Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Физико-технический факультет
Кафедра математической физики

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
_____ А.Ю. Крайнов
«_____»_____2019 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы (диссертации)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

по основной образовательной программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

направление подготовки 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Картавых Андрей Александрович

Научный руководитель
д-р. ф.-м. наук, профессор
_____А.Ю. Крайнов
«_____»_____2019 г.

Автор работы
аспирант
_____А.А. Картавых

Томск-2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одна из основных задач инновационного развития предприятий Госкорпорации «Росатом» – повышение конкурентоспособности продукции и услуг на атомных энергетических рынках за счет модернизации существующих технологий и технического перевооружения производственных мощностей. Необходимым условием развития ядерно-энергетической системы, отвечающей принципам безопасности и устойчивого развития, является совершенствование имеющихся и внедрение новых инновационных технологий.

Изотоп урана — U^{235} представляет собой важнейшую часть топлива, которое используется в ядерных реакторах. На топливе, обогащенном изотопом U^{235}, работает большинство современных энергетических реакторов. Наиболее эффективным и распространенным способом обогащения урана по изотопу U^{235} в настоящее время является газоцентрифужный метод.

В технологии обогащения урана газоцентрифужным методом большое внимание уделяется содержанию примесей U^{235} не только в конечном продукте, но также и на промежуточных стадиях обогащения. На стадии производства ядерного топлива в качестве сырьевого продукта используется гексафторид урана UF_6 (ГФУ), в котором присутствуют разнообразные примеси, молекулярная масса которых меньше массы ГФУ (так называемые легкие примеси): фториды, оксифториды и оксиды различных металлов и неметаллов, а также компоненты воздуха. Содержание фтористого водорода (HF) в ГФУ значительно превышает суммарное содержание других примесей, HF является основной примесью ГФУ. Содержание HF оказывает влияние не только на разделяющую способность газовых центрифуг, но и на их долговечность.

На Заводе разделения изотопов Акционерного общества «Сибирский Химический Комбинат» (ЗРИ АО «СХК») доочистка сырьевого ГФУ, поступающего с Сублиматного производства от HF и других легких примесей ведется путем трехступенчатого фракционного разделения и чистки на очистительных каскадах блоков газодиффузионных машин.

Процесс фракционного разделения газовых смесей на ЗРИ организован на объединённом участке конденсационно-испарительных установок (ОУ КИУ) и производится в три ступени в термостатированных емкостях, размещенных в сосудах охлаждения, режим охлаждения которых по температуре различен. Процесс очистки и конденсации технологических потоков осуществляется на трех температурных уровнях: 253 К, 193 К, 77 К.

Так на установке К-09 ОУ КИУ охлаждение ёмкостей до температуры 77 К производится с помощью жидкого азота. В осадительных емкостях (ОС) установки К-09 ОУ КИУ из потока газовой смеси, поступающей с предыдущей технологической ступени, улавливаются легкие примеси и проскоки ГФУ.

Жидкий азот заливается персоналом вручную в каждый сосуд охлаждения дважды в смену из переносных сосудов Дьюара. С учетом значительных объемов потребления жидкого азота для охлаждения ОС на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ, задача по изменению способа охлаждения ОС становится весьма актуальной.

В настоящей работе оцениваются перспективы организации охлаждения ОС на установке К-09 ОУ КИУ с применением в качестве хладоносителя холодного воздуха взамен жидкого азота.

К рассмотрению в качестве источников холодного воздуха были приняты агрегаты, работающие на газах близких по характеристикам к воздуху. Наиболее приемлемым вариантом

явился турбодетандерный агрегат, входящий в состав установки по производству жидкого гелия (производитель ОАО НПО «Гелиймаш» г. Москва).

На ЗРИ АО «СХК» разработан и успешно внедрен способ охлаждения промежуточных емкостей (ПЕ) до температуры 193 К с использованием холодного воздуха. Холодный воздух с температурой 193 К генерирует воздушно-холодильная машина ВХМ-0,54/0,6 (ВХМ) на базе турбодетандерного агрегата. Для обеспечения работы ВХМ используется схема очистки и осушки сжатого воздуха с применением цеолитов до точки росы 200 К.

В этой связи рассматривается возможность использования холодного воздуха, генерируемого ВХМ для охлаждения ОС, предназначенных для улавливания HF, взамен жидкого азота.

Целью диссертации является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности замещения жидкого азота холодным воздухом для охлаждения ОС на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ АО «СХК».

В рамках достижения цели диссертации решались следующие задачи:

1. Расчетно-экспериментальным путем определить эффективный температурный уровень охлаждения ОС, при котором концентрации основных компонентов газовой смеси будут соответствовать требованиям технологического процесса. Провести промышленные испытания существующего криогенного оборудования на предмет возможности охлаждения ОС до величины эффективного температурного уровня.

