

## ОТЗЫВ

официального оппонента о кандидатской диссертации Асташова Алексея Григорьевича на тему «Распределение плотности тепловых и массовых потоков в плазменном реакторе с ограниченным струйным течением в процессах получения нанопорошков», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы»

**Актуальность темы диссертации.** Синтез в высокотемпературных газовых потоках термической плазмы является эффективным способом получения наноматериалов различных неорганических соединений и их композиций, которые обладают рядом уникальных свойств по сравнению с массивными материалами. Одним из способов реализации процесса получения нанопорошков является проведение физико-химических превращений исходных реагентов в плазменной струе, ограниченной стенками плазмохимического реактора. В качестве источника плазменного потока используются различные плазменные генераторы. В результате плазмохимического синтеза образуются наночастицы, которые в значительном количестве осаждаются на стенках плазмохимического реактора. Определение параметров плазменного процесса, при которых осажденные на стенках плазмохимического реактора наночастицы сохраняют свои свойства в течение всего времени синтеза и обеспечивают получение однородного по физико-химическим свойствам целевого продукта, как со стенок реактора, так и из фильтра является важной задачей. На основании вышесказанного тема диссертации Асташова А. Г. является **актуальной** с научной и практической точек зрения.

Экспериментальные исследования по тепло-и массопереносу от запыленного плазменного потока к стенкам реактора в процессах получения нанопорошков несомненно направлены на решение этой актуальной задачи.

**Научная новизна результатов исследований.** К научной новизне диссертационной работы относятся: результаты экспериментальных исследований по теплообмену незапыленной плазменной струи различного химического состава (азот, азот-водород, воздух) со стенками реактора;



результаты по теплообмену плазменной струи, содержащей наночастицы различных материалов (медь, вольфрам, оксид алюминия, карбиды вольфрама) с осажденным на поверхности реактора слоем наночастиц; результаты по экспериментальному исследованию переноса массы (наночастиц) на стенку реактора в зависимости от режимных параметров процесса, расстояния от входа в реактор и геометрических характеристик плазменного генератора (диаметр сопла). При этом впервые установлено, что экстремальный характер распределения удельных тепловых потоков на стенку реактора, практически совпадает с экстремумом плотности массового потока наночастиц к осажденному слою. Впервые получены данные по изменению физико-химических свойств наночастиц, находящихся в осажденном на стенках реактора слое, в зависимости от времени проведения процесса и расстояния от входа в реактор.

***Практическая значимость результатов исследований.*** Практическая значимость диссертационной работы подтверждается тем, что результаты, полученные в диссертации (по тепло- и массообмену ограниченной плазменной струи со стенками реактора), использовались при разработке технологий и конструировании плазмохимических реакторов для получения нанопорошков различных материалов и выполнялись по заданию Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», по гранту РФФИ 1-08-00516, а также при проектировании опытно-промышленной плазменной установки для производства нанопорошков диоксида титана на предприятии ОАО «ЯрегаРуда». Проведенный анализ мировых рынков производства наноматериалов (тенденций его роста), который к 2022 году может составить 11,27 млрд. \$ также подтверждает практическую и коммерческую значимость результатов, полученных в диссертации.

***Степень обоснованности научных положений выводов и рекомендаций сформулированных в диссертации. Достоверность полученных результатов.*** Научные положения, сформулированные автором, выводы и



рекомендации представляются достаточно обоснованными, что подтверждается тем, что в диссертации изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других авторов. При этом проведен подробный анализ технологий и плазмохимических реакторов для получения нанопорошков различных материалов, а также проанализирован опыт других исследователей по переносу тепла и массы, в т.ч. с учетом силы термофореза на стенку плазмохимического реактора. Список литературы содержит 119 наименований. Обоснованность и достоверность научных положений диссертации подтверждается также тем, что в исследованиях использовались апробированные методики (термодинамический анализ процессов получения нанопорошков с помощью программы "TERRA"), корректно проводились измерения при изучении тепло-и массообмена плазменной струи со стенками реактора. Аттестация полученных порошков проводилась с использованием современных методик и оборудования (измерение удельной поверхности, рентгенофазовый анализ, химический анализ и др.). Достоверность выводов по диссертации подтверждается также большим объемом проведенных исследований и воспроизводимостью полученных результатов.

