

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 20 декабря 2019 года публичной защиты диссертации Картавых Андрея Александровича «Моделирование низкотемпературного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

- | | |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,
председатель диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 5. Биматов В.И., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.02.05 |
| 6. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 7. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 8. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 9. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 10. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 11. Люкшин Б. А., доктор технических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 12. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 13. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 14. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 15. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 16. Старченко А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 17. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 18. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 19. Якутенок В. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |

Заседание провёл председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Шрагер Геннадий Рафаилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить А. А. Картавых учёную 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 20.12.2019 № 406

О присуждении **Картавых Андрею Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Моделирование низкотемпературного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей»** по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 14.10.2019 (протокол заседания № 389) диссертационным советом **Д 212.267.13**, созданным 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 **Картавых Андрей Александрович**, 1984 года рождения.

В 2006 г. соискатель окончил федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северская государственная технологическая академия».

В 2019 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера-механика на участке эксплуатации механического оборудования Завода разделения изотопов в Акционерном обществе «Сибирский химический комбинат».

Диссертация выполнена на кафедре математической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и на Заводе разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский химический комбинат».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Крайнов Алексей Юрьевич, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра математической физики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Лежнин Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория проблем теплопереноса, 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 и инженерных систем в строительстве, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**», г. Томск, в своем положительном отзыве, подписанном **Орловым Алексеем Алексеевичем** (доктор технических наук, Отделение ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, профессор) и **Вергуном Анатолием Павловичем** (доктор физико-математических наук, Отделение ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий, профессор), указала, что в работе решена актуальная задача теоретического и экспериментального обоснования возможности замещения жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей при

фракционном разделении газовых смесей на Заводе разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский химический комбинат», холодным воздухом, расчета и проектирования нового теплотехнического оборудования, применяемого в технологии разделения изотопов. Получены следующие новые результаты: экспериментально доказана возможность фракционного разделения газовой смеси HF и UF_6 при десублимации ее в одной емкости и последующей сублимации, путем термостатирования емкости при разных температурах; доказана возможность и эффективность замены жидкого азота холодным воздухом для проведения фракционной очистки на производстве по разделению изотопов урана. Исследование автора расширяет представление о процессах теплообмена, протекающих при десублимации газообразных веществ на производствах по разделению изотопов урана. Предложенные методики и созданные экспериментальные стенды можно использовать для проведения исследований физических свойств газообразных веществ при криогенных температурах. Внедрение разработанных соискателем научно обоснованных решений вносит вклад в повышение энергоэффективности производства по обогащению урана на Заводе разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский химический комбинат».

Соискатель имеет 18 работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 18 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы (из них в российском научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа, в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Web of Science, опубликована 1 работа), в прочем научном журнале опубликована 1 работа, в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций опубликовано 12 работ; получены 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследования включены в отчет по НИР. Общий объем публикаций – 3,95 а.л., авторский вклад – 1,85 а.л.

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

Наиболее значимые 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. Картавых А. А. Оценка влияния откачивания газовой смеси на процесс десублимации HF / А. А. Картавых, И. М. Васенин, С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, М. В. Чуканов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 2/2. – С. 95–98. – 0,25 / 0,05 а.л.

2. Картавых А. А. Оценка влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации фтористого водорода / А. А. Картавых, С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 46. – С. 70–75. – DOI: 10.17223/19988621/46/9. – 0,38 / 0,13 а.л.

Web of Science: Kartavykh A. A. Estimation of the effect of non-condensable gases on the process of hydrogen fluoride desublimation / A. A. Kartavykh, S. M. Gubanov, A. Yu. Krainov // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2017. – № 46. – P. 70–75.

3. Картавых А. А. Экспериментальное моделирование способа воздушного охлаждения в процессе разделения газовых смесей / А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 6. – С. 1457–1462. – 0,38 / 0,19 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Kartavykh A. A. Experimental modeling of the method of air cooling in the process of gas mixture separation / A. A. Kartavykh, A. Y. Krainov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol. 91, № 6. – P. 1385–1390. – DOI: 10.1007/s10891-018-1872-2.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:
1. **В. В. Иванов**, главный эксперт Департамента по развитию технологии и производств РСК АО «ТВЭЛ», г. Москва, *с замечанием*: несоответствие состояния емкостей на рисунках 5.1 и 5.20. На рисунке 5.1 из 24 емкостей 12 находятся в работе и 12 в состоянии резерва, а на рисунке 5.20 из этих же 24 емкостей в работе

