

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

27.11.2018 № 331/1-4
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор НИЯУ МИФИ
д. физ.-мат. наук, профессор
Стриханов Михаил Николаевич



«27» ноября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе
Брендакова Романа Владимировича

«Моделирование технологии фторидного передела вольфрама»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы. Имеется большой интерес во многих странах мира к вопросам создания новых высокоэффективных технологий и совершенствования, существующих в различных отраслях производства, которые невозможны без использования современных методов математического моделирования, т.е. изучения основных свойств рассматриваемого объекта на основе созданной математической модели. В современных отраслях промышленности – химии, металлургии, машиностроении, радиоэлектронике, авиа- и автостроении, атомной и военной технике – научный прогресс, экономические и экологические показатели в значительной степени определяются конструкционными материалами, которые используются при создании, эксплуатации производств и выпуске различных видов товарной продукции. Традиционно выпускаемые металлы и их многочисленные сплавы уже не удовлетворяют требованиям по химической стойкости, удельной плотности и физико-механическим свойствам, особенно при работе в условиях больших механических нагрузок, в высокотемпературных режимах и в коррозионных средах. Поэтому, сейчас большое внимание уделяется процессам обработки тугоплавких металлов, таких как вольфрам W, молибден Mo, титан Ti, цирконий Zr и др.

В работе была сформулирована тема исследования по созданию физической и математической модели технологии фторидного передела металлического вольфрама, способной учесть сложные гетерогенные химические реакции, нелинейные процессы, протекающие непосредственно на поверхности взаимодействия газовой и твердой фаз, влияние неоднородности плотности в

многокомпонентной смеси газов на характер гидродинамической обстановки в рабочей зоне реактора. Актуальность данной темы исследования для интенсивно развивающихся современных отраслей производства, связанных с созданием новых образцов оборудования и материалов с уникальными свойствами, не вызывает никакого сомнения.

Диссертационная работа Брендакова Р.В. содержит введение, четыре главы, заключение, список использованных источников и литературы, приложение. Объём диссертационной работы составляет 110 страниц, 81 рисунок. Список использованной литературы включает 56 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены защищаемые положения и дана общая характеристика работы. Отмечен личный вклад автора, приведена информация об апробации результатов работы.

В первой главе проведён обзор научно-технической литературы, которая посвящена исследованию по вопросам газофазных методов переработки тугоплавких металлов, а также литературы, касающейся вопросов численного решения технологических задач.

Вторая глава диссертации отражает физическую и математическую постановки задач фторирования металлического вольфрама и восстановления гексафторида вольфрама водородом. Первая часть данного раздела начинается с рассмотрения новой физической постановки трехмерной задачи для процесса получения газообразного гексафторида вольфрама, который образуется в результате протекания реакции между газовым потоком фтора и порошком вольфрама. Для описания процесса фторирования порошкообразного металлического вольфрама фтором записаны системы трехмерных уравнений Навье-Стокса, переноса теплоты и вещества при наличии гетерогенной реакции на нижней поверхности рабочей зоны химического реактора. Переменная плотность в уравнениях переноса импульса вызывает дополнительные итерации вычислительного процесса, что ведет к существенному увеличению времени расчета. В работе рассмотрен второй вариант математической постановки для задачи фторирования. Для получения высокой эффективности процесса фторирования в реальных химических реакторах используются малые значения скорости газов. Это позволяет по аналогии с приближением Буссинеска не учитывать изменение плотности среды в инерционных слагаемых переноса импульса, что существенно упрощает постановку задачи. Вторая часть этого раздела посвящена описанию оригинальных граничных условий, обеспечивающих единственность получаемого численного решения. В реакционной зоне, на нижней стенке, учитывается направленный диффузионный поток фтора. Для относительной массовой концентрации фтора в зоне реакции на нижней стенке используется граничное условие третьего рода. Третья часть этой главы посвящена описанию физической и математической постановке второго процесса, составляющего основу технологии фторидного передела вольфрама, это процесс восстановления гексафторида вольфрама газообразным водородом. Учитывая, что при протекании смеси газов возле подогреваемой подложки, на ее поверхности интенсивно протекает химическая реакция, в результате которой изменяется химический состав смеси газов, происходит изменение ее плотности.

