

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):  
02069303,  
Company Number: 027000890168,  
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, BIC 046902001

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 046902001

21.11.2019 № 01/8902

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и  
инновациям НИ ТПУ, д.х.н.

М.С. Юсубов

«21» ноября 2019 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Картавых Андрея Александровича «Моделирование низкотемпературного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация А.А. Картавых посвящена повышению энергоэффективности производства по обогащению урана на Заводе разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» (ЗРИ АО «СХК») в части снижения затрат на эксплуатацию установок фракционного разделения газовых смесей путем использования охлажденного воздуха вместо жидкого азота. Жидкий азот имеет высокую стоимость. За год на установке К-09 участка конденсационно-испарительных установок для охлаждения емкостей используется более 650 тонн жидкого азота. В связи с этим, задача по замене хладагента становится весьма актуальной, поскольку замещение жидкого азота холодным воздухом позволит значительно снизить затраты на эксплуатацию установки фракционного разделения газовых смесей, на криогенную систему хранения и транспортировки жидкого азота, а также позволит автоматизировать процесс охлаждения емкостей.

В качестве источника холодного воздуха Картавых А.А. предлагает применять турбодетандерную воздушно-холодильную машину ВХМ-0,54/0,6.

Целью диссертации является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности замещения жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей при фракционном разделении газовых смесей ЗРИ АО «СХК», холодным воздухом.

Во введении диссертации сформулирована актуальность темы, цель работы, ее практическая ценность, научная новизна, приведено краткое содержание диссертации.

**В первой главе** диссертации представлен анализ работы установки фракционного разделения ЗРИ АО «СХК». Рассмотрены режимы работы коллекторов установки К-09, откачной системы и узла защиты вакуумных насосов. Уточнены средние величины потоков газовых смесей, поступающих на чистку технологических коллекторов установки К-09, определен состав, и соотношение основных компонентов газовой смеси.

Проведен сравнительный анализ затрат на эксплуатацию схемы фракционного разделения с применением в качестве хладоносителя жидкого азота и холодного воздуха для охлаждения емкостей.

Приведен литературный обзор и анализ подходов к математическому моделированию процессов тепло- массообмена при десублимации компонентов газовых смесей.

**Во второй главе** диссертации приведены результаты исследования процессов тепло- массообмена, протекающие в емкости при ее охлаждении жидким азотом и холодным воздухом. Показано, что концентрация компонента газовой смеси на выходе из емкости будет определяться только давлением его насыщенного пара при температуре охлаждения стенки емкости. Расчетно-экспериментальным путем определена температура охлаждения емкости, при которой обеспечиваются допустимые концентрации основных компонентов газовой смеси.

Проведены успешные промышленные испытания криогенного оборудования на предмет достижения требуемой температуры охлаждения емкости.

**В третьей главе** диссертации представлены результаты экспериментальных исследований по определению величины проскока фтористого водорода через емкость, охлаждаемую холодным воздухом и оценке влияния присутствия неконденсируемых примесей на процесс десублимации фтористого водорода. Установлено, что величина проскока HF составляет менее 1% от общего количества газовой смеси на входе в емкость. Наличие неконденсируемых примесей при воздушном охлаждении не оказывает влияния на процесс десублимации фтористого водорода. Предложена схема воздушного охлаждения осадительных емкостей на установке К-09.

Приведено описание предложенной Картавых А.А. схемы фракционного разделения газовых смесей в две ступени с двумя независимыми контурами охлаждения, взамен существующей трехступенной и результаты ее испытания в производственных условиях. Показана ее работоспособность и преимущество по сравнению с трехступенной схемой фракционной очистки.

**В четвертой главе** диссертации представлены результаты опытно-промышленной эксплуатации воздушно-холодильной машины ВХМ-0,54/0,6 на установке К-09.

Установлено, что при охлаждении емкости воздухом с температурой 133 К обеспечивается требуемая очистка газовой смеси от проскоков гексафторида урана, с предыдущей ступени фракционного разделения и от фтористого водорода.

**В пятой главе** представлены результаты численных исследований процесса теплообмена в воздушных теплообменниках осадительных емкостей установки К-09 при использовании воздушно-холодильной машины.

Определены: мощность холодильных машин, необходимая для охлаждения всех емкостей установки К-09, наиболее рациональное их расположение в производственном помещении, время охлаждения емкостей до температуры 133 К.

Разработана схема воздушного охлаждения технологических точек установки К-09 и выданы исходные данные на разработку ее чертежно-технической документации.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

**Новизна результатов проведенных исследований.**

В диссертационной работе Картавых А.А. получены следующие новые результаты.

1. Экспериментально доказана возможность фракционного разделения газовой смеси  $\text{HF}$  и  $\text{UF}_6$  при десублимации ее в одной емкости и последующей сублимации, путем термостатирования емкости при разных температурах.

2. Определена эффективность улавливания  $\text{UF}_6$  и легких примесей из технологических потоков ЗРИ АО «СХК» в емкости, охлаждаемые холодным воздухом с температурой 133 К, которая составляет не менее 93,7 % от общего массового расхода газовой смеси.

3. Доказана возможность и эффективность замены жидкого азота холодным воздухом для проведения фракционной очистки на производстве по разделению изотопов урана.

**Обоснованность и достоверность** обеспечивается применением в исследованиях апробированных экспериментальных методик и современного сертифицированного оборудования, использованием классических методов термодинамических расчетов и статистической обработки экспериментальных данных, верификацией используемых математических моделей, хорошей сходимостью полученных теоретических результатов с экспериментальными данными.