находятся 11 ёмкостей и 13 в состоянии резерва. 2. **А. И. Сафронов**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Тольяттинского государственного университета, г. Тольятти, *с замечаниями*: из автореферата не ясно, как проводилось исследование на сходимость численного решения; из автореферата не ясно, почему на рис. 10 а) б) в) начальные расчётные температуры для кривых 1 и 2 разные. 3. **В. Л. Софронов**, д-р техн. наук, профессор кафедры «ХиТМСЭ» Северского технологического института Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», *с замечаниями*: в разделе 1.3 главы 1 принят массовый расход газовой смеси, поступающей в первую осадительную ёмкость равный 1 кг/сутки. При этом в таблицах 1.2 и 1.3 приведены другие величины расходов, не соответствующие расходу 1 кг/сутки; исходя из методики проведения экспериментальной работы по определению величины проскока HF через осадительную ёмкость, один цикл занимал довольно продолжительное время. Каким образом учитывалось неизбежное натекание воздуха в опытный стенд, которое будет вносить погрешность в результаты работ? 4. **Ю. Ю. Луценко**, д-р физ.-мат. наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечанием*: необходимо отметить, что при использовании предложенной автором диссертационной работы двухступенчатой схемы воздушного охлаждения, наряду с уменьшением длины коммуникаций, также возрастает число операций в технологическом процессе. 5. **Е. В. Беспала**, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения вывода из эксплуатации производств Горно-химического комбината, г. Железногорск, *с замечаниями*: на стр. 16 сказано, что расчёт газодинамических процессов течения холодного воздуха и теплообмена со стенкой ёмкости проводился с помощью программы для ЭВМ. Однако не приводятся используемые для расчёта уравнения, граничные условия. Более того, из графиков, представленных на рисунках 7-10, не ясно какая решалась задача: стационарная или нестационарная? Косвенно по описанию можно судить, что использовалось нестационарное уравнение теплопереноса. Кроме того, следовало бы указать на использование уравнения Навье-Стокса или аргументированно обосновать отсутствие

необходимости его использования; при проведении математического моделирования следовало бы указать точность расчёта, шаг и геометрию расчётной сетки, а также метод решения системы дифференциальных уравнений (если использовались численные методы); в таблицах необходимо было привести погрешность измерений, выводы 7 и 8 не соответствуют положениям, выносимым на защиту. Кроме того, они кажутся излишними и преувеличенными; в тексте автореферата встречаются орфографические ошибки и опечатки; не приведен учёт процессов образования фтористого водорода HF и других продуктов реакции (например, UO_2F_2) при взаимодействии ГФУ с атмосферным воздухом (химические превращения и фазовые переходы с выделением или поглощением тепла). В дальнейших исследованиях и при математическом моделировании следует учитывать данный процесс, поскольку он напрямую влияет на массовый и тепловой баланс системы, а также на эффективность очистки целевого продукта.

В отзывах отмечается, что проведенные А. А. Картавых исследования, носят важный фундаментальный характер и направлены на решение актуальной задачи, повышению энергоэффективности производства по обогащению урана в части снижения затрат на эксплуатацию установок фракционного разделения газовых смесей путем использования охлажденного воздуха вместо жидкого азота. Соискателем теоретически и экспериментально обоснована возможность замещения жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей в схеме фракционного разделения газовых смесей Завода разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский химический комбинат», холодным воздухом, генерируемым воздушно-холодильной машиной ВХМ-0,54/0,6. Автором предложена централизованная схема воздушного охлаждения с применением воздушно-холодильной машиной ВХМ-0,54/0,6.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **С. И. Лежнин** является известным специалистом в области нестационарных процессов в многофазных средах, протекающих при фазовых превращениях, процессах теплообмена в одно- и двухфазных средах, нейтронно-физических процессах в гибридных энергетических системах; **А. Н. Козлобродов** является известным специалистом в численном исследовании

закономерностей поведения неизотермических высоковязких полимерных материалов, термическом анализе энергосберегающих структур и их теплозащитных свойств; **Национальный исследовательский Томский политехнический университет** известен своими достижениями в области совершенствования оборудования и режимов работы источников энергоснабжения в составе энергосистем; исследования гидродинамических и тепло-массообменных процессов, комплексных исследований свойств новых материалов; разработке систем контроля и управления теплотехническими процессами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

