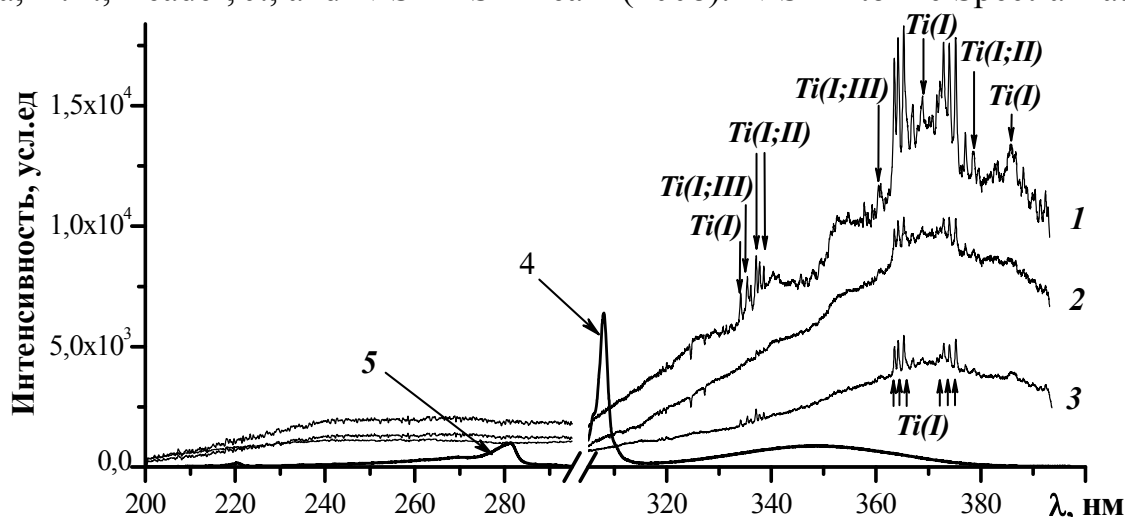


Рис. 11.– Спектры излучения смеси Ti + 31.1 мас % V (1,2,3) в процессе теплового взрыва в среде различных газов (1 – He; 2 – Ar; 3 – N) при давлении 25-кПа и эксиламп XeCl-BD-S (4), XeBr-CD (5). Спектры 1-3 соответствуют моменту максимальной интенсивности излучения в ходе теплового взрыва.

Интенсивности коротковолновых спектров существенно зависят от состава и давления газовой среды, в которой протекает процесс СВС (рис. 11, 12). Наиболее интенсивным является излучение в среде He при давлении 25кПа. Временные интервалы излучения сплошного спектра (40-60 мс) и селективных линий (25-30 мс) заметно различаются, что указывает на различные механизмы их возбуждения.

Можно предположить, что генерация сплошного УФ-спектра в процессе СВС связана с рекомбинационными явлениями газовой плазмы, а селективных линий – с прямым возбуждением атомов (ионов) паров компонентов системы (Ti, B, Zr, Fe, Al, Ni) химистимулированным потоком “горячих” электронов со свободной поверхности конденсированных фаз (в нашем случае – поверхности капель в облаке взвеси). Согласно работе [Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., и др. // ФГВ. 2004 г.] горение систем Ni-Al, Ti-C, Mo-B сопровождается генерацией газовой плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц (до 10^{22} м^{-3}), потока «горячих» электронов с энергетическим спектром до 150 эВ.