2. Провести экспериментальные исследования влияния присутствия неконденсируемых примесей на процесс десублимации HF при имитации технологического процесса фракционного разделения газовых смесей с охлаждением холодным воздухом от ВХМ. Провести количественную оценку величины проскока HF через ОС, охлаждаемую холодным воздухом.

3. Определить эффективность улавливания компонентов газовых смесей в емкости охлаждаемой холодным воздухом на технологических потоках установки К-09 ОУ КИУ ЗРИ АО «СХК».

4. Выполнить теоретическое моделирование процессов теплообмена в схеме воздушного охлаждения на установке К-09 ОУ КИУ при существующей технологической нагрузке, с учетом потока тепла от десублимации газовой смеси и теплообмена оборудования с окружающей средой. Разработать схему воздушного охлаждения технологических точек установки К-09 ОУ КИУ, выдать исходные данные на разработку конструкторской документации.

Решение сформулированных задач позволит обосновать возможность отказа от жидкого азота и применения холодного воздуха для охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей в производстве по разделению изотопов урана.

Научная новизна выполненной диссертации заключается в следующем:

1. Экспериментально доказана возможность фракционного разделения газовой смеси HF и ГФУ с десублимацией ее в одной емкости и последующей сублимацией, путем термостатирования при разных температурных уровнях.

2. Определена эффективность улавливания ГФУ и легких примесей из технологических потоков ОУ КИУ ЗРИ в емкости, охлаждаемые холодным воздухом с температурой 133 К. Эффективность улавливания составляет не менее 93,7 % от общего массового расхода газовой смеси.

3. Доказана возможность замены жидкого азота холодным воздухом для охлаждения ёмкостей в производстве по разделению изотопов урана. При охлаждении холодным воздухом обеспечивается необходимая степень очистки газовой смеси от легких примесей.

4. Разработанные методики и оборудование могут быть использованы при проведении исследований физических свойств газообразных веществ при криогенных температурах.

Результаты исследования имеют важное научное и практическое значение, которое заключается в следующем:

- изменена конструкция существующего опытного стенда для решения задачи исследования влияния не конденсируемых газов на процесс десублимации основной примеси технологических потоков при воздушном охлаждении от ВХМ;

- разработана методика проведения эксперимента по оценке влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации одного из компонентов газовой смеси;

- результаты теоретического моделирования удовлетворительно совпадают с результатами ОПЭ, поэтому используемая математическая модель может быть использована для проектирования аналогичных систем воздушного охлаждения;

- экспериментально обоснован способ охлаждения ОС холодным воздухом до температуры 133 К. Определена величина проскока HF в узел защиты вакуумных насосов через ОС охлаждаемый холодным воздухом от ВХМ;

- предложенная схема централизованной системы охлаждения технологических точек установки К-09 ОУ КИУ с применением ВХМ-0,54/0,6, принцип организации охлаждения может быть применен на предприятиях разделительно-сублиматного комплекса АО «ТВЭЛ».

Показано, что применение воздушного охлаждения взамен жидкого азота в производстве по разделению изотопов урана обеспечивает необходимую степень очистки газовой смеси от ГФУ и легких примесей в процессе фракционного разделения газовых смесей и позволит значительно снизить эксплуатационные затраты на жидкий азот, криогенную систему хранения и транспортировки жидкого азота, обеспечить автоматизацию и диспетчеризацию процесса охлаждения и снизить уровень воздействия вредных производственных факторов на персонал.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта РФФИ №16-48-700732 р_а «Экспериментально-теоретическая методика оптимизации систем охлаждения в технологии разделительного производства изотопов урана» и Грант Президента МК-5959.2016.8 «Разработка и обоснование энергоэффективной схемы системы охлаждения емкостей конденсационно-испарительных установок, используемых в технологии разделительного производства изотопов урана».

Методология и методы диссертационного исследования. При достижении цели и решении задач исследования использовался анализ и обобщение данных научно-технической литературы, анализ технологических параметров работы оборудования и установок. Использовалось компьютерное моделирование процессов течения холодного воздуха в воздушном теплообменнике и трубопроводной сети с учетом теплообмена со стенками емкости и трубопроводов. Экспериментальные исследования влияния неконденсируемых примесей и эффективности улавливания компонентов газовой смеси при охлаждении от ВХМ проводились на специально смонтированной опытно-промышленной установке.

Положения, выносимые на защиту:

1. Температура охлаждения емкостей для десублимации HF, удовлетворяющая требованиям технологического процесса, равна не более 137 К.