***Апробация результатов научных исследований и публикации.***

Результаты, полученные автором при выполнении работы, докладывались на шести отечественных и одной зарубежной конференциях и опубликованы в пяти изданиях, рекомендованных ВАК, в прочих печатных изданиях — 1, в сборниках тезисов докладов научных конференций — 11, всего — 17.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы и двух приложений. Диссертация изложена на 104 страницах, содержит 5 таблиц, 53 рисунка и список использованной литературы, включающий 119 наименований.

***Во введении*** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации.



*В первой главе* приведен обзор литературных источников, в которых были проанализированы перспективы применения нанноматериалов благодаря особенностям их физико-химических свойств. В главе проводится подробный анализ различных конструкций плазмохимических реакторов, существующих плазмохимических установок (отечественных и зарубежных) для получения нанопорошков. На основании проведенного анализа делается вывод, что для реализации плазменных процессов получения нанопорошков наиболее эффективным является реактор с ограниченным струйным течением, который обеспечивает получение целевого продукта с заданными свойствами, высоким выходом целевых продуктов и обладает значительным ресурсом работы. Автором диссертации уделяется внимание и такому важному вопросу, как физико-химические превращения наночастиц в осажденном на стенках плазмохимического реактора слое, которые определяют свойства конечного продукта. В результате проведенного аналитического обзора литературных источников были сформулированы цели и основные задачи исследований.

*Во второй главе* приводится описание экспериментальной установки, состоящей из плазменного генератора мощностью 25 кВт и секционированного плазмохимического реактора. В главе приведена методика измерения и расчета плотности теплового (методом калориметрирования) и массового потока на стенку реактора, температуры газового потока (с анализом погрешности измерения), методика измерения толщины слоя нанопорошка, осажденного на стенках плазмохимического реактора. Также в главе представлен выбор объектов исследования: получение нанопорошков Cu, W, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, карбидов вольфрама.

*Третья глава* посвящена анализу результатов экспериментальных исследований теплообмена ограниченной плазменной струи (не содержащей и содержащей наночастицы) со стенками реактора. Распределение температуры не запыленного плазменного потока в объеме реактора имеет экстремум в зоне присоединения струи (азотной и азот-водородной). Плотность теплового потока на стенку реактора имеет максимум в зоне присоединения струи к



стенкам реактора и составляет 20-40 кВт/м<sup>2</sup> для исследованного диапазона расходов плазмообразующего газа и энтальпий (12,3-6,7 кВтч/нм<sup>3</sup>). Увеличение диаметра сопла плазматрона с 6 до 10мм смещает максимум плотности теплового потока ближе к входу в реактор из-за уменьшения импульса плазменной струи. Данные по относительной плотности теплового потока на стенку реактора в запыленной плазменной струе также имеют максимальные значения на расстоянии 0,3 м от входа в реактор. Экзотермическая реакция окисления алюминия, проводимая в воздушной плазме, смещает зону максимальных тепловых потоков ко входу в реактор.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования массовых потоков наночастиц на стенку реактора при плазмохимическом синтезе. Предварительно был проведен термодинамический анализ исследуемых плазменных процессов. Эксперименты по термообработке нанопорошков позволили определить температурные пределы для сохранения необходимой дисперсности в продуктах, осаждаемых на стенках реактора. В экспериментах установлено, что плотность массового потока на стенки реактора имеет максимум в зоне присоединения плазменной струи к стенке реактора для процессов получения нанопорошков Cu, W, карбидов вольфрама, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для различных расходов реагентов. В главе представлены результаты по исследованию свойств синтезированных порошков (морфология, средний размер частиц, удельная поверхность и др.) в зависимости от расстояния от входа в реактор. Установлено, что при получении нанопорошков карбидов вольфрама и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> их фазовый и дисперсный составы практически не зависят от расстояния от входа в реактор. Толщина осажденного слоя наночастиц имеет максимум в зоне присоединения плазменной струи к стенкам реактора. Доля порошка осажденного на стенках реактора составляет 60-80% от общего его расхода, что подтверждает **актуальность** исследований процессов происходящих при его осаждении на стенки реактора.

