

## **О Т З Ы В**

**официального оппонента на диссертацию**

**Абзалова Наиля Илдусовича**

**МАКРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА  
В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ ИЗ ГРАНУЛИРОВАННОЙ СМЕСИ,**

**представленную на соискание ученой степени**

**кандидата физико-математических наук по специальности**

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

### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа, представленная Абзаловым Наилем Илдусовичем, посвящена исследованию закономерностей и механизмов горения гранулированных смесей титан + углерод с металлической связкой. Синтез композиционных материалов с повышенными технологическими свойствами, и, в частности, материалов на основе карбида титана, в режиме горения относится к актуальным техническим направлениям. Однако, чтобы получить продукт горения необходимой степени чистоты и с минимальными затратами на доведение его до конечного изделия, необходимы обширные научные знания, на основе которых выбираются свойства и состав исходной шихты, включающей различного рода технологические добавки, а также условия горения и условия обработки продукта горения. Это определяет актуальность темы исследования.

### **Основные результаты и достоинства работы**

В недавних публикациях сотрудников ИСМАН было показано, что гранулирование исходной шихты при синтезе карбида титана горением позволяет улучшить характеристики продукта, сделать процесс горения более устойчивым и воспроизводимым и увеличить скорость горения.

В диссертационной работе Абзалова Н. И. приводятся результаты подробного экспериментального исследования закономерностей горения гранулированных композитных смесей титан + углерод с металлической связкой (никель, никель-хром) с варьированием большого числа параметров, включая содержание никеля и поливинилбутирала (органического связующего, используемого при гранулировании), размер частиц титана, размер гранул и наличие/отсутствие спутного газового потока. Определены области параметров смеси и условий горения, при которых можно с уверенностью говорить о реализации конвективного механизма горения гранулированных смесей. Рассмотрены особенности механизма конвективного горения, наблюдаемые при горении гранулированных смесей.

Фактически исследование, проведенное Абзаловым Н. И., закладывает научные основы нового метода синтеза композиционных порошков на основе карбида титана с металлической связкой в режиме горения из гранулированной шихты.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Литературный обзор (Глава 1) хорошо написан и структурирован с выделением ключевых подразделов: СВС, характеристики процессов и продуктов, производство, теория СВС, кондуктивно-конвективная модель горения, гранулирование. Обзор позволяет составить полное представление о проблемах и состоянии исследований в данной области знаний и естественным образом сформулировать задачи исследования.

Методы регистрации, представленные в Главе 2, дают достаточно полное представление об исходном состоянии образцов (фракционный состав порошков компонентов и гранул, насыпная плотность смеси и гранул, газопроницаемость образца, размещенного в камере), процессе горения (видеосъемка, измерение давления и расхода газов) и свойствах продукта горения (рентгенофазовый анализ, микроструктура, химический анализ на наличие азота). Термодинамические расчеты, выполненные по программе Термо, дают информацию о температуре горения и идеальном составе продуктов.

В Главе 3 представлены исследования закономерностей горения гранулированных смесей титан + углерод с 25 % никеля с варьированием размера частиц титана и наличия/отсутствия обдува аргоном или азотом. Следует отметить три очень интересных результата. Во-первых, показано, что в зависимости от условий горения и размера частиц титана скорость горения гранулированного образца может изменяться очень существенно, до 4 раз. Далее, подтверждено, что азот участвует в химических реакциях при горении с обдувом. И, наконец, варьируя указанные параметры, можно избежать образования интерметаллидов титан-никель.