2. Не конденсируемые примеси не оказывают влияние на процесс десублимации HF в режиме термостатирования емкости при температуре 137 К.

3. Эффективность улавливания легких примесей из технологических потоков ЗРИ в емкости охлаждаемые холодным воздухом с температурой 133 К составляет не менее 93,7 % от общего массового расхода газовой смеси.

4. Холодный воздух от ВХМ-0,54/0,6 с температурой 133 К может быть применен для охлаждения ОС установки К-09 ОУ КИУ ЗРИ взамен жидкого азота. При использовании холодного воздуха обеспечивается необходимая степень очистки газовой смеси от легких примесей, охлаждение емкости и отвод тепла от десублимации потока смеси газов и потока тепла из окружающей среды при температуре охлаждения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- обоснованностью исходных данных и использованием классических методов термодинамических расчетов;
- применением классических методов статистической обработки экспериментальных данных;
- для проведения измерений при экспериментальных работах применялось аттестованное метрологическими службами измерительное оборудование;
- при проведении расчетно-теоретического обоснования термостатирования ёмкостей установки К-09 ОУ КИУ использовалась программа для ЭВМ зарегистрированная в «Роспатенте».

Апробация работы. Работа докладывалась на Отраслевой научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности» (г. Северск, СТИ НИЯУ МИФИ, май 2014 года), на Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение» (г. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, июнь 2014 года), на V Международной школе-конференции молодых атомщиков Сибири (г. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, октябрь 2014 год), на VIII Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (г. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, июнь 2016 года), на IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, сентябрь 2016 года), на III Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение» (г. Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, сентябрь 2016 года), на VII Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда 2017» (г. Санкт-Петербург, АО «НИКИЭТ «АТОМПРОЕКТ», июнь 2017 года), на Международном форуме молодых энергетиков и промышленников «Форсаж-2017» (г. Москва, Госкорпорация «РОСАТОМ», июль 2017 года), на Отраслевой научно-практической конференции «Молодежь ЯТЦ: Наука, производство, экологическая безопасность-2017» (г. Железногорск, АО «Горно-химический комбинат» ноябрь 2017 года), на научной сессии НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий-2018» (Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Северский технологический институт - филиал НИЯУ МИФИ (СТИ НИЯУ МИФИ), апрель 2018 года).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата

наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 2 статьи в российском журнале, входящем в Web of Science), 12 публикаций в сборниках материалов международных, всероссийских и вузовских научных и научно-практических конференций, представлены в 1 отчете НИР, получено 1 свидетельство о регистрации программы ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 113 страниц. Список использованных источников содержит 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен подробный анализ работы установки К-09 в составе ОУ КИУ ЗРИ АО «СХК». Рассмотрены режимы работы технологических коллекторов установки К-09 ОУ КИУ, основного и вспомогательного оборудования схемы фракционного разделения ОУ КИУ.

Уточнены расходные величины технологических потоков газовых смесей коллекторов установки К-09 ОУ КИУ. Установлено соотношение основных компонентов в составе газовой смеси поступающей в ОС установки К-09 ОУ КИУ с предыдущего технологического передела.

Проведен сравнительный анализ эксплуатационных затрат при ведении процесса фракционного разделения с применением в качестве хладоносителя для охлаждения ОС установки К-09 ОУ КИУ жидкого азота и холодного воздуха от ВХМ. Показано, что основным источником затрат при эксплуатации схемы фракционного разделения является жидкий азот, так же при обращении с жидким азотом помимо неудобств, связанных с большой долей ручного труда присутствуют вредные производственные факторы.

Во второй главе приведены перспективы применения холодного воздуха от ВХМ для охлаждения ОС установки К-09 ОУ КИУ взамен используемого жидкого азота. Результаты исследования процессов тепло-массобмена в ОС при охлаждении жидким азотом и холодным воздухом от ВХМ показали, что степень улавливания компонента газовой смеси в ОС будет определяться только давлением насыщенного пара этого компонента при температуре охлаждения стенки ОС.

Представлены результаты экспериментальных измерений давления насыщенного пара основных компонентов газовой смеси при температурах ниже 193 К. Работы проводились на специально разработанном и сконструированном опытном стенде. По полученным экспериментальным данным и теоретическим расчетам определено, что для достижения требуемых технологических параметров достаточно иметь температуру для охлаждения ОС не выше 137 К.

Для определения технической возможности использования ВХМ-054/0,6 для охлаждения ОС установки К-09 ОУ КИУ до температуры в 133 К проведены промышленные испытания по охлаждению технологических промежуточных ёмкостей, объемом 50 л. (ПЕ). На рисунке 1 представлена принципиальная схема охлаждения.

