

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 27 декабря 2018 года публичной защиты диссертации Брендакова Романа Владимировича «Моделирование технологии фторидного передела вольфрама» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

|     |                                                                            |                      |          |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|
| 1.  | Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета | д-р техн. наук       | 01.02.04 |
| 2.  | Пикушак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета   | канд. физ.-мат. наук | 01.02.05 |
| 3.  | Биматов Владимир Исмагилович                                               | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 4.  | Бубенчиков Алексей Михайлович                                              | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 5.  | Бутов Владимир Григорьевич                                                 | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 6.  | Глазунов Анатолий Алексеевич                                               | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 7.  | Глазырин Виктор Парфирьевич                                                | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 8.  | Зелепугин Сергей Алексеевич                                                | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 9.  | Крайнов Алексей Юрьевич                                                    | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 10. | Люкшин Борис Александрович                                                 | д-р техн. наук       | 01.02.04 |
| 11. | Макаров Павел Васильевич                                                   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 12. | Прокофьев Вадим Геннадьевич                                                | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 13. | Скрипняк Владимир Альбертович                                              | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 14. | Старченко Александр Васильевич                                             | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 15. | Тимченко Сергей Викторович                                                 | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 16. | Черепанов Олег Иванович                                                    | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 17. | Шрагер Геннадий Рафаилович                                                 | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 18. | Шрагер Эрнст Рафаилович                                                    | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 19. | Якутенко Владимир Альбертович                                              | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |

**В связи с кончиной председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича заседание провел заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – 1, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Р. В. Брендакову ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,  
созданного на базе федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_**

решение диссертационного совета от 27.12.2018 № 361

О присуждении **Брендакову Роману Владимировичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Моделирование технологии фторидного передела вольфрама»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 23.10.2018 (протокол заседания № 354) диссертационным советом Д 212.267.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Брендаков Роман Владимирович**, 1989 года рождения.

В 2018 году соискатель очно окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» с выдачей диплома об окончании аспирантуры.

В настоящее время не трудоустроен.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной аэромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Шваб Александр Вениаминович**, федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра прикладной аэромеханики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

**Кузнецов Гений Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, главный научный сотрудник

**Козлобродов Александр Николаевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теплогазоснабжения, профессор  
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном **Носковым Михаилом Дмитриевичем** (доктор физико-математических наук, профессор, заместитель руководителя Северского технологического института НИЯУ МИФИ по научной работе и международной деятельности) и **Карповым Сергеем Алексеевичем** (кандидат физико-математических наук, доцент, руководитель Северского технологического института НИЯУ МИФИ), указала, что 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 реакторостроении, 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, молибден, титан, цирконий и др. Диссертационная работа Р. В. Брендакова посвящена 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. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Р. В. Брендакова, представляются научно обоснованными и достоверными. Результаты, представленные в диссертации, 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 связаны с созданием инновационной 3-D технологии аддитивной металлургии. Результаты исследования обладают научно новизной и достоверностью, имеют большую практическую значимость.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 2 работы (из них в российском научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа), в сборниках материалов международных,

всероссийских и вузовских научных и научно-практических конференций, семинара, школы конференции опубликовано 13 работ (из них в сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science, опубликовано 3 работы), патентов на изобретение получено 1. Общий объем публикаций – 3,11 п.л., авторский вклад – 1,21 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные 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:

1. Шваб А. В. Взаимодействие естественной и вынужденной конвекции в технологиях ядерно-топливного цикла / А. В. Шваб, **Р. В. Брендаков**, Е. Д. Завьялов, В. Н. Брендаков // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 53–58. DOI: 10.1134/S2304487X16010132. – 0,37 / 0,12 а.л.

2. Шваб А. В. Моделирование процесса фторирования металлического вольфрама / А. В. Шваб, **Р. В. Брендаков**, А. Ю. Порохнин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2018. – № 53. – С. 116–129. – DOI: 10.17223/19988621/53/11. – 0,85 / 0,30 а.л.

*Web of Science:*

Shvab A.V. Modeling of the process of metallic tungsten fluorination / A. V. Shvab, **R. V. Brendakov**, A.Yu. Porokhnin // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2018. – Vol. 53. – P. 116–129.

*Патент Российской Федерации:*

3. Патент 2641596 Российская Федерация, МПК С23С 16/14, С23С 16/455, В33У 10/00, В33У 30/00, В33У 70/00. Способ получения вольфрамового изделия послойным нанесением вольфрама и устройство для его осуществления /

Брендаков В. Н. (RU), Демиденко А. А. (RU), Шваб А. В. (RU), Евсеев Н. С. (RU), **Брендаков Р. В.** (RU); патентообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2016121202; заявл. 30.05.2016, опубл. 18.01.2018, Бюлл. № 2. – 12 с.

