

*На правах рукописи*

Демянюк Дмитрий Георгиевич

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БОРСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ  
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена на кафедре "Физико-энергетических установок" физико-технического факультета Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
В.И. Бойко

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
А.П. Ильин  
доктор физико-математических наук, профессор  
В.Ф. Трофимов

Ведущая организация: Алтайский государственный технический  
университет, г. Барнаул

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_ часов в 228 аудитории  
10 корпуса на заседании диссертационного совета ДС 212.025.01 при  
Томском политехническом университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30).

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

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2007 г.

Подписано в печать \_\_\_\_\_.  
Тираж \_\_\_\_ экз. заказ № \_\_\_\_\_. Бумага офсетная.  
Печать RISO. Отпечатано в типографии \_\_\_\_\_

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

А.А. Орлов

материалов для ядерных энергетических установок // Изв. ТПУ, т. 308, № 4, 2005. С.67-72.

21. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Шаманин И.В. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты: экспериментальное исследование защитных свойств // Изв. ТПУ, т. 308, № 5, 2005. С. 62–66.
22. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Шаманин И.В. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты: расчетное исследование защитных свойств // Изв. ТПУ, т.308, № 6, 2005 г. С. 80-83.
23. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Шаманин И.В. Использование порошков цветных металлов для модификации свойств функциональной керамики физико-энергетических установок // Цветные металлы, №4, 2006. С. 69-72.
24. Годовых А.В., Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С. Расчетный анализ распространения волны горения при синтезе борсодержащих систем // Сборник тезисов и докладов I молодежной конференции на Ленинградской АЭС, г. Сосновый Бор, 2005. С. 67-69.
25. Волжанкин В.В., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С. Использование СВС для получения функциональных материалов ядерно-энергетических установок // Сборник материалов конференции: "Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения", г. Северск, 2006. С. 56-57.
26. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г. Исаченко Д.С. Волжанкин В.В. Определение температурных полей, реализующихся при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе борсодержащих материалов // Сборник материалов конференции «Полярное сияние 2006: Ядерное будущее: безопасность, экономика и право», 30 января–4 февраля, 2006 г. – Санкт-Петербург. 2006. С. 23-24.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время большую актуальность приобрели вопросы повышения безопасности и надежности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) различного целевого назначения. Одним из путей решения данной проблемы является создание новых материалов, а также поиск более эффективных способов их получения.

Большое применение в ЯЭУ нашли функциональные материалы, полученные с использованием керамических технологий. Вместе с тем традиционные технологии создания указанных материалов обладают рядом существенных недостатков, среди которых следует отметить высокие временные и энергетические затраты, сложное аппаратное обеспечение и др.

В связи с этим возникает необходимость использования нетрадиционных для ядерной техники технологических подходов. Ярким примером перспективных керамических технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). СВС характеризуется тем, что в ходе протекания реакции имеет место высокотемпературная среда, допускающая различные типы дополнительных внешних воздействий, посредством которых представляется возможным регулирование структуры и свойств конечных продуктов, т.е. позволяет получать новые материалы с требуемым набором свойств.

Это дает возможность использовать СВС–технологии в ядерной технике, что подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями.

### ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

*Целью* является разработка теплофизических основ СВ-синтеза борсодержащих металлокерамических и керамических функциональных материалов защитных конструкций и систем управления ядерных энергетических установок.

#### *Задачи.*

1. Провести выбор элементного состава материалов, предназначенных для защиты от потоков высокоэнергетического излучения в условиях мощного теплового и радиационного воздействия, которые могут быть получены в режиме направленного высокотемпературного синтеза.
2. Расчетным путем определить параметры синтеза борсодержащих металлокерамических и керамических материалов на основе расчета адиабатической температуры с использованием квантовой модели Дебая с учетом особенностей зависимости теплоемкости от температуры.
3. Провести теплофизические эксперименты по направленному синтезу борсодержащих металлокерамических и керамических материалов, определить основные этапы технологического процесса получения функциональной керамики, в том числе многослойной.

4. Определить геометрические параметры, влияющие на тепловые режимы протекания синтеза.
5. Определить закономерности протекания СВС в исследуемых системах при введении реакционноспособных модифицирующих добавок.
6. Провести радиометрические и численные эксперименты, определить оптимальные сочетания элементного состава, реологических свойств и массогабаритных показателей, обеспечивающие максимальную эффективность защиты от потоков высокоэнергетических нейтронов и  $\gamma$ -излучения при использовании функциональной борсодержащей керамики.

#### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА.**

1. Разработанная методика определения адиабатической температуры позволила получить уникальную информацию по значениям  $T_{ад}$  в зависимости от условий подготовки и проведения СВС для синтеза функциональных материалов ЯЭУ.
2. Установлены связи между теплофизическими режимами получения материалов на основе боридов вольфрама и карбида бора, и свойствами конечного продукта на их основе.
3. Впервые разработаны теплофизические основы горения двухслойных систем на основе вольфрам-бор и углерод-бор содержащих материалов для систем управления и защиты ЯЭУ.
4. Определены и обоснованы геометрические параметры системы и их влияние на режимы протекания СВС.
5. Установлены закономерности протекания СВС в борсодержащих системах при введении реакционноспособных модифицирующих добавок различных типов (металл-металл, металл-неметалл).
6. Установлены закономерности прохождения нейтронного и  $\gamma$ -излучения через пористые экраны, состоящие из материалов на основе боридов вольфрама, карбида бора и их послойных комбинаций.

#### **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.**

Отработаны основные положения технологии получения материалов на основе карбида бора и боридов вольфрама методом самораспространяющегося синтеза, в том числе и при нагружении реакционноспособными модификаторами. Впервые синтезированы двухслойные образцы указанных материалов.

Проведено исследование защитных от потоков быстрых нейтронов и заряженных частиц свойств материалов на основе боридов вольфрама, карбида бора и их послойных комбинаций. Установленный факт влияния пористости материала на защитные от потоков заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов свойства позволяет утверждать, что при определенных сочетаниях концентрации пор и их характерных размеров эффективность защиты в этом случае возрастает.