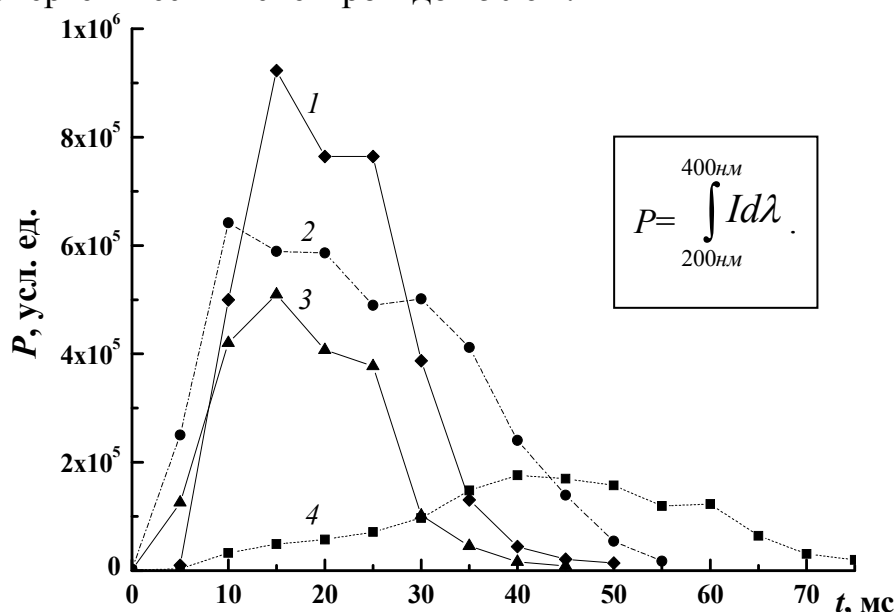


Рис. 12. – Динамика мощности излучения в диапазоне 200–400 нм при горении смеси Ti + 31.1 мас % В в среде He. Излучение регистрировалось через окно реакционной камеры. 1. – 25·кПа; 2. – 50 кПа; 3. – 70 Па; 4 – 100 кПа.

Влияние состава и давления газовой среды на характеристики излучения в процессе СВС, по-видимому, аналогично роли буферных газов при возбуждении газовых сред электронным пучком, например, в плазме лазеров [Месяц Г.А. Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. – М.: Наука, 1991.]. Это реализуется за счет аккумуляции энергии электронов молекулами газовой среды с последующей их передачей ионизированным парам металлов в облаке взвеси, уменьшения тушения возбужденных состояний электронами и других кинетических эффектов в плазме.

Рентгеновское излучение.

Как показали исследования, ионизирующее излучение СВС не ограничивается только ультрафиолетовой областью спектра. Характер засветки фотопленки свидетельствует о наличии «мягкого» рентгеновского излучения. Как видно на

рис. 13, излучение проникает через преграду (алюминиевая фольга 10 мкм + конверт толщиной 80 мкм), но задерживается пластиковой пластиной (120 мкм), размещенной в конверте на поверхности рентгеновской пленки.

Фотометрические измерения по плотности почернения рентгеновской пленки показали, что рентгеновское излучение при прохождении через пластиковую пластину ослабляется в $1.5 \div 2$ раза. Исходя из известного соотношения: $J = J_0 e^{-\alpha t}$ (где J_0 , J – интенсивности излучения до и после прохождения через слой вещества, t – толщина слоя, α – линейный коэффициент поглощения) и зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов [Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. // At. Data Nucl. Data Tables. 1993.] следует, что величина энергии рентгеновских квантов, вызывающих засветку пленки составляет $4.5 \div 5.5$ кэВ.

Регистрируемая на дозиметре суммарная экспозиционная доза излучения достигала 10 мР в серии из 24 взрывов. Дозы излучения в отдельных взрывах значительно различаются друг от друга с достижением уровня 2.5 мР. Отметим, что регистрируемая экспозиционная доза не изменялась при обертывании дозиметра пленкой из алюминия толщиной 10 мкм.

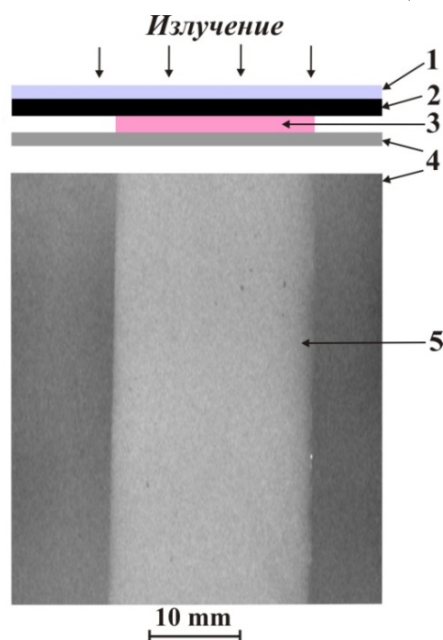


Рис. 13–Засветка фотопленки РФ-3 в результате воздействия рентгеновского излучения теплового взрыва системы $Ti + 31.1 \text{ мас \% В}$ в среде аргона при давлении 70 Па.

1–алюминиевая фольга, 2–черная бумага,
3–пластиковая пластина,
4–рентгеновская пленка,
5 – область тени, создаваемой поглощающей пластиковой пластиной.

Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что измеренные значения экспозиционной дозы рентгеновского излучения на дозиметре следует рассматривать как приближенную нижнюю оценку его реальной мощности. Это связано с тем, что максимальная чувствительность данного прибора реализуется при энергии квантов более 16 кэВ, а в области «мягкого» рентгена чувствительность дозиметра существенно ниже.

Возникновение рентгеновского излучения можно объяснить эффектом торможения высокоэнергетических свободных электронов, эмитируемых со свободной поверхности капель облака взвеси, либо эффектом эксофотонной эмиссии на поверхности капель в процессе реакции [Волькенштейн Ф. Ф. Радиоло-рекомбинационная люминесценция. М., 1976].