На автореферат поступило 6 положительных отзыва. Отзывы представили:

1. **Ш. Р. Садретдинов**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Отдела моделирования ОАО «ТомскНИПИнефть», *без замечаний*.
2. **Г. Г. Абрамов**, канд. техн. наук, заместитель технического директора АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, *без замечаний*.
3. **Ж. В. Еремеева**, д-р техн. наук, профессор кафедры порошковая металлургия и функциональные покрытия Национального исследовательского технологического университета МИСиС, г. Москва, *без замечаний*.
4. **В. В. Русаков**, канд. физ.-мат. наук, инженер по разработке программного обеспечения Российского филиала компании «Ментор Графика Сервисес Лимитед», г. Москва, *без замечаний*.
5. **И. Е. Смолович**, канд. техн. наук, инженер-технолог 1 категории, АО «Корпорация «МИТ», г. Москва, *с замечанием* о наличии опечаток в автореферате.
6. **Н. Д. Якимов**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета, **А. В. Дмитриев**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета, *с замечаниями*:
  - 1) В автореферате (в частности на стр. 11): «Для безразмерной температуры используется граничное условие второго рода  $\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z}\right)_w = q_e$ », где «значение  $q_e$  определяется из экспериментальных значений», что свидетельствует, что данный параметр считается заданным. Скорее всего, необходимо дополнительное уравнение, связывающее  $q_e$  с тепловыделением химической реакции. Подобный вопрос возникает и по «граничному условию второго рода» для температуры подложки на стр. 16, строка 1 св., где  $q_w$  и  $q_\varepsilon$  считаются заданными. Но ведь  $q_\varepsilon$  должна определяться искомой интенсивностью реакции. Также можно заметить, что в такие граничные условия (пусть в размерной форме) должна входить теплопроводность газа, которая, в принципе, может меняться с концентрацией и температурой.
  - 2) По приведенному описанию модели на стр. 9 и далее неясно, учитывалось (и если да, то как) влияние температуры, например, на

вязкость схемы. 3) Называть используемую математическую модель, где не везде учитывается переменность плотности, «моделью несжимаемой жидкости» (стр. 20, строки 1 сн. и 6 сн.), думается, неверно. Ведь переменность плотности в более общей «физической модели» связана не со сжимаемостью, а с различием концентрации компонентов (как сказано на стр. 9, строка 9 св. и на стр. 13).

В отзывах отмечается, что расширяющееся применение высокотемпературных процессов в современной технике неразрывно связано с использованием разнообразных изделий из вольфрама, имеющего температуру плавления более 3400 °С. Наиболее перспективным направлением развития производства вольфрама, способным обеспечить все возрастающие требования современной промышленности, является реализация фторидного передела вольфрама, который позволяет создать замкнутый технологический цикл с кругооборотом всех используемых реагентов без образования складированных отходов, отвечающий всем экологическим требованиям. В этой связи разработка принципов математического моделирования процессов, фторидного передела в технологии вольфрама, позволяющего значительно повысить эффективность используемой технологии является крайне актуальным и своевременным. В диссертационной работе Р. В. Брендакова представлены методики математического моделирования двух основных процессов, лежащих в основе фторидного передела в технологии вольфрама: синтез гексафторида вольфрама путем фторирования металлического порошка газообразным фтором; восстановление полученного гексафторида вольфрама водородом на нагретой поверхности. В каждой из представленных методик учтено протекание гетерогенных химических реакций, сопровождающееся изменением объема газовой смеси, а также переменность плотности многокомпонентной смеси газов находящейся в реакторе, вследствие изменения концентрации основных компонентов. Научная новизна работы заключается в создании математических моделей, описывающих процессы фторирования металлического вольфрама и восстановления гексафторида вольфрама водородом до металлического вольфрама. В результате численных исследований получены закономерности изменения ключевых характеристик указанных процессов в соответствующих реакторах в зависимости от параметров