Практическая значимость подтверждена внедрением результатов диссертационной работы при выполнении научно-технической программы

10. Бойко В.И., Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г. Использование технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в атомной промышленности // II Научно-техническая конференция «Научно – инновационное сотрудничество», Сборник трудов, часть 2, Москва. 2003. С. 75-77.
11. Sabdenov K.O., Demyanuk D.G. Mathematical model of formation carbon nanotube // III International Conference on Inorganic Materials, 7 -10 September 2002, Germany. 2002. P. 45-46.
12. Dolmatov O.Yu., Demyanuk D.G. Modification of structural – phase and mechanical properties of boron – containing lines of SHS – the materials intended for use in nuclear – power installations. // III International Conference on Inorganic Materials, 7 -10 September 2002, Germany. 2002. P. 14-15.
13. Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С., Рышкевич М.П. Основы расчетно-теоретического анализа самораспространяющегося высокотемпературного синтеза борсодержащих материалов физико-энергетических установок // X Юбилейная международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» 29 марта-2 апреля 2004. – Томск: Изд-во ТПУ. 2004. С.112-113.
14. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С. Расчетно-теоретический анализ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза борсодержащих материалов физико-энергетических установок // Материалы конференции «Молодежь ЯТЦ: наука и производство» СХК, 28-29 октября 2004. Северск. 2004. С. 56-57.
15. Долматов О.Ю., Сабденов К.О., Мацаков Р.И., Демянюк Д.Г. Модель самораспространяющегося высокотемпературного синтеза с твердофазной реакцией // Известия ВУЗов. Физика, Т. 47, № 11, 2004. С. 79–85.
16. Dolmatov O.Yu., Demyanuk D.G., Rychkevitch M.P. Application of Self-propagating High-temperature Synthesis to High-current Electronics// International Journal of Self-propagating High-temperature Synthesis. Vol. 13, № 2, 2004. Allerton Press, Inc./ New York. P. 183-192.
17. Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С. Расчетно-теоретический анализ самораспространяющегося высокотемпературного синтеза борсодержащих материалов физико-энергетических установок // Тезисы научно-практической конференции молодых работников СХК «Молодежь ЯТЦ: наука и производство», г. Северск, 2005. С. 45-47.
18. Годовых А.В., Демянюк Д.Г., Исаченко Д.С. Расчетный анализ распространения волны горения при синтезе борсодержащих систем // Сборник тезисов и докладов I молодежной конференции на Ленинградской АЭС, г. Сосновый Бор, 2005. С. 67-69.
19. Годовых А.В., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С. Расчетный анализ распространения волны горения // III международная научно-практическая конференция "Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности", – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. С. 44-45.
20. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Шаманин И.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез поглощающих

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Подосинин В.В., Демянюк Д.Г. Использование бор содержащих материалов, полученных в режиме СВС в технике радиационной защиты // Тезисы 6-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. С. 26-28
2. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г. Синтез борсодержащих материалов для систем управления и защиты ядерных энергетических установок методом технологического горения // III Международная научно-техническая конференция «Проблемы промышленных СВС-технологий – 2000». г. Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2000. С. 36-37.
3. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г. Направленный синтез и использование нетрадиционных металлокерамических катодных материалов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. №5. С. 56-61.
4. Изотьев С. В., Серёгин А. В., Демянюк Д.Г. Использование новых материалов для повышения безопасности ядерных энергетических установок // Международная студенческая конференция «Полярное сияние 2001», Сборник трудов. – Санкт-Петербург. 2001. С. 111-112.
5. Изотьев С. В., Серёгин А. В., Демянюк Д.Г. Синтез борсодержащих материалов для систем управления и защиты ядерных энергетических установок методом технологического горения // Тезисы VI-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ. 2001. С. 12-14
6. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г., Изотьев С.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов на основе боридов вольфрама, предназначенных для защиты от ионизирующих излучений ядерных установок // Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы технологий атомной промышленности–2001». – Томск: Изд-во ТПУ, 16-18 декабря 2001. С. 34-35
7. Dolmatov O.Yu., Shamanin I.V., Demyanuk D.G. Synthesis of materials of nuclear technique in a mode SHS (theory and experiment) // VI International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Haifa, Israel, February 17-21, 2002. P. 23-25.
8. Долматов О.Ю., Изотьев С.В., Демянюк Д.Г., Самораспространяющийся высокотемпературный синтез материалов на основе боридов вольфрама, предназначенных для защиты от ионизирующих излучений ядерных установок // Известия ТПУ, т. 305, вып. 3, 2002. С. 72-76.
9. Долматов О.Ю., Демянюк Д.Г. Модификация структурно-фазовых и механических свойств борсодержащих СВС-материалов, предназначенных для ядерно-энергетических установок // VII Ежегодная конференция МОЯОР, 14 – 16 октября 2002 г., г. Северск. 2002. С. 65-66.

совместных исследований концерна «РОСЭНЕРГОАТОМ» и ТПУ «Улучшение топливоиспользования, новые виды ядерного топлива. Схемы перегрузок и перемещения топлива в ВВЭР-1000, обеспечивающие возможность организации сверхдлинных компаний» (справка об использовании результатов от 14.01.05 за № ЮК/40).