**Основные положения, выводы и заключения**, приведенные в диссертации представляются достоверными, логично обоснованными и базируются на



грамотно проанализированном экспериментальном материале, который получен с применением современных методов исследования.

### ***Общие замечания по диссертационной работе.***

Наряду с несомненными достоинствами диссертационной работы следует указать на ряд недостатков.

1. Обработку экспериментальных данных по тепло-и массопереносу от плазменного потока к стенкам реактора целесообразно было бы проводить в виде критериальной зависимости, например,  $St=f(Re,Pr)$ , в т. ч. с учетом его запыленности, что может быть полезным при масштабном переходе к установке с большей производительностью.

2. В диссертации отсутствуют данные по содержанию в порошках, полученных в процессах восстановления вольфрама из  $WO_3$  и синтеза карбидов вольфрама, кислорода и свободного углерода (рис.4.20), наличие которых может оказывать негативное влияние на качество конечного продукта при его дальнейшей переработке, например, при докарбидизации смеси карбидов вольфрама.

3. Целесообразно было бы оценить температуру осажденного на стенке реактора слоя со стороны высокотемпературного газового потока (используя данные по калориметрированию), которая может оказывать влияние на физико-химические превращения с наночастицами в поверхностном слое с высокой порозностью.

4. Для точек, представленных на графиках (рис. 3.3, 3.6, 3.7) не указаны параметры плазменной струи (энтальпия, расход плазмообразующего газа) несмотря на то, что диапазон изменения этих параметров значителен (см. стр.53).

5. Приведенные на рис. 3.6 и 3.7 относительные плотности теплового потока не позволяют оценить вклад присутствия наночастиц в плазменном потоке в теплообмен его со стенками реактора.

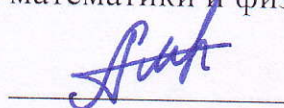
В целом, несмотря на указанные замечания, они не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертации.

***Заключение.*** Представленная работа имеет научную и практическую значимость. Самостоятельную ценность представляют результаты по тепло-и массопереносу в плазменном потоке с ограниченным струйным течением, содержащим наночастицы синтезированного порошка, которые могут быть использованы при промышленной реализации плазменных процессов и разработке плазмохимических реакторов, например, при получении диоксида



титана на предприятии ОАО «ЯрегаРуда». Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как научно обоснованные технические разработки, имеющие существенное значение для физики плазмы и конкретного применения плазменной техники в процессах получения нанопорошков различных материалов. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе экспериментальных данных. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертационная работа отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Асташов Алексей Григорьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент  
Заведующий кафедрой «Высшей математики и физики»,  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник



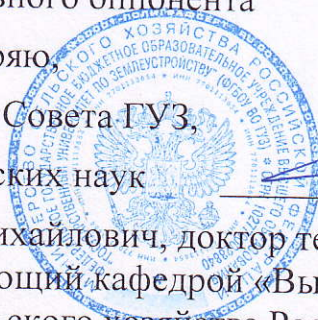
А.М.Лыков

Подпись официального оппонента

Лыкова А.М. заверяю

Ученый секретарь Совета ГУЗ,

доктор экономических наук



Е.В.Черкашина

Лыков Алексей Михайлович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой «Высшей математики и физики»,  
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования, Государственный университет по землеустройству,  
105064, г.Москва, ул.Казакова, 15, тел.+74992619545, e-mail alykov49@mail.ru