Основные результаты и выводы.

1. Разработаны оригинальные пирометрические методики для изучения тепловой структуры волны СВС, основанные на обработке данных видеозаписи процесса

методом цветовой пирометрии и путем сопоставления характеристик сплошных спектров излучения конденсированных продуктов реакции и эталонной светоизмерительной лампы.

2. Разработана оригинальная методика исследования структурной динамики волны горения гетерогенных систем, основанная на съемке процесса в отраженных лучах лазерного излучения через набор светофильтров, настроенных на длину волны лазера.

3. Впервые создана и апробирована экспериментальная установка для проведения комплексного оптического контроля температурных полей, характеристик структурных превращений гетерогенных систем в волне горения с разрешением в пространстве до 10 мкм, во времени до 5 мс и в температурном интервале 1000÷3200 К, а также динамического измерения спектрального состава электромагнитного излучения СВЧ в диапазоне 200÷1100 нм.

4. Обнаружено, что характерной особенностью поверхностной волны горения порошковой смеси $Ti + 35 \text{ мас. \% } Mo$ в азоте является наличие локальных очагов. Максимальная температура поверхностной волны вне очага (T_1) на 200 К ниже температуры, которая достигается в центре образца (T_2). Температура поверхностной волны горения внутри очагов превышает температуры T_1 и T_2 , что объясняется известными эффектами нестационарного горения, обусловленными теплехимической неустойчивостью реакции азотирования.

5. Обнаружено, что характерной особенностью волны безгазового горения металлотермической системы $FeTiO_3-Al-Si-C$ является наличие локальных реакционных очагов (3.0 ÷ 5.0 мм), движущихся в плоскости фронта. Согласно проведенным измерениям методом динамической пирометрии, температура внутри очагов достигает величины 2230 К, которая близка к точке плавления наиболее тугоплавкого продукта реакции – Al_2O_3 (2320К) – и на 100÷200 К превышает температуру окружающих участков реакционной волны. Результаты измерений позволили объяснить формирование анизотропной структуры пористого продукта реакции за счет локального плавления системы в областях распространения очагов.

6. Исследование горения порошковой смеси $Ti+9.3 \text{ мас. \% } V+70 \text{ мас. \% } Cu$ телеметрическими методами позволило уточнить механизм формирования анизотропной структуры продукта СВЧ, связанной с термокапиллярной фильтрацией расплава меди на масштабе волны горения.

7. Впервые обнаружен эффект генерации интенсивного УФ–излучения при тепловом взрыве порошковых смесей $Ti-B$, $Ni-Al$, Fe_2O_3-Al . Эмиссия ультрафиолета реализуется на начальных этапах реакции в интервале 40 – 60 мс. Суммарная мощность УФ–излучения сопоставима с излучением в длинноволновой части, по интенсивности близка к эксилампам $Xe\ Br-CD$ (280÷284 нм, 0.7 кВт), $XeCl-BD-S$ (интервал 307÷309 нм, 1.1 кВт) и значительно превышает уровень аналогичного коротковолнового излучения газовых пламен (водородного, углеводородного).

8. В наблюдаемых селективных спектрах присутствуют линии излучения ионизированных компонентов реакции (Ti, Ni, Al, Zr) первой и второй кратности ионизации. Это свидетельствует о высокой энергии химического возбуждения

атомов, превышающей сумму потенциала ионизации (более 25 эВ) и энергию излучательных переходов (более 6 эВ).

9. На примере порошковой системы Ti – В показано, что протекание СВС в режиме теплового взрыва сопровождается «мягким» рентгеновским излучением с оценочной энергией квантов 4.5÷5.5 кэВ.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Саламатов В.Г., Цыба Г.А., Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М. Телевизионная система определения динамических температурных полей в процессах СВС //Измерительная техника. 2002, № 9, с. 41–45.
2. Цыба Г.А., Саламатов В.Г., Поляков В.Л. Видеопирометр. // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – №4. – С. 54 – 57.
3. Саламатов В. Г. Цыба Г. А. Поляков В. Л. Измерительный комплекс для калибровки светоизмерительной лампы. // Приборы и техника эксперимента. – 2005 г – № 1. – С. 25 -28.
4. Кирдяшкин А. И., Китлер В. Д., Юсупов Р. А. Саламатов В. Г., Максимов Ю. М., Капиллярные гидродинамические явления в процессе безгазового горения // Физика горения и взрыва. – 2007. – т. 43. – № 6. – С. 31–39.
5. Кирдяшкин А. И., Китлер В. Д., Саламатов В. Г., Юсупов Р. А. Особенности структурной динамики высокотемпературных металлотермических процессов на примере системы FeO–Al–Al₂O₃ // Физика горения и взрыва. – 2008. – т. 44. – № 1. – С. 81–84.
6. Кирдяшкин А. И., Саламатов В. Г., Максимов Ю. М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф, Габбасов Р.М. Рентгеновское излучение в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Физика горения и взрыва. – 2008. – т. 44. – № 6. – С. 127–129.
7. Максимов Ю. М., Кирдяшкин А. И., Габбасов Р.М., Саламатов В. Г. Эмиссионные явления в волне горения СВС // Физика горения и взрыва. – 2009. – т. 45. – № 4. – С. 121–127.