В Главе 4 приводятся достаточно обширные экспериментальные данные, которые демонстрируют влияние добавки поливинилбутираля (ПВБ), используемой при гранулировании композицией для СВС карбида титана, на процесс горения. Одновременно с изменением добавки ПВБ в опытах варьировались содержание никеля в смеси и размер гранул. Поскольку при разложении ПВБ в волне горения образуются газы, то в поровом пространстве между гранул появляется газовый поток, по мощности аналогичный внешнему потоку в опытах с азотом или аргоном. Наиболее важный результат этих исследований: в зависимости от величины варьируемых параметров выделены области, в которых горение протекает либо в кондуктивном, либо в конвективном режиме. Определение режима горения осуществляется сравнением скоростей горения, измеренных для исследуемого образца, и в реперных опытах (образец, гранулированный без ПВБ, и образец, сжигаемый в металлической сетке, которая покрывает боковую поверхность образца и

отводит поток газов в боковой зазор). Если скорости горения близки по величине, то имеет место кондуктивный режим горения, если скорость горения исследуемого образца превышает реперную величину в 2 раза – механизм с участием конвективной теплопередачи.

В главах 5 и 6 представлены результаты исследования закономерностей горения гранулированных композиций титан-углерод-хром-никель. Синтез конечного продукта из этих композиций протекает более сложно, чем синтез карбида титана с никелевой связкой, который исследовался в Главах 3 и 4. Образование двойного карбида титан-хрома происходит на стадии догорания после завершения стадии воспламенения. Установлена композиция, при горении которой получается двойной карбид титан-хрома со связкой нихрома и малым количеством побочных фаз, легко измельчающийся до порошкообразного состояния. Вместе с тем, такие закономерности, как повышение скорости горения и улучшение свойств продукта при гранулировании обнаружены и для данных композиций.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

### **Новизна и научно-практическое значение результатов работы**

Все результаты, вынесенные диссертантом на защиту, являются новыми. Впервые исследованы закономерности горения гранулированных композиций, используемых для синтеза карбида титана и двойного карбида титан-кремния с никелевой и нихромовой связкой, при варьировании размера частиц титана, содержания никеля, размеров гранул и содержания органической добавки ПВБ, применяемой для гранулирования, и даны объяснения этих закономерностей с позиций двух различных механизмов переноса энергии в волне горения. Впервые выделены области варьируемых параметров, в которых реализуется новый конвективный режим горения гранулированных смесей, возникающий за счет воспламенения поверхности гранул горячими газообразными продуктами разложения ПВБ.

Закономерности, установленные диссертантом, закладывают надежный фундамент нового энергоэффективного метода синтеза композиционных порошков на основе карбида титана с металлической связкой из гранулированной шихты в режиме горения. Эти закономерности составляют отличную базу для развития и проверки полноценной теории конвективного горения в установках для синтеза композиционных порошков. Условия, в которых реализуются кондуктивный или конвективный режимы горения, будут полезны при проектировании промышленных установок для синтеза композиционных порошков на основе карбида титана. Результаты, полученные в диссертации, относительно эффектов гранулирования, несомненно, будут служить основой при синтезе в режиме горения других композиционных материалов.

## Замечания по диссертации

Замечания относятся, главным образом, к оценкам и объяснениям конвективного режима горения. Дело в том, что полноценной теории конвективного режима горения применительно к синтезу композиционных материалов, которую можно было бы надежно использовать при анализе и обсуждении экспериментальных данных, до сих пор не создано. Поэтому здесь остается поле для различных точек зрения и дискуссий.

1) Конец стр. 75 – начало стр. 76. Здесь написано, что если обозначить время воспламенения гранулы  $t$  и время тепловой релаксации гранулы  $t_h$ , то Из неравенства  $t_h \gg t$ , следует, что гранула не прогревается к моменту воспламенения ее поверхности. Следовательно, в гранулированной смеси реализуется двумерная структура волна горения...

На самом деле, это отношение может быть много больше 1 безотносительно к прогреву гранулы с поверхности. К примеру, при обычном торцевом горении слоя гранул это условие выполняется, если достаточно большую величину имеют радиус гранулы или скорость ее горения.

Действительно,  $\frac{t_h}{t} = \frac{r^2/a}{2r/U} = \frac{rU}{2a}$ .