Это учитывается в созданной математической модели процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом. В заключительной части этого раздела описаны своеобразные граничные условия, обеспечивающие единственность получаемого численного решения задачи восстановления гексафторида вольфрама водородом.

В третьей главе диссертации обосновывается выбор численного метода и описывается схема его реализации для решения систем дифференциальных уравнений второго порядка с частными производными. Все задачи, представленные в работе, решались численно методом конечных разностей. В настоящее время наиболее перспективным подходом является метод решения уравнений переноса импульса в физических переменных «скорость – давление». Одним из эффективных способов решения уравнений движения несжимаемой среды в переменных «скорость – давление» является метод физического расщепления по времени полей скорости и давления. Для решения систем дифференциальных уравнений, типа уравнений переноса скалярной транспортабельной субстанции, в работе используется неявная двухслойная схема переменных направлений, записанная в «дельта» форме, с «экспоненциальной схемой» для записи конвективных и диффузионных слагаемых. После подстановки трехточечной разностной схемы в обобщенную неявную двухслойную схему переменных направлений, полученная система алгебраических уравнений с трёхдиагональной матрицей для каждого временного слоя, эффективно решается методом прогонки.

В четвертой главе представлены новые результаты численных расчётов, выполненных по созданной математической модели технологии фторидного передела вольфрама. Сначала приведены результаты расчетов проверки на достоверность получаемых решений процесса фторирования вольфрама. Рассмотрено влияние как режимных, так и геометрических параметров реакционной зоны на характер распределения поля скорости, температуры и концентрации ключевого компонента. Представлено влияние режимных параметров на эффективность процесса фторирования. В этом разделе также выполнена проверка на достоверность получаемых решений при моделировании процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом. Проведено исследование влияния режимных и геометрических параметров процесса восстановления на интенсивность протекания химической реакции и распределения основных характеристик течения.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Брендакова Р.В., представляются научно обоснованными и достоверными.

Материал диссертации изложен грамотно и логично, работа оформлена в соответствии с требованиями нормативных документов и по прочтении производит благоприятное впечатление.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

- создана физическая модель процесса фторирования порошка металлического вольфрама потоком элементарного фтора;
- разработана математическая модель процесса фторирования металлического вольфрама с учетом гетерогенной химической реакции;

- получены новые численные результаты распределения переноса импульса, теплоты и вещества в рабочей зоне реактора фторирования;
- сформулирована физическая модель газофазного формирования, которая заключается в осаждении вольфрама из газовой фазы путем процесса восстановления гексафторида вольфрама газообразным водородом;
- записана математическая модель процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом на нагретой подложке;
- получены новые результаты численных исследований по распределению полей ключевых характеристик процесса газофазного формирования в зоне химического реактора.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- на основании результатов выполненных научных исследований была оформлена заявка и получен патент на изобретение «Способ получения вольфрамового изделия послойным нанесением вольфрама и устройство для его осуществления», в список авторов которого входят автор представленной диссертации и его научный руководитель;
- результаты научной исследовательской работы по моделированию технологии фторидного передела вольфрама подтверждаются актом внедрения методики расчета процесса фторидного передела вольфрама применительно к аддитивным технологиям в практическую деятельность научно-технической ассоциации «Порошковая металлургия» г. Москва.