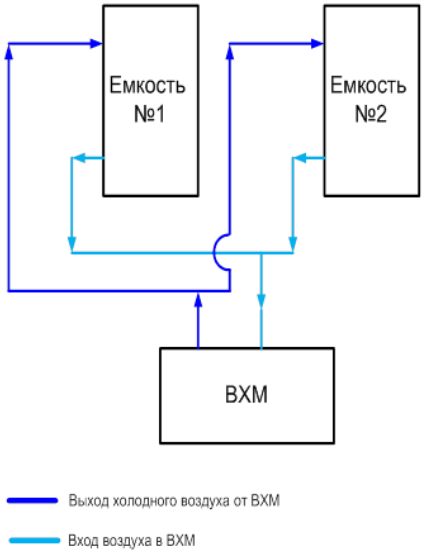


Рисунок 1 – Схема охлаждения ПЕ

По результатам испытаний установлено, что холодопроизводительности ВХМ-0,54/0,6 достаточно для охлаждения технологических емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей. Время охлаждения до температуры 132 К, составляет чуть более 5 часов.

<u>В третьей главе</u> диссертации приведены результаты экспериментов по оценке возможности применения воздушного охлаждения в процессе фракционного разделения газовых смесей.

Целью эксперимента являлось определение величины проскока HF через ОС охлаждаемый холодным воздухом до температуры 137 К и влияние неконденсируемых примесей на процесс десублимации одного из основных компонентов газовой смеси при воздушном охлаждении ОС. Экспериментальные работы проводились на опытном стенде, представленном на рисунке 2.

Методика проведения экспериментальной работы заключалась в имитации проточной схемы десублимации HF через ОС, используемые в технологической схеме фракционного разделения на установке К-09 ОУ КИУ, но при охлаждении холодным воздухом от ВХМ.

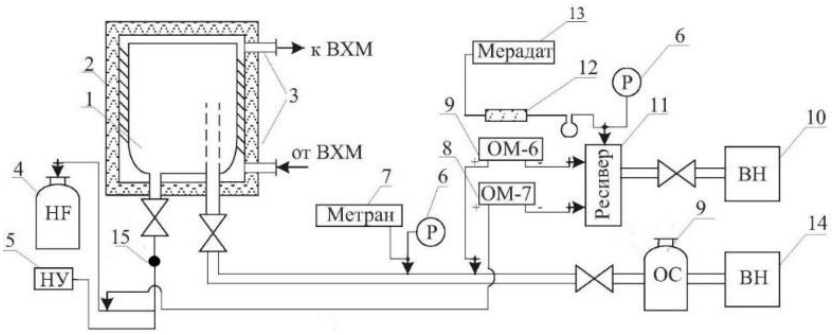


Рисунок 2 - Принципиальная схема опытного стенда

В напускной патрубок опытного стенда через коллектор подавалась газовая смесь HF и воздуха (в соотношении 90 % HF и 10 % воздуха) с расходом, близким к величине существующего технологического процесса. Расход HF поддерживался с помощью критической шайбы (15), а расход воздуха с помощью напускного устройства (5), отрегулированного на

расход воздуха G = 0,1 кг/сутки. Для проведения эксперимента использовали безводный HF марки «А». Коммуникации стенда были отвакуумированы до давления не более 90 мкм. рт. ст. и проверены на плотность. Перед проведением работ проведено взвешивание ОС (9) и емкости с HF (4). Предварительно ОС (9) была охлаждена жидким азотом до температуры 77 К, ОС (1) охлаждена воздухом от ВХМ до температуры 137 К, вакуумный насос (14) включен в работу.

Далее открывалась подача воздуха и HF. Давление до шайбы (15) поддерживалось равным 30 мм рт.ст., в откачном коллекторе давление, соответствующее технологическому процессу 1 мм рт.ст. Напуск газовой смеси продолжался не менее 8 часов, во время которых периодически подливался жидкий азот в отсек охлаждения ОС (9).

По истечении заданного времени, закрывалась подача воздуха и HF, установка откачивалась в ОС (9). Подача холодного воздуха в отсек охлаждения прекращалась. ОС (9) отсоединялась и изымалась из отсека охлаждения для отогрева. После отогрева, ОС (9) и ёмкость с HF (4) взвешивались.

Проверка количества десублимированного HF в ОС (1) производилась путем переконденсации HF из ОС (1) во вновь установленную ОС (9), которая была предварительно взвешена и охлаждена жидким азотом. После переконденсации, ОС (9) изымалась из отсека охлаждения, отогревалась и взвешивалась.