В других работах:

1. Саламатов В. Г. Горение титано - молибденовых смесей в азоте // В сб.: Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Материалы и технологии / Под ред. Проф. Евстигнеева В. В.– Новосибирск: Наука, 2001., 284с. –С. 94-99.
2. B. Sh. Braverman, V. G. Salamatov, M. Kh. Ziatdinov, Yu. M. Maximov. The effect of sample size on the Transition to surface combustion. // VII International Symposium on Self – Propagation High – Temperature Synthesis: book of abstracts. – Cracow, Poland, 2003. – P.13.
3. Саламатов В. Г., Цыба Г. А., Видеопирометр // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы IV Всероссийской научной конференции. – г. Томск, 2004. – С. 156-157.
4. Саламатов В. Г. Цыба Г. А. Автоматизированная калибровка устройства измерений высокотемпературного поля поверхности твердых объектов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы IV Всероссийской научной конференции. – г. Томск, 2004. – С. 154-155.

5. Юсупов Р.А., Кирдяшкин А.И., Саламатов В.Г., Китлер В.Д., Максимов Ю.М. Особенности структурообразования пористых материалов в волне горения // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы IV Всероссийской научной конференции. – г. Томск, 2004. – С. 157-158.
6. Саламатов В. Г. Экспериментальные методы диагностики быстропротекающих высокотемпературных процессов // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов 1 всероссийской конференции молодых ученых.– г. Томск, 2005. С. 279-280.
7. Саламатов В. Г., Габбасов Р. М., Кирдяшкин А. И. Бесконтактное измерение динамической температуры взаимодействия железоалюминиевого термита // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы V Всероссийской научной конференции. – г. Томск, 2006. – С. 157-158.
8. Юсупов Р.А., Кирдяшкин А.И., Китлер, В.Д., Саламатов В.Г. Фазовые и структурные превращения металлотермических систем на примере горения порошковой смеси $\text{FeO-Al-Al}_2\text{O}_3$ //Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Материалы V Всероссийской научной конференции. – г. Томск, 2006. – С. 188-189.
9. Kirdyashkin A.I., Maksimov Yu.M., Salamatov V.G., Gabbasov R.M.. Unequilibrium emission phenomena of shs wave // IX International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis: Abstracts Book SHS 2007 – Dijon France, 2007.–P. T5_P17.
10. Maximov Yu. M., Kirdyashkin A.I. Salamatov V. G. Synthesis and use of shs porous materials // IX International Symposium on Self-propagating High-temperature Synthesis: Abstracts Book SHS 2007 – Dijon France, 2007.– P. T6_P17.
11. Кирдяшкин А.И., Юсупов Р.А., Китлер В.Д., Саламатов В. Г. Особенности структурных превращений металлотермических систем в процессе горения // Горение и плазмохимия: Материалы IV Международного симпозиума. – Алматы Казахстан, 2007. –С. 188 – 190.
12. Кирдяшкин А.И., Саламатов В. Г., Габбасов Р.М., Максимов Ю.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Особенности оптического излучения реакционных систем в процессе СВС // Горение и плазмохимия: Материалы IV Международного симпозиума. – Алматы Казахстан, 2007. – С. 56 – 58.
13. Kirdyashkin A.I., Salamatov V.G., Maksimov Yu.M., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Gabbasov R.M SHS as a new source of intense UV-radiation: spectroscopic study in a 200-400 nm wavelength range // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Abstracts Book. – Tomsk, 2008.–P. 88.
14. Kirdyashkin A.I, Maksimov Yu. M., Gabbasov R. M. and Salamatov V.G. Non-thermal emission phenomena in solid flame // The 6th International Seminar on Flame Structure: Book of Abstracts. – Brussels Belgium, 2008. – P. 41
15. Maksimov Yu.M, Kirdyashkin A.I., Salamatov V.G. Peculiarities of convective mass transfer of melts in gasless combustion // The 6th International Seminar on Flame Structure: Book of Abstracts. – Brussels Belgium, 2008. – P. 53.