Таким образом, по моему мнению, выполнение неравенства не следует использовать как доказательство реализации двумерной структуры волны горения, которая может привести к конвективному режиму горения. А вот заметное превышение скорости распространения пламени по гранулированному заряду над скоростью горения материала гранул (как это, кстати, делается и в диссертации) вполне достаточно, чтобы допустить механизм конвективного горения.

2) В Главе 4 на стр. 77 сделаны оценки скоростей конвективного горения. Такие же оценки делаются в диссертации еще несколько раз в других главах. Оценки опираются на предположение, что скорость волны воспламенения (волны конвективного горения) определяется по формуле:

$$U = d/t \quad (4.7)$$

Против этой формулы у меня есть такое возражение. Воспламеняемая гранула входит в ансамбль таких же гранул, которые составляют цилиндрический образец, имеющий пористость и газопроницаемость, по величине которой можно определить средний диаметр пор. За время  $t$  горячие газы, текущие по порам и нагревающие до воспламенения заданную гранулу, отдают тепло также в соседние гранулы, включая те, что располагаются вниз по потоку. После воспламенения заданной гранулы за время  $t$  соседняя гранула оказывается уже частично прогрета, и поэтому время ее

воспламенения окажется меньше времени  $t$ . Таким образом, в задачу о конвективном воспламенении наряду с прогретым слоем в радиальном направлении вместо диаметра гранулы входит длина зоны прогрева в направлении распространения фронта пламени. Это означает, что дискуссия относительно метода оценки скоростей горения при конвективном режиме, по моему мнению, должна быть продолжена.

3) В Главе 2 приведены методики измерения газопроницаемости порошков и гранул. Однако в тексте диссертации соответствующие результаты измерений отсутствуют.

4) В конце стр. 109 упоминается полупромышленный СВС-реактор. Далее на стр. 110 сообщается, что его загрузка составляет 12 кг, и рассматриваются различия в составе продуктов между этим реактором и лабораторной установкой, представленной в Главе 2 диссертации. Однако нет никакой информации о том, проводил ли диссертант опыты на этом полупромышленном СВС-реакторе, или эти данные взяты из литературы.

5) И совсем мелкая поправка: на Рис. 1.7 на стр. 37 три варианта композитов обозначены: а, б и в, тогда как в подписи к рисунку: 1, 2 и 3.

### **Общая оценка диссертации и рекомендации**

В целом диссертация, представленная Абзаловым Н. И., производит очень хорошее впечатление. Результаты исследования, проведенного диссертантом, фактически закладывает научные основы нового энергоэффективного метода синтеза композиционных порошков на основе карбида титана с металлической связкой в режиме горения из гранулированной шихты, что является решением важной научной задачи в области получения конденсированных продуктов методом СВС.

Диссертация написана хорошим языком, автореферат полно отражает содержание диссертационной работы. Тема диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 14 статей в реферируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus. Результаты исследования докладывались на многочисленных конференциях и хорошо известны научной общественности.

Автор диссертации продемонстрировал научную зрелость, умение разбираться в сложных научно-технических проблемах и самостоятельно находить убедительные подходы к решению поставленных задач. Научная достоверность положений диссертации и ее выводов обусловлены большим объемом качественно проведенных экспериментов, сходимостью с

имеющимися литературными данными и строгой логикой научных рассуждений.

Данная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842), а ее автор, Абзалов Наиль Илдусович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества



Ермолаев Борис Сергеевич

« 02 » сентября 2022 г.

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук, лаборатория взрывных процессов в конденсированных средах.

Должность: Ведущий научный сотрудник

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4.

Телефон: 8(916)818-88-46

Адрес электронной почты: [boris.ermolaev44@mail.ru](mailto:boris.ermolaev44@mail.ru)

Web-сайт организации: <http://www.chph.ras.ru>

Подпись и сведения заверяю

Ученый секретарь ФИЦ ИХФ РАН



к.ф.-м.н.



Ларичев Михаил Николаевич