Было проведено три цикла измерений. Материальный баланс веществ подводился путем взвешивания емкости с HF (4) до и после напуска в установку, по разнице с первоначальным весом определялось количество испитанного HF. Количество HF сконденсированного в ОС (1) стенда определялось по разнице веса ОС (9), охлаждаемой жидким азотом, до и после переконденсации HF из ОС (1). Переконденсация HF из ОС (1) производилась после ее отогрева до температуры помещения (298 К). Взвешивание ОС (9) после переконденсации HF производилось так же после ее отогрева до температуры помещения.

Величина проскока HF через ОС охлаждаемый, холодным воздухом определялась как разница между количеством испитанного HF из емкости (4) и количеством HF сконденсированного в ОС (9), с учетом изменения его веса после завершения напуска. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты эксперимента по оценке влияния не конденсируемых газов на процесс десублимации HF

Показатели	Номер экспериментальной работы		
	1	2	3
Время напуска HF в установку, мин	485	480	480
Скорость напуска HF в установку, грамм/мин.	0,873	0,793	0,830
Количество испитанного HF, грамм	423,57	380,43	398,60
Изменение веса ОС (9), грамм	-0,10	+1,30	+0,87
Изменение веса ОС после переконденсации, грамм	+420,00	+378,87	+396,23
Материальный баланс HF, грамм % от количества испитанногоHF	3,67 0,87%	0,26 0,07%	1,50 0,38%

Результаты эксперимента показывают, что наличие неконденсируемых газов не оказывает влияния на процесс десублимации HF при охлаждении ОС воздухом с температурой 137

К. Проскок HF через ОС охлаждаемую до температуры 137 К составляет менее 1%. Для существующего технологического процесса проскок HF равный 1%, вполне допустим, т.к. газовая смесь проходит дальнейшую очистку на химпоглотительных установках (ХПУ).

Воздушное охлаждение на технологических коллекторах предлагается выполнить на базе ВХМ-0,54/0,6. Температурный уровень процесса равен 133 К. В схеме предусматривается применение существующих ОС объемом 24 л. Принципиальная схема воздушного охлаждения представлена на рисунке 3.

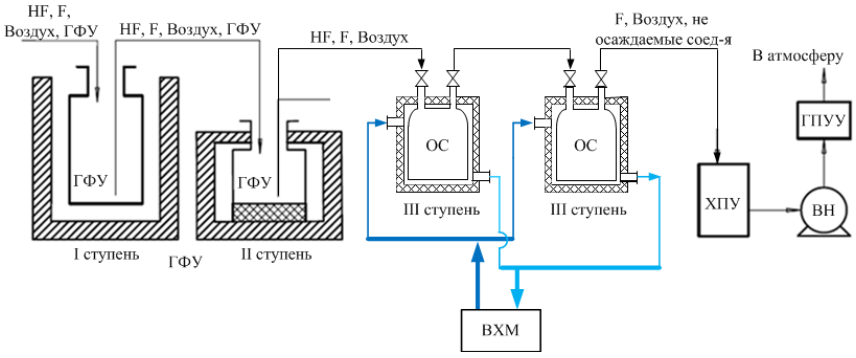


Рисунок 3 - Принципиальная схема воздушного охлаждения ОС

Одним из возможных вариантов оптимизации схемы фракционного разделения является применение двухступенчатой схемы взамен применяемой схемы с тремя ступенями. Принцип двухступенчатой схемы заключается в десублимации газовой смеси, выходящей с первой ступени чистки (ППЕ) в одной технологической емкости при температуре 133 К. После накопления определенного количества десублимата, емкость переключается на коллектор откачки легколетучих примесей из состава десублимата, температура охлаждающего емкость воздуха поднимается до значения 193 К. При такой температуре HF и другие легколетучие компоненты сублимируют и удаляются из емкости. После сублимации легколетучих компонентов в емкости остается сконденсированный ГФУ, который возвращается в технологию разделения изотопов.

Для проверки возможности применения двухступенчатой схемы в технологии ОУ КИУ проведен эксперимент на существующем опытном стенде (см. рис. 2). Для проведения данной работы взамен напускного устройства (5) подсоединена емкость объемом 0,5 л с ГФУ.

Эксперимент заключался в имитации технологического процесса фракционного разделения газовой смеси при температуре 133 К, в условиях двухступенчатой схемы фракционного разделения газовой смеси.

После проведения подготовительных работ (аналогичных, в предыдущем эксперименте) в охлажденную ОС (1) холодным воздухом от ВХМ с температурой 133 К из емкости объемом 0,5 л. (5) напускался ГФУ. Напуск продолжался в течении 2 часов.

После выдержки в течение 15 мин. из емкости (4) в течении 4 часов продолжался начался напуск безводного HF. После окончания напуска емкости с ГФУ (5) и HF (4) отсоединены и повторно взвешены.

