

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

ШУЛЬЦА ДЕНИСА СЕРГЕЕВИЧА

### *«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ БЕЗГАЗОВОГО ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ»,*

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Физико-химические превращения в гетерогенных системах в условиях самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) – традиционная тема многочисленных исследований, стимулированных практическим применением СВС-материалов и перспективой их использования в новых технологических процессах. Достаточно отметить, что этой теме посвящены специальные научные журналы.

Несмотря на большое число исследований, в проблеме формирования материалов при СВС существует ряд недостаточно изученных вопросов. К их числу относится влияние структурных и физико-химических параметров исходной порошковой смеси на динамику нестационарного безгазового горения в гетерогенных системах.

Поэтому диссертационная работа Шульца Д.С., направленная на моделирование процессов нестационарного горения в гетерогенных конденсированных системах, представляет **актуальное** исследование, имеющее **практическую** направленность. При решении этой задачи автором получены новые знания о влиянии различных факторов на динамику горения высокоэнергетических материалов. В этом заключается принципиальная **научная новизна** работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования, и изложена на 137 страницах.

**Во введении** обсуждается актуальность рассматриваемой проблемы и цель исследования, описывается структура диссертационной работы, полученные результаты, их апробация, новизна, научная и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава «Современное состояние исследования процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза»** – обзорная. В ней приведены известные сведения о горении гетерогенных конденсированных систем. Перечислены основные факторы, определяющие данное явление. Акцентируется внимание на слабой теоретической изученности процесса нестационарного СВ-синтеза. Результатом обзора явилось обоснование цели и задач диссертационного исследования.

Во второй главе **«Математическая модель безгазового горения с учетом гетерогенности структуры и зависимости диффузии от температуры»** представлена математическая формулировка задачи нестационарного горения бинарной смеси, состоящей из совокупности эквивалентных реакционных ячеек, плоских или сферических. Подробно описана процедура численного решения задачи и приведены результаты тестирования разработанной программы для оценки точности вычислений. Рассматривается упрощенная схема химического взаимодействия в ячейке: исходные компоненты, один из которых может быть легкоплавким, в ходе реакции образуют однофазный тугоплавкий стехиометрический продукт. Наиболее значимый результат второй главы – создание программного продукта, позволяющего решать нестационарные одномерные задачи безгазового горения с учетом гетерогенной структуры реакционного образца.

Третья глава **«Численное моделирование безгазового горения с учетом гетерогенности структуры и зависимости диффузии от температуры»** посвящена, на основе разработанных в предыдущей главе математических моделей и расчетных программ, теоретическому исследованию динамики распространения волны горения в гетерогенных средах. Проанализировано влияние фазового перехода в одном из реагентов на скорость распространения фронта экзотермической реакции. Проведено сопоставление теоретических расчетов с найденными в научной литературе экспериментальными данными. Показано удовлетворительное соответствие полученных результатов ранее известным.

Четвертая глава **«Численное исследование распространения волны безгазового горения в коническом образце»** является наиболее примечательной. В ней, на основе построенной математической модели и разработанной численной программы, проведено параметрическое исследование процессов горения в образце, имеющем форму конуса. Рассматривалась двумерная по температуре осесимметричная задача. Причем, теоретический анализ осуществлялся как для гомогенной реакционной среды, так и с учетом ее гетерогенности и плавления одного из реагентов. Найденны критические значения теплоотвода, определяющие срыв горения в коническом образце. Получены

зависимости степени недогорания в коническом образце от интенсивности теплоотвода и его геометрических параметров.

В **Заключении** сформулированы основные выводы и результаты.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов подтверждаются:

- использованием ранее апробированных методов теоретических расчетов;
- удовлетворительным соответствием результатов численных расчетов данным экспериментальных исследований, опубликованных в научной литературе.

Основные результаты работы обсуждались на конференциях и представлены в 11 печатных работах, 3 из которых входят в Перечень ВАК.

**Значимость** полученных в диссертационной работе результатов заключается в возможности их использования для дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований в области самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

**Замечания** по рассматриваемой диссертационной работе:

1. Содержательный смысл физической и математической постановок рассматриваемых задач в диссертации выявлен недостаточно: не даны объяснения, зачем и для чего вводится та или иная модель. Причем, автор переходит от одной модели к рассмотрению другой без какой-либо ясной этому аргументации. По самим моделям возникает множество вопросов, например: непонятна физическая сущность концентраций (массовая, объемная); из каких соображений концентрации на межфазных границах полагаются постоянными; чему равна стехиометрия смеси; по какой причине плотности исходных веществ и продукта принимаются одинаковыми. Сами граничные концентрации в диссертации связаны условием  $c_2 = 1 - c_1$ . Это неправильно, в представленной постановке задачи для граничных концентраций может быть только одно условие:  $c_1 > c_2$ .