Работа выполнена в рамках реализации научно-технических программ: программа сотрудничества Минобразования РФ и Министерства РФ по атомной энергии «Интеграция в сфере образовательной деятельности Томского политехнического университета и сибирских предприятий Минатома РФ», программа Рособразования РФ «Целевая финансовая поддержка для развития приборной базы научных исследований», программа Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка естественно-научных основ комплекса технологии ядерных топливных элементов с дополнительным барьером безопасности»

### ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ.

1. Расчетно-теоретический анализ принципиальной возможности получения материалов на основе боридов вольфрама, карбида бора и их послойных комбинаций в режиме СВС, основанный на термодинамическом расчете адиабатической температуры горения с использованием квантовой модели Дебая для определения температурной зависимости теплоемкости образующихся продуктов синтеза.
2. Экспериментально установленные теплофизические режимы протекания СВС в системах W-B и B-C при их сравнении с аналогичными режимами, определенными в ходе расчетно-теоретического анализа.
3. Способы направленного изменения теплофизических параметров горения систем W-B и B-C при их нагружении реакционноспособными добавками, которые приводят к модификации структурно-фазовых и прочностных характеристик получаемых материалов.
4. Экспериментальное определение пределов влияния геометрических параметров исходных СВС-систем на режимы распространения волны горения при проведении синтеза материалов на основе боридов вольфрама и карбида бора.
5. Закономерности прохождения потоков высокоэнергетичных нейтронов, гамма-квантов и заряженных частиц через защитные СВС-композиции на основе боридов вольфрама и карбида бора, позволяющие определить преимущества полученных материалов перед материалами, традиционно используемыми в системах управления и защиты ЯЭУ.

### ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и формулировке задач исследований, обосновании выбора теоретических и расчетных методов решения поставленных задач, анализе полученных данных и их интерпретации. Автор принимал непосредственное участие в разработке теоретических моделей,

проведении исследований и обработке данных экспериментов, составлении отчетной документации, подготовке материалов докладов и публикаций, выводов и заключений по работе, выдаче рекомендаций для практического использования.

### **АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 11 конференциях: на 6-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2000г.; III-ей Международной научно-технической конференции «Проблемы промышленных СВС-технологий – 2000», Барнаул, 2000г.; VI-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2001г.; Международной студенческой конференции «Полярное сияние 2001», Санкт-Петербург, 2001г.; Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы технологий атомной промышленности–2001», Томск, 2001г.; VI International Symposium on Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Haifa, Israel, 2002; III International Conference on Inorganic Materials, Germany, 2002; X-ой Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2004г.; конференции Сибирского химического комбината «Молодежь ЯТЦ: наука и производство», г. Северск, СХК, 2004г.; III международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности», г. Томск, 2005г.; IX Международной конференции «Полярное сияние 2006 – Ядерное будущее: безопасность, экономика и право», г. Санкт-Петербург, 2006г.

### **ПУБЛИКАЦИИ.**

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ: статей – 8, докладов (тезисов) на конференциях – 18.

### **ОБЪЕМ И СТРУКТУРА.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка литературы, изложенных на 124 страницах машинописного текста. Содержит 40 рисунков, 17 таблиц, и список литературы (86 наименований).

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна полученных результатов, приведены практическая значимость, защищаемые положения и личный вклад автора, структура диссертационной работы.

подход осуществлен путем расширения исходной шихты регентов реакционно способными никель-алюминиевыми добавками, вступающими в экзотермическую реакцию, тем самым повышая суммарный тепловой эффект совокупности протекающих в системе реакций. Это привело к получению практически однофазных продуктов на основе WB и В<sub>4</sub>C, что подтверждено результатами рентгенофазового анализа. Наличие в структуре фаз алюминидов никеля позволяет говорить о получении структуры материала, в которой имеется никель-алюминиевый каркас-матрица, диспергированная включениями требуемых фазовых составляющих.

4. При проведении экспериментов по определению предела прочности на сжатие полученных материалов установлено, что введение Ni–Al добавки в количестве 10–20 мас. % приводит к увеличению предела прочности на сжатие по сравнению с материалами без нагружения добавками примерно на 20–25 %. При этом установлены оптимальные с точки зрения прочностных характеристик количества вводимой добавки, составляющие величину 10–20 мас. %.

5. Экспериментальным путем определены пределы влияния геометрических параметров исходных СВС-систем на режимы распространения волны горения при проведении синтеза материалов на основе борида вольфрама и карбида бора. Установлено, что в качестве критерия реализации того или иного режима распространения волны горения может быть использовано отношение  $H/D$ , где  $H$  – высота образца,  $D$  – диаметр образца:

- При  $H/D < 0,5$  – реализуется кольцевой фронт волны горения.
- При  $H/D > 1$  – реализуется плоский фронт волны горения.
- При  $0,5 < H/D < 1$  – нет определенности в режимах горения.

6. В экспериментах по изучению закономерностей прохождения гамма-излучения установлено, что, эффективно ослабляя потоки  $\gamma$ -квантов, СВС-материалы значительно «смягчают» спектр за защитой за счет более интенсивного рассеяния не поглотившихся квантов в пористой структуре материала. Так, при ослаблении гамма-квантов стандартного источника <sup>60</sup>Co, испускающего кванты с энергией 1173,2 кэВ и 1332,5 кэВ, защитным экраном из СВС-материала на основе бориды вольфрама коэффициент ослабления увеличился примерно на 30-35%, а доля гамма-квантов с энергией менее 400 кэВ за защитным экраном – на 52-56% по сравнению с защитным экраном из свинца той же массовой толщины.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой направленной на решение актуальной задачи – разработки теплофизических основ СВ-синтеза борсодержащих металлокерамических и керамических функциональных материалов защитных конструкций и систем управления ядерных энергетических установок. Результаты диссертации вносят вклад в развитие материаловедения, в частности, в получение материалов различного целевого назначения методом СВС.

учета «искривления» траектории все частицы термализуются на глубине  $R_0$ , то учет влияния пористости приводит к тому, что те частицы, которые испытали рассеяние на свободных поверхностях пор, будут иметь более «искривленную» траекторию, и хотя полная длина этой траектории будет равна  $R_0$ , остановка таких частиц произойдет в области, размеры которой значительно больше по сравнению с беспористым случаем.

Численные расчеты показали, что использование пористости СВС-материалов обеспечивает увеличение эффективности защитных конструкций как от первичного потока заряженных частиц, так и от генерируемых ими потоков  $\gamma$ -квантов: поле энерговыделения пучков заряженных частиц в СВС-материалах «размывается», что снижает термоударные нагрузки; понятие «проективный пробег» при взаимодействии заряженных частиц с пористым материалом теряет физический смысл; диаграмма направленности вторичного излучения значительно деформируется в направлении, параллельном поверхности защитного экрана. Численные расчеты подтверждены выводами по результатам приборного эксперимента относительно преимуществ вольфрам-борсодержащих материалов и двухслойных защитных экранов графит-металлокерамика.