После наполнения ОС (1) температура воздуха от ВХМ поднималась до 193 К, ОС (1) отогревалась, после чего производилась переконденсация HF в ОС (9) охлажденную жидким азотом до температуры 77 К. После прекращения снижения давления в установке, включался вакуумный насос ВН (14) для откачивания остатков HF из установки и конденсации их в ОС (9). Далее ВХМ останавливалась, ОС (9) извлекалась из отсека охлаждения и отогревалась

при температуре помещения не менее 24 часов. После отогрева ОС (9) повторно взвешивалась.

После отогрева ОС (1) производилась переконденсация ГФУ в вновь установленную ОС (9), которая была предварительно взвешена и охлаждена до температуры 77 К жидким азотом. После определялось количество сконденсированного ГФУ по аналогии с определением количества сконденсированного HF.

Материальный баланс подводился в три стадии. В первой стадии определялось количество поданного в ОС (1) ГФУ и HF, путем взвешивания емкостей с HF (4) ГФУ (5) до и после напуска в стенд. Во второй стадии определялось количество сконденсированного HF и ГФУ в ОС (1) путем переконденсации во вновь установленные ОС (9). В третьей стадии проводилось сравнение количества, поданного ГФУ и HF в ОС (1) опытного стенда и количество сконденсированного ГФУ и HF, выделенного из состава газовой смеси. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты эксперимента по оценке возможности применения воздушного охлаждения в процессе фракционного разделения газовых смесей

Вещество	Испитано, гр.	Сконденсировано, гр.	Разница, гр.	Разница, %
HF	370,5	373,8	+3,3	+0,89
ГФУ	384,2	376,9	- 7,3	-1,90
Итого	754,7	750,7	- 4,0	+ 0,53

По результатам эксперимента видно, что величина несоответствия испаренного из емкостей (4) и (5) количества веществ газовой смеси и количества сконденсированной смеси составило немногим более 0,5 % от общего количества испаренной газовой смеси. Количество сконденсированного HF, превышающее количество испаренного из емкости (4) и недостаток ГФУ, объясняется уносом части ГФУ из ОС (1) при переконденсации HF в ОС (9), а также при откачивании HF вакуумным насосом (14). Давление насыщенного пара ГФУ при температуре 193 К составляет 0,0013 мм. рт. ст., поэтому при переконденсации HF из ОС (1) в ОС (9) часть ГФУ попадает в ОС (9).

Учитывая результаты эксперимента по имитации технологического процесса фракционного разделения, в предлагаемом варианте организации технологии возможно использование двухступенчатой схемы фракционного разделения газовых смесей с организацией охлаждения с использованием двух контуров. Принципиальная схема фракционного разделения в две ступени представлена на рисунке 4.

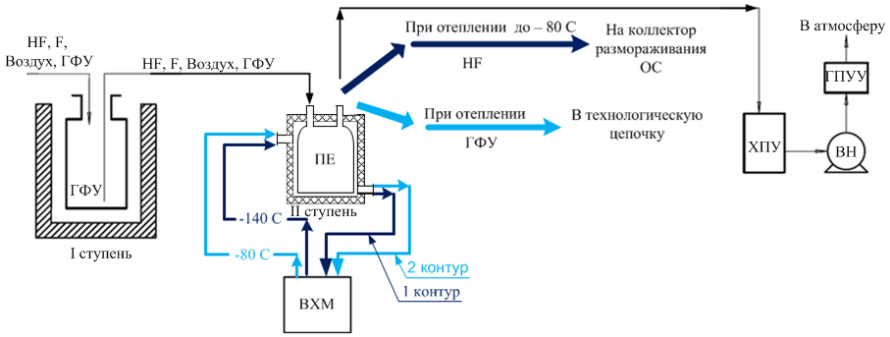


Рисунок 4 - Схема фракционного разделения в две ступени

Принцип фракционного разделения в предлагаемой схеме заключатся, в десублимации газовой смеси на второй ступени в одной промежуточной емкости (ПЕ), охлаждаемой холодным воздухом с температурой 133 К. После накопления определенного количества десублимата, производится подъем температуры воздуха до 193 К. После подъема температуры, HF будет сублимировать, пары поступают на коллектор размораживания ОС, откуда затем направляются на дальнейшую переработку. При отеплении ПЕ до температуры до 193 К, давление насыщенных паров HF составляет ≈ 2 мм рт. ст. Откачка HF проводится до стабилизации давления в ПЕ на уровне ниже этой величины. После извлечения HF из состава газовой смеси ПЕ отепляется, по мере отепления ГФУ испаряется в технологическую цепочку.

