

## **О Т З Ы В**

**официального оппонента доктора физико-математических наук  
Ермолаева Бориса Сергеевича**

на диссертационную работу **Васильева Дмитрия Сергеевича «Макрокинетические закономерности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза тройных систем Ti-C-Si, Ti-C-B, Zr-C-N из гранулированных смесей»**, 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 Васильевым Дмитрием Сергеевичем, посвящена экспериментальному определению макрокинетических закономерностей горения тройных тугоплавких систем Ti-C-Si, Ti-C-B, Zr-C-N из порошковых и гранулированных смесей насыпной плотности и анализу полученных результатов с помощью известных теоретических моделей. Потребность в композиционных керамических материалах с заданным химическим и фазовым составом, которые способны обеспечить особо качественное покрытие изделий и инструментов в высокотехнологичных отраслях техники является мощным стимулом для развития научно-технической деятельности. СВС-технология традиционно относится к эффективным направлениям этих работ. Управление процессом синтеза и оптимизация его параметров остается актуальной темой научных исследований.

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

На тройных тугоплавких системах Ti-C-Si, Ti-C-B и Zr-C-N, последняя смесь с газовым реагентом, с успехом применен единый методический подход к исследованию закономерностей горения композиционных систем, включающий набор экспериментальных и теоретических методик, позволяющих делать научно-обоснованные выводы о механизме горения, влиянии примесных газов и оптимальных условиях горения для получения целевых продуктов синтеза.

Доказана существенная роль примесного газовыделения при горении тройных тугоплавких систем на основе титана с двумя неметаллическими

компонентами (Ti-C-Si, Ti-C-B). Действие примесных газов в системе Ti-C-B приводит к реализации конвективного режима горения.

Гранулирование смесей Ti-C-Si и Ti-C-B значительно повышает скорость горения и улучшает свойства продуктов синтеза. Определены условия, при которых механизм горения определяется конвективным переносом тепла.

Предложена и обоснована модель синтеза карбонитридов циркония при горении гранулированной шихты в спутном потоке азота. Определены условия реализации конвективного режима горения.

В целом диссертация Васильева Д. С. представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой получены новые решения актуальных задач, диктуемых развитием и практикой СВС-синтеза.

### **Новизна, степень обоснованности и достоверность полученных результатов**

Макрокинетические закономерности горения тройных тугоплавких систем Ti-C-Si, Ti-C-B и Zr-C-N из порошковых и гранулированных смесей и их теоретическое объяснение получены впервые. Достоверность выводов об особенностях механизма горения и вкладе примесных газов и конвективного переноса тепла определяется надежностью и полнотой комплекса экспериментальных и теоретических методик, который использован диссертантом. Методики прошли обоснованную проверку на СВС-системах с примесными газами при спутной и встречной фильтрации и обеспечивают хорошую повторяемость и воспроизводимость экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов также подтверждена большим количеством публикаций в высокорейтинговых журналах и участием в российских и международных конференциях и научных семинарах.

### **Практическая значимость исследований**

Показано, что фазовый состав продуктов синтеза в тугоплавких системах Ti-C-Si и Ti-C-B соответствует целевым показателям и не зависит от структуры пористого образца, условий проведения синтеза и соотношения исходных компонентов.

Доказана возможность синтеза карбонитрида циркония с высоким содержанием азота в реакторе проточного типа из гранулированной шихты при перепаде давления до 2 атм.

## Замечания по диссертационной работе

1. Литературные данные по закономерностям горения систем Ti-C-Si и Ti-C-B, которые цитируются в диссертации, демонстрируют минимум скорости горения при увеличении в образцах содержания третьего компонента (см, например, рис. 12 диссертации). Результаты, которые получены диссертантом (рис. 17 и рис. 21), минимума не имеют. Это различие и возможные причины следовало бы отметить в диссертации.

2. Вывод 6 главы 3 диссертации (стр. 70) сформулирован неточно. Написано: «Проведенные исследования системы Ti-C-Si не подтвердили гипотезу о торможения скорости горения вследствие конкуренции между реакциями C и Si с расплавом Ti, продемонстрировав сильное влияние ПГ.» Однако реально в своем исследовании диссертант получил новое объяснение закономерностей горения системы, связанное с поведением примесных газов. А прежнее объяснение, гипотеза о торможении, предложенное в литературе, в самой диссертации не проверялась, и поэтому говорить о том, что гипотеза не подтвердилась, это логическая неточность.

3. То же самое замечание относится к главе 4. Вывод 4 главы 4 (стр. 92): «Исследования на системе Ti-C-B не подтвердили гипотезу о торможении скорости горения вследствие конкуренции между реакциями, показав при этом сильное влияние ПГ на скорость горения.» Здесь также конкуренция между реакциями в диссертации не анализировалась.

4. В разделе 4.5 приведена расчетная оценка коэффициента теплообмена при конвективном горении гранулированной смеси за счет примесного газа. Полученная оценка существенно превышает общепринятое значение коэффициента теплообмена (см. Табл. 8). Оценка основана на предположении, что конвективный теплообмен обеспечивает нагрев боковой поверхности гранул до температуры воспламенения смеси, которая положена равной температуре плавления титана 1955К. Однако возможен иной подход, при котором не требуются высокие значения коэффициента теплообмена. Можно предположить, что конвективный нагрев происходит, но его интенсивность недостаточна, и боковая поверхность не нагревается до температуры воспламенения. В результате конвективного нагрева на боковой поверхности гранул создается слой, температура которого оказывается гораздо выше, чем температура в центре гранул, равная начальной температуре смеси. Как следствие, горение распространяется по этому слою

вдоль боковой поверхности гранул с более высокой скоростью. Скорость тем выше, чем более интенсивно протекает конвективный нагрев и выше температура этого слоя. Таким образом, в научном плане возможно иное объяснение результатов, полученных в ходе оценки коэффициента теплообмена, которое позволяет снять указанное различие.

Эти замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на положительную оценку диссертационного исследования Д.С. Васильева.

### **Общее заключение**

Диссертация Васильева Д.С. хорошо написана, содержит прекрасный литературный обзор по СВС-исследованиям. Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертации и все полученные результаты. Уровень научных задач, решенных в диссертации, соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Диссертация Васильева Дмитрия Сергеевича «Макрокинетические закономерности самораспространяющегося высокотемпературного синтеза тройных систем Ti-C-Si, Ti-C-B, Zr-C-N из гранулированных смесей», является завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты по закономерностям и механизму горения тройных тугоплавких систем, предназначенных для создания керамических материалов с высокотехнологическими свойствами. По критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов и их вкладу в развитие СВС-технологий диссертация Васильева Д. С. полностью соответствует требованиям пунктов 7 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Васильев Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

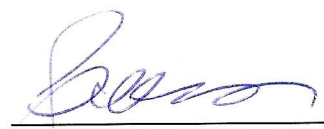
Я, Ермолаев Борис Сергеевич, даю согласие на использование своих персональных данных в документах, связанных с защитой диссертации Дмитрия Сергеевича Васильева, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Ермолаев Борис Сергеевич

доктор физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Ведущий научный сотрудник лаборатории взрывных процессов в конденсированных средах, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ИХФ РАН)



Ермолаев Борис Сергеевич



2025 г

119991 Москва, ул. Косыгина, д. 4, корп. 1.

Телефон: 8(916)818-88-46

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

Web-сайт организации: [icp@chph.ras.ru](http://icp@chph.ras.ru)

Подпись д. ф.-м. н. Ермолаева Бориса Сергеевича заверяю.

Ученый секретарь ФИЦ ИХФ РАН

к.ф.-м.н. Михалева М.Г.