**В заключении** диссертационной работы подведены итоги проведенных теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы основные результаты и выводы.

### ВЫВОДЫ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика расчетно-теоретического анализа принципиальной возможности получения класса борсодержащих материалов в режиме СВС на основе термодинамического расчета адиабатической температуры горения. Особенностью разработанной методики является использование квантовой модели Дебая для определения температурной зависимости теплоемкости продуктов синтеза. Это позволило, в отличие от традиционных эмпирических методик, определить адиабатическую температуру как функцию параметров подготовки исходной шихты реагентов (плотность исходной системы, температура предварительного подогрева исходного образца, соотношение реагентов в исходной шихте).
2. В ходе многочисленных лабораторных экспериментов по синтезу материалов на основе боридов вольфрама и карбида бора установлено удовлетворительное согласие экспериментальных данных и результатов расчетно-теоретического анализа принципиальной возможности получения материалов в режиме СВС, что позволяет применять разработанную методику определения адиабатической температуры горения борсодержащих СВС-систем не только для выяснения принципиальной возможности горения, но и для оптимизации основных параметров предварительной подготовки исходной шихты реагентов и проведения синтеза.
3. На основании теоретического анализа разработаны и реализованы способы направленной модификации структурно-фазовых характеристик полученных материалов с целью предотвращения синтеза многофазных продуктов. Данный

**В первой главе** рассмотрены основы теории СВС, получение керамических материалов в режиме СВС, а также применение функциональной керамики.

Особое место среди порошковых материалов занимает техническая и функциональная керамика, поскольку она обладает широким комплексом эксплуатационных свойств, требуемых для изделий самого разнообразного назначения. Среди широкого спектра конструкционных материалов, получаемых методом порошковой технологии, функциональная керамика, обладающая заданными и предсказуемыми эксплуатационными свойствами, является в настоящий момент наиболее перспективным материалом для создания техники нового поколения.

Проблемы создания нетрадиционных материалов различного целевого назначения связаны не только с поиском систем элементов, обеспечивающих те или иные свойства, но и с определением оптимальных способов их получения. Вместе с тем, реализация получения материалов, с заранее заданными свойствами требует использования таких методов получения материалов, которые позволяют управлять реализующимися в процессе их создания прочностными, физическими, химическими и другими свойствами конечных продуктов, а так же прогнозировать необходимые режимы образования, не прибегая к длительному экспериментированию.

Все традиционные порошковые методы получения материалов ядерных установок характеризуются сравнительно сложным технологическим оборудованием, необходимостью поддержания определенных температурных режимов; сложностями, связанными с отделением образующихся побочных продуктов от целевого. Кроме того, использование перечисленных методов для получения конечного продукта приводит к невозможности управлять как режимами получения, так и реализующимися свойствами конечного продукта.

В связи с этим возникает необходимость поиска нетрадиционных технологических подходов, позволяющих синтезировать материалы с заданными свойствами.

Технологией, обладающей значительным потенциалом с точки зрения получения новых материалов, которые могут послужить основой для решения многих проблем в атомной отрасли, является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), открытый академиком А.Г. Мержановым и его научной школой в 1967г. Значительный вклад в развитие этой технологии внесли школы профессоров Максимова Ю.М., Левашова Е.А., Евстигнеева В.В.

Сущность метода СВС состоит в том, что в результате локального инициирования реакции в тонком слое исходной шихты реагентов, находящихся в твердом состоянии, фронт горения самопроизвольно распространяется по всей системе благодаря теплопередачи от горячих продуктов к не нагретым исходным компонентам, в которых также инициируется реакция горения. Процесс получения конечного продукта в режиме СВС имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами печного синтеза материалов: отсутствие потребления электроэнергии для поддержания необходимых температурных

режимов(процесс идёт за счет собственного тепловыделения); высокая производительность(сгорание происходит за десятки секунд); высокая чистота продуктов (температуры горения достигают значений 2000÷4000 К, что обеспечивает разложение и улетучивание примесей); управляемость процесса.

Изучение технологии продуктов горения заключается в разработке и реализации перспективных как с научной, так и с практической точки зрения материалов в режиме СВС, изучение закономерностей процессов горения в конкретных рассматриваемых системах и поиск оптимальных режимов синтеза, именно с точки зрения технологических подходов. Получение ряда перспективных неорганических материалов, в частности тугоплавких в режиме горения стимулирует дальнейшее развитие СВС-теории.

В настоящее время в СВС-режиме получен ряд перспективных материалов. При этом определены некоторые закономерности процессов горения и структурообразование в порошкообразных смесях химических элементов при различных режимах предварительной подготовки исходной шихты реагентов и осуществления СВ-синтеза, приводящих к получению ценных конечных продуктов, включая карбиды, бориды, интерметаллиды, сульфиды и др. Вместе с тем одной из ключевых проблем СВ-синтеза в сложных системах является многостадийность процесса синтеза, вследствие чего в структуре конечного продукта могут образовываться дополнительные фазы, т.е. образуется многофазный конечный продукт.

С точки зрения теории горения процесс СВ-синтеза представляет собой распространение пламени в горючей смеси (горение предварительно смешанных реагентов) или распространение пламени с высокотемпературной волной горения. Теплота реакции при этом расходуется на нагревание смеси и спекание образующегося материала. В таких процессах горения обычно четко различаются зона пламени и зона догорания. При этом благодаря тепло- и массопереносу перед зоной пламени образуется зона подогрева. В результате химических реакций в зоне пламени происходит частичное превращение компонентов горючей смеси в продукты реакции, причем один из компонентов играет роль горючего, а другой - окислителя. Следует отметить, что для любой смеси существуют пределы воспламенения, определяющие границы диапазонов состава и температуры, при которых возможно самораспространение пламени. Это следует учитывать при составлении горючих смесей, так как в системах с избытком или недостатком того или иного компонента процесс может вообще не начаться. Кроме того, пределы воспламенения могут сдвигаться при наличии веществ-разбавителей и при изменении температуры исходной смеси.