Преимуществом двухступенчатой схемы фракционного разделения является значительное сокращение технологических коммуникаций по сравнению с применяемой трёхступенчатой схемой разделения. При использовании нескольких ПЕ используется две ВХМ, работающие на двух температурных уровнях охлаждения воздуха (133 К и 193 К), в два контура трубопроводной сети для переключения охлаждения ПЕ с одной температуры на другую.

В четвертой главе диссертации приведены результаты опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) воздушного охлаждения емкостей на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ. Целью ОПЭ являлось определение эффективности процесса фракционного разделения газовых смесей при охлаждении емкостей холодным воздухом с температурой 133 К. Опробование воздушного охлаждения ОС от ВХМ на установке К-09 ОУ КИУ проведено на специально разработанной и смонтированной опытно-промышленной установке, состоящей из двух опытных промежуточных емкостей (ОПЕ), объемом 50 литров, ВХМ-0,54/0,6 и коммуникаций для рабочего газа и холодного воздуха, с соответствующей запорной арматурой. Последовательно соединенные ОПЕ были врезаны в технологические коммуникации между установками К-08 и К-09 ОУ КИУ. Принципиальная схема проведения ОПЭ приведена на рисунке 5.

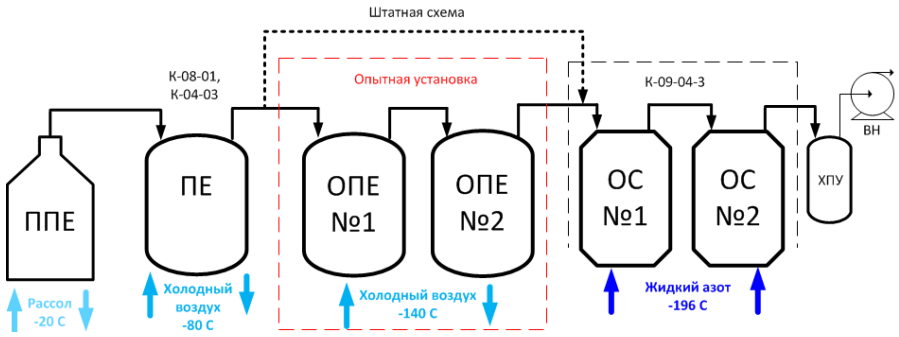


Рисунок 5 - Принципиальная схема фракционного разделения при проведении ОПЭ

Схема фракционного разделения при ОПЭ заключается в следующем: поток газовой смеси с установки К-08/К-04, с концентрацией изотопа U^{235} менее 1 %, проходит через две последовательно соединенных ОПЕ, охлаждаемых холодным воздухом от ВХМ с температурой 133 К. Далее газовая смесь поступает на установку К-09, где проходит через два последовательно соединенных штатных ОС, охлаждаемых жидким азотом.

Для оценки проскока легких примесей через ОПЕ и определения эффективности применения воздушного охлаждения использовались две последовательно соединенных ОС на коллекторе К-09-04-3.

После отработки заданного времени ОПЕ на конденсацию, поток газовой смеси через опытную установку прекращался. После завершения цикла работы на конденсацию произ-

водилась сборка штатной схемы линии чистки коллектора К-01 без ОПЕ (см. рис. 5). ОС с коллектора К-09-04-3 извлекались и взвешивались, на их место устанавливались «чистые» ОС и замораживались жидким азотом не менее 2 часов. Во вновь установленные и взвешенные ОС проводилось испарение десублимата из ОПЕ. После окончания испарения ОС извлекались и взвешивались. Далее подводился материальный баланс веществ и определение количественного состава ГФУ и HF в десублимате.

Работы по охлаждению емкостей были проведены на коллекторе К-04-3 отличающимся стабильным расходом газовой смеси и на коллекторе К-08-01, на котором ведется периодическая тренировка емкостей с сырьевым ГФУ с кратно изменяющимся расходом и составом газовой смеси.

Таблица 3 - Результаты проведения ОПЭ

Поток смеси	Время работы, сутки/ч	Общий поток смеси, гр	Расход смеси, гр/ч	Осаждено в ОПЕ, гр		Проскок через ОПЕ, гр (%)			Эффективность улавливания, %
				№ 1	№ 2	Изменение веса		Общий	
						ОС №1	ОС №2		
К-04-3	13/309	758	2,453	690 (598-HF, 92-ГФУ)	26 (HF)	+ 42 (HF)	0	42 (5,87)	94,13
К-08-01	21/504	1526	3,028	1428 (1366-HF, 62-ГФУ)	84 (HF)	+62 (HF)	+18 (HF)	80 (5,29)	94,71
К-08-01	21/504	7262	14,409	6634 (2830-HF, 3804-ГФУ)	198 (HF)	+404 (HF)	+26 (HF)	430 (6,29)	93,71

Из результатов проведения ОПЭ способа воздушного охлаждения емкостей на установке К-09 ОУ КИУ, видно, что:

- проскок легких примесей через емкости (ОПЕ), охлаждаемые до температуры 133 К составил не более 6,3 % от общего массового расхода газовой смеси. При этом результаты измерений показали хорошую повторяемость;
- в первой по ходу движения потока газовой смеси ОПЕ, охлаждаемой холодным воздухом, десублимируется весь ГФУ содержащийся в составе газовой смеси и более 91 % общего массового потока газовой смеси;
- эффективность улавливания ГФУ и HF с применением в качестве хладоносителя холодного воздуха практически не зависит от расхода и состава газовой смеси (при расходах и параметрах технологических потоков на ОУ КИУ).

