



Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**Институт проблем химико-  
энергетических технологий  
Сибирского отделения  
Российской академии наук  
(ИПХЭТ СО РАН)**

659322, г. Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1  
т. (3854) 305-955, ф. 303-043, 301-725, e-mail: admin@ipcet.ru  
ОКПО 10018691, ОГРН 1022200571051, ИНН 2204008820,  
КПП 220401001

Исх. № 15365-304-217 от 15.11.2018  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

3/2  
Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 212.269.13 при ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»

к.т.н. А.С. Матвееву  
634050, г. Томск, пр. Ленина 30

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор, профессор, д.х.н.



С.В. Сысолятин

15 ноября 2018 г.

### Отзыв

Ведущей организации на диссертацию Шульца Дениса Сергеевича, выполненную на тему «Исследование нестационарных процессов безгазового горения гетерогенных систем» и представленную к защите по специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Решение ряда практических задач в машиностроении, химической и строительной промышленности, металлургии, авиационно-космической и военной технике, электронике и т.д., связано с концептуальными положениями теории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Синтез в режиме горения – перспективный метод получения керамики, интерметаллидов, ферросплавов, сверхпроводников. На протяжении последних 60 лет интенсивное развитие данного направления привело к созданию более 500 новых химических соединений и материалов, разработке

целого комплекса технологий. Не смотря на очевидные достижения, теоретические основы требуют дальнейшего углубления и развития. По-прежнему важными задачами являются математическое моделирование нестационарных процессов горения, построение физико-химических и физико-математических моделей СВС в конкретных порошковых средах, исследование процессов горения с учетом особенностей гетерогенной структуры таких систем.

В связи с изложенным, диссертационная работа Шульца Дениса Сергеевича является своевременной и посвящена актуальным вопросам исследования физико-химических и теплофизических процессов в химически реагирующих гетерогенных системах.

Диссертационная работа Шульца Д.С. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 124 наименований; содержит 137 страниц.

Во введении кратко, но в достаточном объеме обоснованы актуальность, научная и практическая значимость выбранного направления исследований. Сформулированы и обоснованы цель и задачи работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу и обсуждению состояния работ в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза как способа получения различных материалов и соединений. Подробно рассмотрены существующие модели стационарного и нестационарного безгазового горения. Показано, что в теоретических работах по исследованию влияния гетерогенности структуры прессованных смесей порошков для СВС имеются стационарные модели с использованием различных геометрических моделей реакционных ячеек, однако нестационарные явления в этих моделях изучены недостаточно.

В целом, обсуждение рассматриваемых проблем и путей их решения, применительно к поставленной цели и задачам работы, проведено в достаточном объеме и обосновано.

Вторая глава посвящена разработке математической модели нестационарного безгазового горения с учетом гетерогенной структуры и зависимости диффузии от температуры с использованием моделей плоских и сферических реакционных ячеек. В качестве реакционной ячейки предполагается усредненный элемент гетерогенной структуры смеси порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу. Считается, что в каждом элементе происходят процессы диффузии и реагирования реагентов. Скорость химической реакции в каждой точке по длине образца определяется из решения задачи диффузии и химического реагирования с учетом зависимости диффузии от температуры. Предполагается, что пространственное распределение температуры в реакционной ячейке отсутствует.

Предложена и проверена на решении тестовой задачи методика численного решения системы уравнений выбранной математической модели. Полученные результаты с хорошей точностью совпадают с данными других авторов. Определены параметры разностной схемы, обеспечивающие достаточную точность численного решения задачи диффузии реагентов в реакционной ячейке с учетом зависимости коэффициента диффузии от температуры при линейном нагреве совокупности реакционных ячеек.

В третьей главе приводятся результаты численного моделирования нестационарного распространения фронта безгазового горения согласно предложенной модели. Получены зависимости скорости распространения фронта безгазового горения от размера гетерогенности структуры, интенсивности диффузии и энергии активации диффузии.

Проведено исследование влияния плавления одного из компонентов на скорость горения. Выявлено, что с увеличением теплоты плавления скорость горения уменьшается при соответствующих значениях безразмерных параметров задачи. Представлены результаты расчетно-теоретического анализа скорости горения многослойных биметаллических нанопленок.

Показано, что все полученные результаты согласуются с экспериментальными данными в широком диапазоне величин гетерогенной структуры СВС состава.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Сделанные при текущем обсуждении результатов предположения в целом корректны и не противоречат современному уровню знаний.

Четвертая глава посвящена численному исследованию распространения безгазового горения в коническом образце при наличии теплоотвода на внешних границах в двумерной осесимметричной постановке. Приводится физическая и математическая постановка задачи в размерных и безразмерных переменных. Для численного решения используется переход к системе координат, связанной с формой образца.