При проведении синтеза возникает необходимость учитывать геометрический фактор систем, в которых происходит синтез. Имеется в виду геометрический масштаб горящей системы (диаметр образца, трубы или струи). Это, прежде всего, связано с эффективным коэффициентом теплоотдачи от зоны реакции в окружающую среду, который влияет на скорость выделения тепла в волне горения и как следствие на скорость ее распространения. Следует отметить, что в одних и тех же условиях геометрический фактор может сильно меняться.

Эксперименты показали, что использование СВС-металлокерамики в случае защиты от  $\gamma$ -излучения по сравнению с традиционными односоставными защитными материалами при равных значениях массовой толщины позволяет снизить поток  $\gamma$ -квантов. Кроме того, использование СВС-материалов в качестве защитных от  $\gamma$ -излучения позволяет получать за защитными экранами спектры излучения, характеризующиеся высокой долей низкоэнергетического  $\gamma$ -излучения по сравнению с традиционными материалами. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты экспериментов

Материал	Массовая толщина, г/см <sup>2</sup>	Количество зарегистрированных фотонов, 10 <sup>8</sup>		Доля низкоэнергетических фотонов в спектре
		Полное	С энергией 0..400 кэВ	
WB	3,4	10,5	9,54	0,91
	6,8	9,59	8,46	0,88
	10,3	8,89	7,40	0,83
	13,7	7,72	5,60	0,73
Pb	3,4	14,1	5,08	0,36
	5,7	7,2	3,67	0,51
	7,6	3,8	2,47	0,65
	9,6	1,99	1,13	0,57

В численных экспериментах моделировалось прохождение потока быстрых нейтронов, плотность которого составляет 10<sup>14</sup> нейтрон/(см<sup>2</sup>·с), через защитные экраны, выполненные из различных материалов. Варьировалась толщина экранов. Рассмотрены двухслойные экраны графит-металлокерамика, в которых графитовый слой «сдвигает» спектр нейтронов в область меньших энергий и, таким образом, повышает эффективность вольфрам-бор содержащей защиты.

Как один из сопутствующих, или самостоятельный, можно рассматривать возникающий при взаимодействии нейтронов с веществом рассеянный или коллимированный поток заряженных частиц. Эти частицы, взаимодействуя с веществом, образуют в его объеме локальные области аномально большого тепловыделения. Чем меньше область локализации потока частиц в объеме вещества и четче ее геометрические границы, тем более мощному ударно-тепловому воздействию вещество подвергается.

Этому можно воспрепятствовать, обеспечив такие свойства материалов, которые увеличивали бы размеры области локализации потока частиц и сглаживали образующиеся в объеме материалов поля энерговыделения.

В рамках метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) воспроизведена картина проникновения потока протонов в пористый металлокерамический материал. «Искривление» траектории в процессе прохождения быстрых тяжелых частиц из-за многократного рассеяния на свободных поверхностях пор приводит к нарушению моноэнергетичности потока, даже если не учитывать многократное упругое рассеяние и флуктуацию энергетических потерь. Естественно, что нарушение моноэнергетичности потока приводит к разбросу частиц по глубине их проникновения в вещество. Если без

разным массовым количеством никель–алюминиевого модификатора для каждого материала. В таблице 4.1 приведены результаты проведенных экспериментов.

Таблица 4.1. Результаты измерений пределов прочности на сжатие

Материал	Предел прочности на сжатие (МПа) при добавлении в исходную шихту NiAl смеси в количестве:			
	0% вес.	10% вес.	20% вес.	50% вес.
WB	22,5÷23,7	28,8÷31,0	43,2÷45,1	39,4÷42,8
B <sub>4</sub> C	28,2÷30,3	38,8÷41,1	38,3÷40,2	27,1÷31,7

Анализ данных показывает, что введение Ni–Al добавки приводит к увеличению предела прочности на сжатие при содержании до 17...20 %. При больших содержаниях предел прочности падает. Это можно объяснить тем, что введение модифицирующей добавки приводит к образованию в образце мелкозернистой структуры. Температура плавления образующихся алюминидов никеля ниже, чем температура, развиваемая при горении в системах, а в ликвидной фазе модификатор препятствует образованию в системе крупнозернистой структуры. Таким образом, при остывании образца в его объеме создается никель–алюминиевая каркас-матрица, диспергированная включениями требуемых фазовых составляющих.

Эксперименты по изучению защитных свойств от потоков нейтронов проводились при вариации толщин защитных экранов, изготовленных из боросодержащих материалов B<sub>4</sub>C и WB. Защитные от потоков быстрых нейтронов свойства синтезированных материалов исследовались в сравнении с аналогичными свойствами традиционного материала ядерной техники – графита. Эксперименты показали, что использование боросодержащей СВС-керамики при защите от потоков быстрых нейтронов дает выигрыш по массогабаритным показателям. Основную роль при защите от потоков быстрых нейтронов играет карбид бора, что объясняется высокой замедляющей способностью легких ядер. Уменьшение значений интегральных нейтронных потоков за защитным экраном из многослойного материала при введении тонкого сантиметрового слоя из бориды вольфрама может быть объяснено процессами неупругого рассеяния нейтронов на тяжелых ядрах вольфрама. Можно предположить, что увеличение толщины WB-слоя должно увеличивать эффективность защиты.

Необходимо отметить, что метод направленного СВС позволяет варьировать массогабаритные показатели синтезированных защитных экранов в достаточно широких пределах. Так, установлена возможность их получения из шихты исходных реагентов, плотность которой можно увеличивать в несколько раз. При той же массовой толщине материалов их геометрическая толщина уменьшается практически прямо пропорционально.