их осуществления. Разработанные математические модели адекватно описывают имеющиеся экспериментальные данные и могут быть использованы для оптимизации используемого оборудования и параметров процессов без проведения многочисленных и дорогостоящих экспериментов. Результаты исследования могут также найти применение при разработке новых способов и конструкций аппаратов технологии фторидного передела тугоплавких металлов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **Г. В. Кузнецов** – известный специалист в области численного исследования теплофизических процессов в многофазной среде, компьютерного моделирования термогравитационной турбулентной конвекции; **А. Н. Козлобродов** – известный специалист в области численных исследований закономерностей поведения высоковязких полимерных материалов, термического анализа энергосберегающих структур и их теплозащитных свойств; **Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»** известен своими достижениями в области разработки фторидных технологий переработки редкоземельных металлов, моделирования неравновесных процессов в сложных нелинейных системах, приборов и методов контроля параметров технологических процессов АСУ ТП и АСУП, а именно разработкой математических моделей, алгоритмов и программных комплексов для атомной промышленности, а также химических технологий по тематике атомной промышленности.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*разработана* математическая модель процесса фторирования металлического вольфрама с учетом гетерогенного характера химической реакции;

*разработана* математическая модель процесса восстановления гексафторида вольфрама водородом на нагретой подложке;

*получены* результаты численного моделирования распределения переноса импульса, теплоты и вещества в рабочей зоне реактора фторирования;

*получены* результаты численного расчета по распределению полей ключевых характеристик процесса газофазного формования в зоне химического реактора.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*созданная* оригинальная физико-математическая модель технологии фторидного передела металлического вольфрама позволяет оценить эффективность процессов фторирования вольфрама и восстановления гексафторида вольфрама водородом;

*полученные* с помощью созданной модели результаты позволяют более полно понять физику рассматриваемого явления;

*полученные* численные результаты расчетов двухкомпонентных газовых потоков могут быть использованы при исследовании процессов фторирования и восстановления тугоплавких металлов, а также могут быть полезны при разработке новых технологий и конструкций аппаратов фторидного передела тугоплавких металлов.

*полученные* в диссертации численные результаты могут быть применены при моделировании установившегося течения закрученного потока двухкомпонентной смеси газов переменной плотности.

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:**

практическая значимость работы заключается в том, что разработанные математические модели адекватно описывают имеющиеся экспериментальные данные, что позволяет использовать их для оптимизации используемого оборудования и параметров процессов без проведения многочисленных и дорогостоящих экспериментов;

полученные результаты научно-исследовательской работы по моделированию технологии фторидного передела вольфрама имеют практическую значимость, что подтверждается актом внедрения методики расчета процесса фторидного передела вольфрама применительно к аддитивным технологиям в практическую деятельность научно-технической ассоциации «Порошковая металлургия», г. Москва;

полученные результаты выполненных научных исследований способствовали оформлению заявки и получению патента на изобретение «Способ получения вольфрамового изделия послойным нанесением вольфрама и устройство для его осуществления» № 2641596 от 18.01.2018 г.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Полученные теоретические результаты по моделированию технологии фторидного передела вольфрама могут найти применение в исследованиях по фторидному переделу тугоплавких металлов, проводимых в различных научных и учебных заведениях, таких как Институт прикладной механики РАН (г. Москва), Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва), Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск), Алтайский государственный университет (г. Барнаул), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (г. Барнаул), Бурятский государственный университет (г. Улан-Удэ) и других организациях, а также могут использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов в области теплофизики и теоретической теплотехники.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Работоспособность модели и достоверность полученных результатов подтверждается применением апробированных вычислительных методов, проведением тестовых расчетов, сравнением результатов расчетов с аналитическим решением и известными экспериментальными данными, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в том, что создана физическая модель процесса фторирования порошка металлического вольфрама потоком элементного фтора; разработана математическая модель процесса фторирования металлического вольфрама с учетом гетерогенной реакции; получены новые численные результаты распределения переноса импульса, тепла и вещества в рабочей зоне реактора фторирования; сформулирована физическая модель газофазного формования, которая заключается в осаждении вольфрама из газовой

фазы путем процесса восстановления гексафторида вольфрама газообразным водородом; создана 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.

**Личный вклад соискателя состоит в:** самостоятельном решении всех поставленных задач, проведение обзора научно-технической литературы, касающейся темы диссертации, проведение численного моделирования и выполнения анализа полученных данных; совместно с научным руководителем были сформулированы цели и основные положения диссертационного исследования, проведено обсуждение результатов, полученных в работе.

Диссертация удовлетворяет критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи газофазной металлургии вольфрама, численного моделирования теплофизических процессов в технике, имеющей значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 27.12.2018 диссертационный совет принял решение присудить **Брендакову Р. В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – 1, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Пикушак Елизавета Владимировна

27.12.2018