**Конкретные рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы Картавых А.А. могут быть использованы в Акционерном обществе «Уральский электрохимический комбинат» (г. Новоуральск Свердловской области), в Акционерном обществе «Производственное объединение Электрохимический завод» (г. Зеленогорск Красноярского края), в Акционерном обществе «Сибирский химический комбинат» (г. Северск Томской области), в Акционерном обществе «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск Иркутской области) для

повышения энергоэффективности работы этих предприятий за счет замены жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей при фракционном разделении газовых смесей, на воздух.

Кроме того, они могут быть использованы в Национальном исследовательском ядерном университете «Московский инженерно-физический институт» (г. Москва), в Уральском федеральном университете (г. Екатеринбург), в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (г. Томск) и Томском государственном университете (г. Томск) при подготовке специалистов в области разделения изотопов, очистки веществ и математического моделирования данных процессов.

### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.**

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.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность замещения жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей установки К-09 фракционного разделения газовых смесей ЗРИ АО «СХК», холодным воздухом, генерируемым воздушно-холодильной машиной ВХМ-0,54/0,6. Получены исходные данные на разработку чертежно-технической документации системы воздушного охлаждения технологических точек установки К-09.

Предложенная автором система воздушного охлаждения технологических точек с применением ВХМ-0,54/0,6 может быть применена на других разделительных предприятиях Российской Федерации.

Основные результаты, представленные в диссертации, **опубликованы** в 18 работах, в том числе 3 статьях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, 12 публикациях в материалах научных конференций различного уровня, 1 свидетельстве на программу для ЭВМ, 1 патенте на изобретение, 1 отчете о НИР.

**Автореферат** по содержанию и выводам соответствует диссертации.

По материалам и результатам, представленным в диссертации, имеются замечания:

1. Программа для ЭВМ, зарегистрированная в «Роспатенте», указанная в пункте «Степень достоверности результатов исследования», не является обоснованием достоверности полученных результатов, а лишь закрепляет авторские права.

2. Автору следовало бы указать не одно предельное значение температуры охлаждения емкостей воздухом (137 К), а интервал температур, в котором целесообразно проводить процесс фракционного разделения газовых смесей (например, 132...137 К). Это очевидно из приведенных далее результатов.

3. В диссертации и автореферате не приведено описание используемой при численных исследованиях процесса теплообмена в воздушных теплообменниках осадительных емкостей математической модели. Ничего не сказано об ее адекватности и погрешности определения параметров (отклонение расчетных и экспериментальных данных).

4. Нет обоснования выбора массового расхода газовой смеси, поступающей в первую осадительную емкость (1 кг/сутки). В таблицах 1.2 и 1.3 диссертации приведены совершенно другие величины расходов. Учитывая значительный разброс величины расхода веществ на коллекторах установки К-09, следовало бы провести эксперимент при их различных значениях во всем указанном диапазоне.

5. Не сделана оценка затрат, связанных с переходом на воздушное охлаждение с применением ВХМ–0,54/0,6.

6. Не приведено сравнение величины проскока легких примесей через емкости, охлаждаемые жидким азотом и воздухом.

7. В пункте 3 заключения указано, что полученные величины проскоков являются допустимыми для химической поглотительной установки, но не приведена количественная оценка увеличения ее нагрузки.

8. В тексте диссертации и автореферата используются несистемные единицы измерения величин (грамм, минуты, часы, сутки).

9. Часть литературных источников, использованных в диссертации, не является общедоступной (например, источник № 12 «График замены поглотителей на коллекторах 2019 г.» № 11-40/42-07/4137-ВК от 22.01.2019 г.).

10. Автором использован не особо удачный стиль изложения материала. Большое количество аббревиатуры в тексте, что затрудняет его восприятие. В автореферате и диссертации имеются опечатки, грамматические ошибки, используются жаргонизмы (например, испытываются, нулевка).

### **Заключение**

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Исследования проведены на хорошем научном уровне, положения и выводы диссертации обоснованы.

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Оформление диссертации в целом отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертационная работа А.А. Картавых является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача теоретического и экспериментального обоснования возможности замещения жидкого азота, используемого для охлаждения емкостей при фракционном разделении газовых смесей ЗРИ АО «СХК», холодным воздухом, расчета и проектирования нового теплотехнического оборудования, применяемого в технологии разделения изотопов, соответствует специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по физико-математическим наукам.

Внедрение разработанных диссертантом научно обоснованных решений вносит вклад в повышение энергоэффективности производства по обогащению урана на ЗРИ АО «СХК».

На основании изложенного считаем, что диссертация Картавых А.А. «Моделирование низкотемпературного охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей» является законченным научным исследованием и соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ, 24.09.2013). Автор диссертации Картавых Андрея Александровича заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсужден на научном семинаре Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» "14" ноября 2019 г, протокол № 20.

Профессор Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук

Анатолий Павлович Вергун

Профессор Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор технических наук

Алексей Алексеевич Орлов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ), 634050, г. Томск, пр. Советский, 30, НИ ТПУ, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru), [tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru)

Подписи А.П. Вергуна и А.А. Орлова удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ

О.А. Ананьева



Я, Вергун Анатолий Павлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Картавых Андрея Александровича, и их дальнейшую обработку.

Я, Орлов Алексей Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Картавых Андрея Александровича, и их дальнейшую обработку.