При защите от потоков  $\gamma$ -квантов целесообразно использовать элементы с высоким атомным номером. Поэтому исследование защитных свойств проводилось для бориды вольфрама и многослойного материала B<sub>4</sub>C–WB при вариации толщины WB-слоя. Изучение защитных свойств проводилось в сравнении со свинцом.

**Во второй главе** рассматривается принципиальная возможность создания материалов ЯЭУ нетрадиционным способом, которым является СВС.

Первым этапом при проведении исследований по созданию функциональных материалов в режиме СВС является выбор и обоснование их элементного состава, затем отработка этапов технологии получения, для обеспечения необходимого сочетания их конечных свойств.

Главный принцип построения защит от потоков высокоэнергетических нейтронов состоит в замедлении быстрых нейтронов с последующим поглощением замедлившихся. При этом в основу создания материалов защиты должен быть положен принцип сочетания тяжелых и легких материалов.

При выборе тяжелой компоненты защиты от потоков нейтронов деления необходимо учитывать как полное сечение взаимодействия, так и сечение неупругого рассеяния, так как благодаря реакции неупругого рассеяния на ядрах тяжелых элементов можно достичь эффективного замедления нейтронов высоких энергий. В таблице 2.1 приведены расчетные эффективные сечения полного взаимодействия и неупругого рассеяния нейтронов спектра деления с ядрами ряда элементов, имеющих средний и высокий атомный номер.

Таблица 2.1.

Элемент	Порог неупругого рассеяния, МэВ	Эффективные сечения взаимодействия нейтронов спектра деления:	
		полное $\sigma_t^{эф}$ , барн.	неупругое рассеяние $\sigma_{in}^{эф}$ , барн.
Титан	0.40	3.54	0.24
Железо	0.76	3.46	0.38
Никель	1.50	3.95	0.19
Цирконий	0.80	6.92	0.31
Ниобий	0.30	7.27	0.79
Молибден	0.20	6.93	0.73
Вольфрам	0.10	7.30	1.72
Свинец	0.60	6.50	0.30
Уран	0.08	8.02	1.79

Таким образом, при защите от потоков ионизирующего излучения ядерных энергетических установок возможно использование материалов, содержащих в своем составе такие материалы, как бор, вольфрам, индий и ряд других. К таким материалам, например, могут быть отнесены бориды металлов с высоким атомным номером, обладающие высокой ядерной концентрацией тяжелой компоненты. В данной работе было предложено использование таких соединений, как B<sub>4</sub>C – классического материала реакторной техники и WB.

Рассмотрим возможность получения защитных материалов в режиме СВС. На предварительном этапе необходимо провести расчетно-теоретический анализ теплофизических параметров в системах, с целью определения, как принципиальной возможности синтеза, так и начальных условий подготовки и проведения синтеза. Это необходимо для того, чтобы избежать проведения многочисленных лабораторных экспериментов.

Одним из критериев, определяющих возможность процесса синтеза, является адиабатическая температура горения. Эта температура соответствует процессу сжигания, при котором вся теплота реакции расходуется на разогрев реакционной системы.

При проведении расчетно-теоретического анализа определения принципиальной возможности осуществления СВ-синтеза необходимо определять значения адиабатических температур горения для СВС-материалов. В общем случае расчет адиабатической температуры не дает однозначного ответа на вопрос о возможности протекания СВ-синтеза. Однако, в сочетании с экспериментальным изучением СВ-синтеза материалов различных классов такой подход позволяет спрогнозировать возможность осуществления процесса горения. Исследования показали, что при

$$T_{\text{aa}} < 1000 \text{ K} - \text{адиабатическая температура горения,}$$

$$T_{\text{aa}} > 2000 \text{ K} - \text{температура плавления материала,}$$

$$1000 \text{ K} < T_{\text{aa}} < 2000 \text{ K} - \text{температура горения в диапазоне,}$$

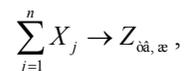
Основным условием для определения  $T_{\text{aa}}$  является равенство энтальпий исходных веществ при начальной температуре  $T_0$  и конечных продуктов при температуре  $T_{\text{aa}}$ . Оно означает, что все выделившееся при реакции тепло идет на нагрев продуктов горения от начальной температуры до температуры горения и может быть представлено в виде:

$$\sum_{i=1}^n [H(T_{\text{aa}}) - H(T_0)]_i = Q, \quad (2.1)$$

где  $T_{\text{aa}}$  – адиабатическая температура горения,  $T_0$  – начальная температура,  $Q$  – тепловой эффект реакции. Знак  $\sum_{i=1}^n$  показывает, что суммирование ведется по всем продуктам реакции.

Расчет максимальной температуры, развивающейся при синтезе, проводят в предположении адиабатичности процесса, т.е. при отсутствии тепловых потерь из зоны реакции при полном превращении реагентов в конечные продукты. Влияние теплотерь обычно рассматривают в рамках макрокинетической теории, основанной на детальном рассмотрении механизма процесса с учетом всей совокупности физико-химических факторов.

Рассмотрим процедуру расчета адиабатической температуры горения рассматривается на примере реакции образования одного продукта из элементов:



где  $X_j$  – исходный реагент;  $Z$  – конечный продукт, который может в общем случае находиться в твердой или жидкой фазе,  $n$  – количество исходных реагентов.

В этом случае уравнение (2.1) можно представить в виде:

2. При  $H/D > 1$  реализуется плоский фронт волны горения.

3. При  $0,5 < H/D < 1$  нет определенности в «геометрии горения», горение может инициироваться как на торцах, так и на боковой поверхности одновременно.

Для первого и второго случая отмечалось равномерное прохождение волны горения по образцу, в третьем случае движение носило хаотичный характер, что отрицательно сказывается на однородности структуры синтезированного образца.

Основной причиной недостатков продуктов СВС, препятствующих их широкому применению в технике ЯЭУ, является их многофазность. Это связано с многостадийностью процесса СВС, когда образованию промежуточных продуктов соответствует свой температурный режим. Вследствие быстроты прохождения волны горения, а следовательно и неравномерности нагрева образца по объему, в структуре материала возникли локальные области, где образование конечного продукта оставалось на той или иной стадии.

