

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
на диссертацию Брендакова Романа Владимировича  
**«Моделирование технологии фторидного передела вольфрама»**,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Актуальность темы диссертации.**

Развитие многих отраслей промышленности в значительной степени определяется способностью части элементов конструкции технической системы или устройства работать длительное время в условиях воздействия высокотемпературной и химически активной среды. Так, например, в энергетике эффективность газовых турбин определяется работоспособностью металлов, используемых для изготовления лопаток этих технических систем. Необходимость их воздушного охлаждения и, соответственно, ввода больших объемов относительно холодного воздуха в газовый тракт турбины, обусловлена низкими предельными температурами эксплуатации сталей, используемых в энергетике. Если бы у разработчиков газовых и паровых турбин была возможность использовать вольфрам (или сплавы на его основе) для изготовления лопаток турбин, эффективность работы последних и, соответственно, всей турбины могла быть повышена существенно. Но в настоящее время вольфрам является достаточно дефицитным и дорогостоящим конструкционным материалом не только вследствие малого числа его месторождений, но также и по причине высокой стоимости технологических процессов его получения. В связи с этим совершенствование технологий создания изделий сложной конфигурации из металлического вольфрама с целью существенного снижения затрат на производство является актуальной задачей современности. Совершенствование же таких сложных технологий как фторидного передела вольфрама невозможно эмпирическим путем. Необходимо создание математических моделей (и методов решения соответствующих задач математической физики), описывающих

комплекс взаимосвязанных гидромеханических, теплофизических, диффузионных и термохимических процессов протекающих в специализированных реакторах при реализации технологий фторидного передела вольфрама. В этой связи тема диссертации Р.В. Брендакова, целью которой является разработка математической модели комплекса процессов, протекающих при реализации технологии газофазного фторидного передела металлического вольфрама, соответствует критерию актуальности.

Также можно в дополнение к выше изложенному отметить, что по своим цели, задачам, методам их решения, основным результатам диссертационного исследования и выводам диссертация Р.В. Брендакова соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утвержден указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

#### **Общая характеристика работы.**

Диссертация Р.В. Брендакова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы (56 наименований) и двух приложений. Рукопись диссертации выполнена на 110 страницах, включает 81 рисунок.

Во введении автор очень кратко и почему-то без всяких ссылок на источники пытается обосновать актуальность темы своего диссертационного исследования, излагает цель и задачи диссертации, обосновывает теоретическую и практическую значимость результатов своих исследований, приводит выносимые на защиту положения.

В первой главе автор приводит с использованием всего 12 источников (почему-то использованы только монографии и учебники) анализ современного состояния проблемы газофазных методов переработки тугоплавких металлов и численных методов решения различных технологических задач, аналогичных поставленным в следующих главах автором диссертации.

Во второй главе приведены физическая и математическая постановка задачи фторирования металлического вольфрама и восстановления гексафторида вольфрама водородом. При постановке задачи использовано описание технологии фторидного передела металлического вольфрама в виде замкнутого цикла по фторсодержащим продуктам, разработанной Ю.М. Королевым. Система дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями, описывающая исследуемые в диссертации гидродинамические, теплофизические и термохимические процессы, приведена к безразмерному виду. Рассмотрены два варианта постановки задачи, отличающиеся моделями изменения плотности среды. В этой же главе приведена постановка задачи восстановления гексафторида вольфрама газообразным водородом в рамках двумерного приближения. Система уравнений записана в цилиндрической системе координат.

Третья глава посвящена описанию метода численного решения задач диссертации. Автор использовал неявную двухслойную схему переменных направлений, введенную в практику численного моделирования более пятидесяти лет назад, и хорошо зарекомендовавшую себя при решении сложных задач механики жидкости и газа, а также задач тепломассопереноса.

В четвертой главе приведены результаты выполненного автором численного моделирования процессов переноса, протекающих при реализации технологии фторидного передела вольфрама. В этой же главе представлены результаты тестовых расчетов, выполненных с целью обоснования адекватности сформулированных математических моделей и методов решения задач. При тестировании использованы экспериментальные данные другого автора. Также верификация проведена с использованием известного приближенного решения задачи течения жидкости в канале прямоугольного сечения. Обоснование достоверности результатов численных исследований приведено также на множестве сеток и путем сравнения с результатами аналогичных исследований других авторов. Выполнен численный анализ влияния группы значимых факторов

на распределения основных характеристик исследованных процессов: температур, массовых концентраций компонентов, плотностей и скоростей движения смеси гексафторида вольфрама с водородом в реакторе восстановления.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

#### **Общая методология и методика исследования.**

В процессе решения задач диссертации автор использовал широко распространенный в последние десятилетия подход к моделированию теплофизических процессов в технических системах и при реализации сложных технологий – описание процессов переноса массы, импульса и энергии, а также физико-химических превращений с использованием системы уравнений Навье-Стокса, энергии, диффузии с соответствующими краевыми условиями. Первая задача диссертации сформулирована в пространственной постановке, вторая – в плоской. Используются декартова система координат (первая задача) и цилиндрическая (вторая). Для решения систем нестационарных, нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейными граничными условиями использован метод конечных разностей. Разностные аналоги исходных дифференциальных уравнений решены методом расщепления. При постановке задач диссертации и выборе методов решения автор использовал современные представления, подходы и алгоритмы численного моделирования, используемые при решении нелинейных задач тепломассопереноса и механики вязкой жидкости.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендации, сформулированных в диссертации.**