определены необходимые теплофизические условия для эффективного улавливания гексафторида урана и фтористого водорода из газовой смеси при ее протекании через охлаждаемые холодным воздухом осадительные емкости;

установлено, что при охлаждении осадительных емкостей холодным воздухом с температурой не выше 137 К наличие неконденсируемых примесей не оказывает влияние на процесс десублимации фтористого водорода;

определены холодильные мощности для охлаждения системы емкостей предназначенных для улавливания гексафторида урана и фтористого водорода из газовой смеси;

подтверждена экспериментальными исследованиями возможность организации технологии фракционного разделения газовых смесей (гексафторида урана и фтористого водорода) с десублимацией потока газовой смеси в одной емкости при температуре 137 К и ниже с последующей сублимацией веществ при ступенчатом повышении температуры.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

проведено теоретическое и экспериментальное моделирование процессов теплообмена в системе охлаждения емкостей, предназначенных для десублимации фтористого водорода, позволившее определить параметры процесса, обеспечивающие эффективную очистку газовой смеси от примесей;

получены новые знания о свойствах газовых смесей при низких температурах и в области низких давлений;

проведена валидация используемой математической модели для расчета термостатирования осадительных емкостей на основе сравнения экспериментально полученных данных и рассчитанных по математической модели.

доказана экспериментально-теоретическим путем возможность замены жидкого азота холодным воздухом для охлаждения емкостей для десублимации фтористого водорода в производстве по разделению изотопов урана;

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

разработан и обоснован способ воздушного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей Завода разделения изотопов;

показано, что применение воздушного охлаждения взамен жидкого азота обеспечивает необходимую степень очистки газовой смеси от гексафторида урана и фтористого водорода.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационной работы А. А. Картавых могут быть использованы в Акционерном обществе «Уральский электрохимический комбинат» (г. Новоуральск, Свердловская область), в Акционерном обществе «Производственное объединение Электрохимический завод» (г. Зеленогорск, Красноярский край), в Акционерном обществе «Сибирский химический комбинат» (г. Северск, Томская область), в Акционерном обществе «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск, Иркутская область) для повышения энергоэффективности работы этих предприятий за счет замены жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей при фракционном разделении газовых смесей, на холодный воздух. Кроме того, могут быть использованы в Национальном исследовательском ядерном университете «Московский инженерно-физический институт», в Уральском федеральном университете (г. Екатеринбург), в Национальном исследовательском Томском политехническом университете и Национальном исследовательском Томском государственном университете при подготовке специалистов в области разделения изотопов, очистки веществ и математического моделирования данных процессов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

использованы классические методы термодинамических расчетов; математические модели расчета теплообмена в разветвленной сети трубопроводов, ранее апробированные на решении подобных задач;

проведено исследование сеточной сходимости результатов расчетов;

использованы апробированные экспериментальные методики и сертифицированное измерительное оборудование;

использованы классические методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что экспериментально доказана возможность фракционного разделения газовой смеси фтористого водорода и гексафторида урана с десублимацией ее в одной емкости и последующей сублимацией, путем термостатирования при разных температурных уровнях; доказана возможность замены жидкого азота холодным воздухом для охлаждения емкостей в производстве по разделению изотопов урана. При охлаждении холодным воздухом обеспечивается необходимая степень очистки газовой смеси от легких примесей.

Личный вклад соискателя состоит в: участии в постановке задач исследований, уточнении физико-математической модели газодинамических процессов течения охлажденного воздуха в трубопроводной системе и теплообмена со стенками емкостей и трубопроводов, самостоятельной разработке методики проведения экспериментальных работ и получении результатов, разработке схемы централизованной системы воздушного охлаждения емкостей с применением воздушной холодильной машины ВХМ-0,54/0,6, в подготовке совместно с научным руководителем публикаций по выполненной работе и формулировке выводов и положений, выносимых на защиту.

Диссертация отвечает 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 обоснования возможности воздушного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых

смесей, взамен охлаждения жидким азотом. С использованием физического и теоретического моделирования получены новые результаты и знания о процессах тепло- и массообмена при десублимации и сублимации веществ, имеющие значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 20.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Картавых А.А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета



Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Пикуцак Елизавета Владимировна

20.12.2019