Выходом из создавшейся ситуации могло бы стать увеличение суммарного теплового эффекта, протекающих в системе реакций. Это означает, что нужно увеличить температуру процесса на столько, чтобы температурные режимы по всему объему образца позволяли бы полностью завершить СВС.

Одним из решений данной проблемы могло бы стать введение в исходную шихту реагентов стехиометрических реакционно-способных добавок, которые в процессе протекания синтеза вступают между собой в экзотермическую реакцию, тем самым повышая суммарный тепловой эффект протекания СВС.

В качестве возможных добавок рассматривались системы металл-углерод, металл-металл, металл-кремний.

По результатам экспериментов по получению целевых материалов можно сделать вывод, что для материалов на основе соединений W-B и B-C лучшей добавкой является система Ni-Al. Как показали опыты, она является практически инертной по отношению к выше указанным системам, чего нельзя сказать про другие системы, которые в процессе синтеза вступают в химическое взаимодействие с остальными веществами образцов, что приводит к увеличению числа фаз в структуре материала.

Отработанные в ходе проведения экспериментов этапы технологического процесса получения однослойных композиционных материалов были использованы для создания многослойных керамик.

**В четвертой главе** рассмотрены результаты экспериментов по исследованию защитных и прочностных свойств материалов на основе соединений W-B и B-C полученных в режиме СВС.

В работе были проведены эксперименты по определению пределов прочности на сжатие материалов на основе карбида бора и боридов вольфрама. Эксперименты проводились на машине Амелера-Лаффона, для цилиндрических образцов при вариации количества никель-алюминиевой добавки, которое изменялось в пределах от 0% вес. до 50% вес. Было изготовлено по 30 образцов с

градиент температур, развивающийся при синтезе, не имеет больших значений, а значит, конечный продукт должен иметь однородную структуру.

В этом случае одним из основных факторов, определяющих режимы распространения волны горения является геометрия образца, прежде всего его размеры. А геометрические размеры оказывают влияние на режим горения образца, в первую очередь на скорость и на направление распространения волны горения, а как следствие и на структурообразование образца.

Различают следующие случаи:

1. Горение инициируется на боковой поверхности, охватывая образец по всей окружности, затем фронт волны в виде сужающегося кольца двигался к центру цилиндрической таблетки. В итоге фронт «схлопывался» в центре, после этого горение прекращалось (кольцевой фронт волны горения).
2. Горение инициируется на торцах образца. На верхнем торце образца образовывался плоский слой горения, который двигался вниз. Примерно в десяти из двадцати случаев инициировалось два плоских фронта один сверху, другой снизу, которые двигались навстречу друг другу. Движение встречных фронтов проходило до тех пор, пока они не встречались, затем горение прекращалось (плоский фронт волны горения).

С целью определения влияния геометрии на режимы горения систем на основе карбида бора и бориды вольфрама были проведены серии экспериментов, в которых температура предварительного подогрева была одинаковой.

Порошки бора и углерода, порошки вольфрама и углерода прессовали в образцы цилиндрической формы диаметром 30 мм, меняя высоту образца от 4,5 мм до 60 мм с шагом 4,5 мм, для каждого значения шага была проведена серия из 20 экспериментов.

В таблице 3.1 приведены результаты экспериментов для образцов карбида бора.

Таблица 3.1

Высота образца (H), мм	Отношение высоты образца к его диаметру, H/D	Наблюдаемый режим горения из серии
4,5	0,15	Кольцевой
9,0	0,30	Кольцевой
18,0	0,60	Нет определенности
22,5	0,75	Нет определенности
36,0	1,20	Плоский
...	...	Плоский
60	2	Плоский

Аналогичная закономерность была обнаружена и для образцов прессованных из порошков вольфрама и бора.

Анализ полученных результатов показал, что в качестве критерия реализации того или иного режима распространения волны горения может быть использована величина  $H/D$ , где  $H$  – высота образца,  $D$  – диаметр образца. Было установлено, что:

1. При  $H/D < 0,5$  реализуется кольцевой фронт волны горения.

$$\int_{T_0}^{T_{aa}} C(T) dT = Q - \nu L, \quad (2.2)$$

где  $C$ ,  $Q$ ,  $L$  – соответственно теплоемкость, теплота образования и теплота плавления продукта  $Z$ , а  $\nu$  – доля жидкой фазы в продукте горения

$$\nu = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{aa} < T_{ie}, \\ 1 & \text{if } T_{aa} > T_{ie}. \end{cases}$$

Если известны  $C(T)$ ,  $Q$  и  $L$ , то уравнение (2.4) позволяет определить  $T_{aa}$ , а в случае равенства  $T_{aa}$  и  $T_{ie}$  и величину  $\nu$ .

Для того, чтобы определить соотношение между  $T_{aa}$  и  $T_{ie}$  и, следовательно, учесть плавление продукта, нужно рассчитать величину разницы энтальпий:

$$\Delta H(T_{ie}) = \int_{T_0}^{T_{ie}} C(T) dT$$

и сравнить ее с величинами  $Q$  и  $Q - L$ . При  $\Delta H(T_{ie}) > Q$   $T_{aa} < T_{ie}$ , при  $\Delta H(T_{ie}) < Q - L$   $T_{aa} > T_{ie}$ , при  $Q - L < \Delta H(T_{ie}) < Q$   $T_{aa} = T_{ie}$  и  $\nu = \frac{Q - \Delta H(T_{ie})}{L}$ .

В данной работе проводились эксперименты по созданию класса борсодержащих функциональных материалов. В частности, бориды вольфрама и карбида бора.

Расчет адиабатической температуры горения, приводящего к синтезу бориды вольфрама, проводился для случая, когда исходные реагенты смешивались из расчета на протекание следующей реакции:



Определение температурной зависимости теплоемкости для бориды вольфрама проводилось согласно разработанной методики, особенностью которой является использование для определения температурной зависимости теплоемкости продуктов горения квантовой модели Дебая, которая в отличие от традиционной эмпирической методики расчета теплоемкостей, основанной на аппроксимации данных по теплоемкостям, позволяет определить адиабатическую температуру горения как функцию ряда параметров состояния системы: плотность реакционной системы, массовое соотношение компонентов в шихте исходных реагентов, начальная температура процесса.