Проведены исследования влияния теплоотдачи на закономерности распространения волны безгазового горения в коническом образце. Выявлено три режима распространения фронта горения: увеличение скорости фронта горения с пройденным расстоянием вдоль оси конуса, срыв горения, горение без срыва. Проведен анализ влияния плавления одного из компонентов реакционной смеси на закономерности распространения волны безгазового горения в коническом образце с учетом гетерогенности его структуры.

Полученные расчетно-теоретические результаты являются значимыми для использования на практике. Объем проведенных исследований более чем достаточный.

В целом, достоверность полученных результатов и их анализ не вызывает сомнений и подтверждается, в том числе, соответствием ряда результатов других исследователей, применением классических методов математического моделирования и численных методов, сеточной сходимостью численного решения задач.

Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы в необходимой и достаточной мере обоснованы всем объемом проведенных исследований и анализа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- в своевременности и значимости поставленной цели и некоторых задач исследования для решения прикладных технических задач, заключающиеся в расчетно-теоретическом анализе нестационарных процессов безгазового горения гетерогенных СВС составов;
- предложено и проведено численное моделирование нестационарного безгазового горения биметаллических нанопленок с использованием плоских реакционных ячеек;
- изучено влияние процесса теплоотдачи при безгазовом горении конического гетерогенного образца СВС.

Научная значимость результатов исследования состоит в том, что:

- на основе численного моделирования нестационарного безгазового горения гетерогенных СВС составов установлена зависимость величины скорости распространения волны от формы реакционных ячеек; показано, что гетерогенность структуры образцов не влияет на область существования автоколебательного режима распространения волны горения;
- предложенная методика и программы численного расчета скорости нестационарного безгазового горения позволяют определить величину скорости распространения фронта горения в зависимости от параметров гетерогенной структуры;
- предложенная модель и численная методика позволяют определить влияние теплоотдачи на характер распространения волны безгазового горения в коническом образце.

Практическая значимость не вызывает сомнений и определяется разработкой методики расчета скорости безгазового горения гетерогенной структуры и рекомендацией применения при планировании экспериментов, направленных на практическое изучение кинетики, механизма реакций, структуры фронта горения СВС составов. Работа проводилась в рамках гранта РФФИ 15-03-02578А «Разработка математических моделей горения и расчета нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных

топлив» и РФФИ 11-08-00370А «Разработка научных и методических основ вычислительной технологии расчета нестационарных процессов вентиляции угольных шахт, в том числе при возникновении пожара». Материалы диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, в том числе из списка рекомендованных ВАК (3 публикации), результаты докладывались на конференциях и семинарах международного и всероссийского уровней. Автореферат в достаточной степени отражает и соответствует содержанию диссертации.

В целом материалы диссертации представляют несомненный интерес для специалистов организаций, занимающихся разработкой материалов и технологий на основе СВС систем.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

1. Целесообразно было бы более конкретно указать то, что подразумевается под «хорошей точностью совпадения с экспериментальными данными» на с. 78 (п. 5) диссертации и «удовлетворительной точностью совпадения с экспериментальными данными» на с.15 автореферата.

2. В диссертации и автореферате в разделе структура и объем диссертации не указано количество рисунков и таблиц.

3. На с. 8 автореферата ука-  
казано, что список использованных источников содержит 125 наименований, в диссертации приведен список из 124 источников.

4. При достаточно хорошем стиле изложения присутствует небрежность в предоставлении материалов в тексте диссертации и автореферата (не везде соответствие требованиям ГОСТ 7.0.5 – 2008 Библиографические ссылки и ГОСТ Р 7.0.11 – 2011 Оформление диссертации).

Перечисленные замечания не меняют положительного заключения по диссертации Шульца Д.С., являющейся законченной научно-исследовательской и квалификационной работой.

По актуальности поставленных задач, объему и достоверности проведенных исследований, научной и практической значимости полученных результатов, диссертационная работа Шульца Дениса Сергеевича «Исследование нестационарных процессов безгазового горения гетерогенных систем» полностью соответствует требованиям п. 9 Приложения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает, как квалифицированный специалист, присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Отзыв рассмотрен на научном семинаре лаборатории № 4 «Физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем», протокол № 7 от 12.11.18 г.

Начальник лаборатории, д.т.н.

Н.В. Козырев

Научный сотрудник лаборатории, к.ф.-м.н.

М.В. Комарова

Научный сотрудник лаборатории, к.т.н.

А.Г. Вакутин

Ученый секретарь, к.т.н.

С.С. Титов

Отзыв составила Комарова Марина Витальевна, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаб. №4 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д.1, т. (3854) 301866, e-mail: [mv10mv@mail.ru](mailto:mv10mv@mail.ru)