Достоверность результатов исследований подтверждается:

- использованием в математических моделях общепринятых допущений и уравнений Навье-Стокса;
- сеточной сходимостью численного решения задач по распределению компонент вектора скорости, температуры, концентрации ключевого компонента при моделировании процесса фторирования металлического вольфрама и процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом;
- хорошим совпадением результатов тестовых расчетов установившегося течения жидкости в квадратном канале и в кольцевом канале с аналитическими решениями;
- качественным совпадением результатов расчетов, выполненных по созданной математической модели процесса восстановления гексафторида вольфрама с результатами других авторов.

Всего по тематике диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в российском научном журнале, входящем в Web of Science), 13 публикаций в сборниках материалов международных, всероссийских и вузовских научных и научно-практических конференций, семинара, школы конференции (из них 3 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science), 1 патент РФ на изобретение № 2641596 от 18.01.2018 г. «Способ получения вольфрамового изделия послойным нанесением вольфрама и устройство для его осуществления».

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Результаты диссертационной работы Брендакова Р.В. могут быть использованы при разработке новых конструкций аппаратов, модернизации существующих конструкций аппаратов, а также при анализе эффективности отдельных процессов и технологии фторидного передела вольфрама в целом. Анализ проведенных численных исследований показал, что для процесса фторирования и для процесса восстановления можно получить подобные картины протекания соответствующей химической реакции при различных режимных и геометрических параметрах. Это позволяет сократить область поиска оптимальных режимов протекания процесса до одного геометрического размера аппарата, а затем провести масштабный переход до нужных размеров без потери найденной эффективности.

В качестве замечаний к работе можно отметить следующее:

1) процесс фторирования вольфрама рассмотрен в трехмерной постановке, а процесс восстановления гексафторида вольфрама в двумерной постановке задачи, можно было сделать трёхмерную постановку в декартовой системе координат;

2) сформулированные граничные условия на поверхностях реакций в двух процессах, фторирования и восстановления, содержат по две эмпирических константы (k_0 и q_e), которые оставляют возможность влиять на исследуемые процессы;

3) большое количество иллюстрационного материала представляет возможность более глубокого анализа получаемых результатов.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и не влияют на общую положительную оценку результатов работы.

Заключение о работе

Представленная диссертация является завершённой научно-квалификационной работой. Результаты, представленные в диссертации Брендакова Р.В., могут быть полезны при разработке новых устройств для реализации технологии фторидного передела тугоплавких металлов, а также при анализе эффективности и интенсивности как отдельных процессов фторирования или восстановления, так и технологии фторидного передела в целом. Перспективы темы работы связаны с созданием инновационной 3-D технологии аддитивной металлургии. Исследования обладают научной новизной и достоверностью, имеют большую практическую значимость. Основные положения диссертационной работы достаточно полно освещены в научных публикациях автора.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Брендакова Романа Владимировича соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

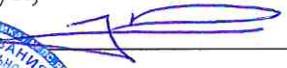
Результаты диссертационной работы Брендакова Р.В. и отзыв на неё рассмотрены, обсуждены и одобрены на заседании кафедры «Электроника и автоматика физических установок» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 23.11.2018, протокол № 18.

Присутствовало на заседании 10 человек профессорско-преподавательского состава. Результаты открытого голосования «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором, заместителем руководителя СТИ НИЯУ МИФИ по научной работе и международной деятельности Носковым Михаилом Дмитриевичем.

Заместитель руководителя СТИ НИЯУ МИФИ
по научной работе и международной деятельности,
доктор физико-математических наук,
профессор



 Носков Михаил Дмитриевич

Руководитель СТИ НИЯУ МИФИ, доцент,
кандидат физико-математических наук

 Карпов Сергей Алексеевич

636036, Россия, г. Северск, пр. Коммунистический, д.65

Тел.: 8 (3823) 780-213

e-mail: MDNoskov@mephi.ru

Кафедра «Электроника и автоматика физических установок»

Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», СТИ НИЯУ МИФИ

636036, Томская область, г. Северск, пр. Коммунистический, 65

Тел.: 8 (3823) 780-204, sssti@mephi.ru

<http://www.ssti.ru/>