В численных экспериментах определялась адиабатическая температура горения при различных варьируемых параметрах предварительной подготовки исходной шихты реагентов: плотность подготовленных к синтезу образцов; величина температуры предварительного подогрева исходных образцов.

В ходе численных экспериментов было установлено, что для получения материала на основе бориды вольфрама в режиме СВС требуется предварительный подогрев исходных образцов при всех рассмотренных

значениях их плотности. Установлено, что при температуре предварительного подогрева около 300 К (температура окружающей среды) процесс горения неосуществим. В то же время при значениях начальной температуры, превышающей 500 К, процесс СВС в рассматриваемой системе происходит всегда. С точки зрения технологии создания защитных материалов необходимо добиться того, чтобы, по возможности, величина  $T_{ад}$  была минимальной. Это объясняется двумя причинами: минимизация энергетических затрат на проведение процесса синтеза; ограничение скорости протекания процесса горения, связанной с  $T_{ад}$ . С другой стороны, защитные материалы должны обладать высокой плотностью, которая в нашем случае достигается путем предварительного прессования исходной шихты.

Анализ расчетных данных показал, что получение материалов с необходимой плотностью (более 4000 кг/м<sup>3</sup>) возможно при температурах предварительного подогрева, превышающих 500 К.

Расчет адиабатической температуры горения, приводящего к синтезу карбида бора, проводился для случая, когда исходные реагенты смешивались из расчета на протекание следующей реакции:



Определение температурной зависимости теплоемкости для карбида бора проводилось аналогично расчету теплоемкости для борида вольфрама.

В численных экспериментах определялась адиабатическая температура горения при различных варьируемых параметрах предварительной подготовки исходной шихты реагентов: плотность подготовленных к синтезу образцов; величина температуры предварительного подогрева шихты исходных реагентов.

В ходе численного эксперимента получили низкие значения для  $T_{ад}$ , поэтому в качестве критерия возможности осуществления СВС выбрана нижняя граница области неопределенности, для которой  $T_{ад}$  равна 1000 К.

Для получения материала на основе карбида бора в режиме технологического горения, необходим предварительный подогрев образцов прессованной шихты при значениях плотности ниже 1200 кг/м<sup>3</sup>, для более высоких значений плотности прессования предварительный подогрев не нужен. Так видно, что при  $T_0$ , равной нормальной температуре (около 300 К) и давлениях ниже 1200 кг/м<sup>3</sup> без внешней инициации процесс горения неосуществим. В то же время при значениях начальной температуры, превышающих 500 К, процесс СВС в рассматриваемой системе происходит всегда. Как и для материалов на основе WB, необходимо добиться того, чтобы величина  $T_{ад}$ , по возможности, была минимальной.

Анализ расчетных данных показал, что получение материалов с высокой плотностью (более 1200 кг/м<sup>3</sup>) возможно при температурах предварительного подогрева, превышающих 500 К.

**В третьей главе** рассмотрены результаты экспериментов по получению поглощающих и функциональных материалов для ЯЭУ в режиме СВС. Отработана методика получения и определены соответствующие температурные режимы. Проведено обоснование введения в состав материалов модифицирующих добавок.

В качестве исходных параметров для реализации СВС-процесса в рассматриваемых системах (WB и B<sub>4</sub>C) использовались данные, полученные в ходе предварительного термодинамического расчета и включающие следующие параметры: величина давления прессования исходной шихты реагентов и температура предварительного подогрева образцов прессованной шихты.

В ходе проведения экспериментов величина давления прессования исходной шихты варьировалась от величины 0,5 МПа до величины 5 МПа, а величина температуры предварительного подогрева варьировалась в диапазоне от 300 до 700 К.

На рис. 3.1–3.2 представлены характерные термограммы горения для рассматриваемых систем.

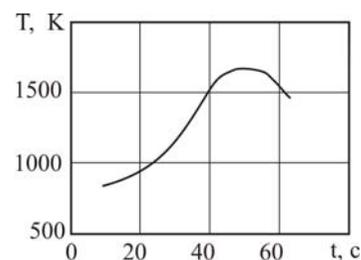


Рис. 3.1. Термограмма СВС-процесса, протекающего в системе W–B

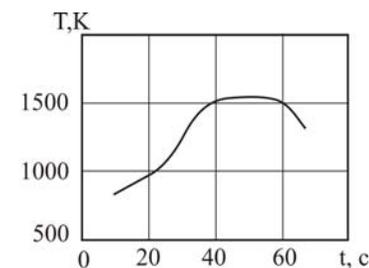


Рис. 3.2. Термограмма СВС-процесса, протекающего в системе B–C

Все известные способы инициации могут быть сведены к двум основным механизмам: локальная инициация и подвод тепла ко всей поверхности образца. Выбор того или иного механизма инициации синтеза определяется требуемыми конечными свойствами продукта, которые определяются процессами структурообразования, протекающими в образцах во время синтеза

Локальная инициация реализуется с помощью поджигающей спирали, через которую пропускается электрический ток. При синтезе материалов с использованием поджигающей спирали режимы распространения волны горения зависят от места запрессовки запальной спирали. Волна горения начинает распространяться по объему образца от места нахождения спирали.

С другой стороны к материалам ядерной техники предъявляются жесткие требования по многим параметрам, в том числе необходимость обеспечения однородной структуры. Чтобы структура синтезированного образца была максимально равномерна по всему объему, необходимо создать условия, при которых значения градиента температур в образце были бы минимальными. Этого можно достичь, используя другой механизм инициации СВС – подвод «запального» тепла ко всей поверхности образца. Данный механизм, как правило, реализуется посредством нагревания образца в печи. В данном случае образец предварительно нагревается до некоторой температуры, затем происходит инициация синтеза. Так как образец предварительно нагрет, то