Автор выполнил большой объем работ по обоснованию достоверности результатов своих численных исследований. Использован практически весь аппарат верификации, применяемый в последние десятилетия при обосновании адекватности результатов численного моделирования теплофизических и тепломассообменных процессов: сравнение результатов решения существенно

менее сложных задач (по сравнению с поставленными в диссертации) с известными аналитическими или приближенными решениями; сопоставление с данными экспериментов других авторов решений, полученных автором диссертации с использованием разработанного им алгоритма задач, адекватных эксперименту; тестирование использовавшихся в диссертации методов и алгоритмов на множестве сгущающихся сеток.

### **Научная новизна полученных результатов.**

Р.В. Брендаков получил ряд результатов, соответствующих критерию новизны. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, являются нижеприведенные:

1. Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса в условиях реализации технологии фторирования порошкообразного металлического вольфрама элементарным фтором, отличающаяся от известных описанием изменения плотности смеси в результате изменения концентрации компонентов вследствие химической реакции взаимодействия между порошком вольфрама и газообразным фтором.
2. Результаты численного моделирования гидромеханических, теплофизических и термохимических процессов в условиях фторирования порошкообразного вольфрама потоком элементарного фтора, которые можно квалифицировать как новое решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для теории и практики фторидного передела металлического вольфрама.
3. Разработана математическая модель процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом на нагретой подложке, отличающаяся от известных описанием изменения химического состава смеси в результате интенсивного взаимодействия гексафторида вольфрама с газообразным водородом и последующего осаждения вольфрама из газовой фазы на нагретой подложке.

4. Результаты решения задачи восстановления тугоплавких металлов (на примере вольфрама) водородом и последующего осаждения металла на нагретой подложке.

#### **Практическая значимость.**

Результаты выполненных Р.В. Брендаковым теоретических исследований создали объективные предпосылки для оформления заявки на получение патента на изобретение «Способ получения вольфрамового изделия послойным нанесением вольфрама и устройство для его осуществления». Практическая значимость результатов диссертационного исследования Р.В. Брендакова также подтверждается актом их использования.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Если ориентироваться на содержание введения, то можно предположить, что автор диссертации сформулировал проблему, цель и задачи исследования не используя ни одного литературного источника. Такой высокий уровень креативного мышления в наше время вряд ли возможен. Скорее всего, автор забыл сослаться на источники, после изучения которых, он сформулировал свои задачи.
2. В первой главе диссертации при анализе современного состояния научного обоснования технологий фторидного передела вольфрама автор использует только монографии, учебники и учебное пособие (всего одиннадцать наименований), хотя хорошо известно, что любые книги отражают состояние исследований в определенной области науки с опозданием на 5-6 лет (не меньше). По-настоящему современные оригинальные научные результаты, как правило, приведены в статьях.
3. Непонятна логика включения патента, разработанного с участием автора диссертации по результатам анализа и обобщения итогов его диссертационного исследования, в обзор работ по тематике диссертации.
4. При постановке задачи (стр. 39, глава 2) на выходе из аппарата задаются условия Неймана для всех искомых функций. Никакого обоснования

выбора этих условий не приводится. В тоже время известны решения большого ряда задач с истечением жидкости из сосудов в аналогичных условиях с применением «мягких» граничных условий для искомых функций.

5. В результате осаждения вольфрама на подложке меняются условия теплообмена на этой границы области решения задачи вследствие ее смещения. Этот фактор в постановке задачи не учитывается, и автор не проводит оценок обоснованности такого приближения. Использование граничного условия второго рода на границе раздела «подложка – газовая среда» вообще не обосновывается, хотя это условие в конечном итоге определяет во многом температуру поверхности реакционной зоны.
6. Заключение диссертации сформулировано в слишком общих выражениях, нет указаний на диапазоны изменения основных значимых факторов, в которых разработанные автором модели применимы.

Значимость для науки и практики полученных в диссертации Р.В. Брендакова результатов, положений и выводов сделанные замечания не снижают. Диссертация Р.В. Брендакова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит результаты теоретических исследований, соответствующие критерию новизны.

Диссертация Р.В. Брендакова соответствует специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована. Диссертация хорошо апробирована. Две статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям.**

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Р.В. Брендакова «Моделирование технологии фторидного передела вольфрама» можно сделать обоснованное заключение о ее соответствии требованиям П.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Роман Владимирович Брендаков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,  
Главный научный сотрудник  
НОЦ И.Н. Бутакова  
Инженерной школы энергетики  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
доктор физико-математических наук  
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая  
теплотехника), профессор

  
10.12.2018

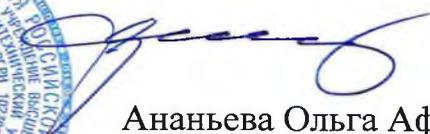
Кузнецов Гений Владимирович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ  
тел.: 8 (3822) 60-63-33,  
[tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru); <http://www.tpu.ru/>  
E-mail: [marisha@tpu.ru](mailto:marisha@tpu.ru)  
тел.: 8(3822)60-62-48

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета



  
Ананьева Ольга Афанасьевна