2. В выводах к диссертации утверждается, что гетерогенность структуры образцов и образующийся в ходе реакции слой продукта не оказывают влияние на область существования автоколебательного горения. Для подобного вывода необходимо построить расчетную диаграмму в параметрах « $\beta - \gamma$ » с линией, определяющей границу перехода из области стационарных режимов в область колебательного горения, и сравнить с классическим критерием устойчивости Шкадинского К.Г. – Хайкина Б.И. – Мержанова А.Г. Такого расчета в диссертации нет. Более того, если химическая реакция определяется диффузией через образующийся слой продукта, то последний неминуемо будет оказывать влияние на области различных режимов горения.

3. В главе 3 автор проводит сравнение результатов численных расчетов с данными экспериментов для системы Ni – Al, по всей вероятности, в стехиометрии 1:1. Здесь автор,

по сути, методом обратной задачи определив параметры горения в механоактивированной системе Ni – Al, успешно применяет их для теоретического описания синтеза в многослойных биметаллических нанопленках.

Полученный результат неоднозначный, так как имеются существенные отличия в процессах горения механоактивированных образцов и нанопленок, величины кинетических параметров которых не могут совпадать. Более того, даже при совпадении величин кинетических параметров, теплопроводности в системе плотно прилегающих друг к другу биметаллических нанопленок и пористой порошковой смеси, состоящей из гранул активированных компонентов, должны значительно отличаться. А ведь именно теплопроводность в большой мере будет определять величину скорости горения.

4. Имеются сомнения в правомочности использования автором для моделирования горения в нанопленках диффузионной модели, так как в подобных тонкослойных структурах химическая реакция в большей степени будет определяться не диффузией через слой продукта, а кинетикой взаимодействия на межфазных границах.

5. В выводах к гл. 3 и 4 утверждается, что плавление одного из реагентов незначительно влияет на скорость горения. Однако еще в 80-е годы прошлого столетия А.П. Алдушин с соавторами в своих работах показал, что параметры фазового перехода могут оказывать существенное влияние на кинетику горения. Например, если фазовый переход осуществляется при высоких температурах, то он подавляет пульсации фронта горения, т.е. расширяет область стационарных режимов распространения волны синтеза.

6. В выводах к гл. 4 написано, что скорости волны горения, рассчитанные по моделям с учетом гетерогенности структуры и без ее учета, качественно совпадают. Тогда непонятно, на что влияет гетерогенность, если с учетом последней не возникает никаких особенностей при фазовых переходах, если гетерогенность не оказывает влияние как на область существования стационарных и колебательных режимов горения, так и на саму величину скорости горения? В чем все-таки состоит отличие кинетики горения с учетом гетерогенности структуры от таковой в гомогенных средах?

### **Заключение**

Высказанные замечания снижают общую оценку работы диссертанта. Отчасти это обусловлено множеством представленных в диссертации математических моделей, что не позволило автору работы провести более тщательное параметрическое исследование и в полной мере раскрыть расчетно-аналитические возможности каждой из них.

Необходимо подчеркнуть, что важным итогом рассматриваемого диссертационного труда является создание программного продукта, позволяющего при теоретическом

исследовании режимов послойного горения решать не только нестационарное уравнение теплопроводности, но и нестационарное уравнение диффузии в пределах элементарных ячеек, из совокупности которых моделируется гетерогенная реакционная смесь.

Характеризуя в целом исследование, представленное в диссертационной работе Д.С. Шульца, следует констатировать, что автором выполнен определенный цикл работ по математическому моделированию нестационарных процессов СВС в гетерогенных системах, которые являются актуальными и интересными, имеющими практическую ценность. По каждой главе диссертации написаны выводы, итог работы подведен в заключении. Основные результаты диссертации Д.С. Шульца опубликованы в центральной научной печати и докладывались на конференциях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Д.С. Шульца удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник Отдела структурной макрокинетики федерального  
государственного учреждения науки Томский научный центр СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, 10/3.  
(3822) 492-782 [ovlap@mail.ru](mailto:ovlap@mail.ru)

4

✓

Лапшин Олег Валентинович

Подпись официального оппонента заверяю  
Председатель Федерального государственного учреждения  
науки Томский научный центр СО РАН  
доктор физико-математических наук

ВВ



Колосов В.В.