<u>В пятой главе</u> представлены результаты теоретического моделирования процесса теплообмена в отсеках воздушного охлаждения ОС (воздушных теплообменниках). Расчет газодинамических процессов течения холодного воздуха в трубопроводной системе и теплообмена со стенками ёмкостей и трубопроводов выполнен с помощью программы для ЭВМ «Программа для расчета охлаждения блока приемных емкостей для десублимации газа».

Для проведения численного моделирования теплообмена в воздушных теплообменниках ОС были выбраны два варианта:

1. Охлаждение всей системы емкостей установки К-09 ОУ КИУ (24 штуки ОС) от начальной температуры (298 К) до рабочей температуры (133 К) с использованием одной и двух ВХМ-0,54/0,6, работающих на один коллектор.

2. Определение стационарного распределения температуры стенок емкостей с заданными величинами потоков тепла от десублимации потока газовой смеси в емкости и из окружающей среды при их охлаждении с использованием одной и двух ВХМ-0,54/0,6, работающих на один коллектор.

Схема для численного моделирования охлаждения ОС приведена на рисунке 6.

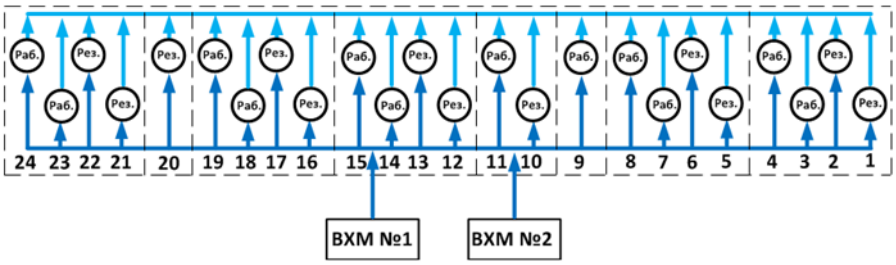
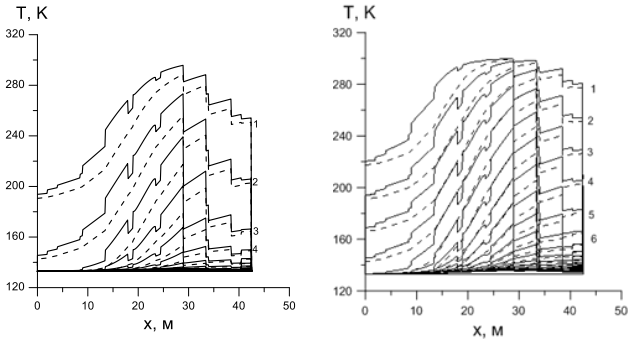


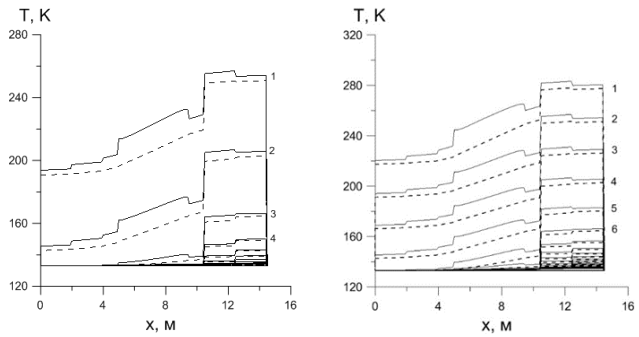
Рисунок 6 - Схема для численного моделирования охлаждения ОС

Был проведен расчет по варианту 1, охлаждение всей системы емкостей установки К-09 ОУ КИУ. На рисунках 7 - 9 представлены распределения температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) по маршрутам течения воздуха через емкости № 1, 24 как наиболее удаленные от точки входа холодного воздуха, так и через ёмкость № 10, находящуюся в центре схемы охлаждения. Линии трендов (1, 2, 3, 4…) построены в фиксированные моменты времени через 50 минут от начала процесса. Начальная температура воздуха и емкостей принята равной 298 К.



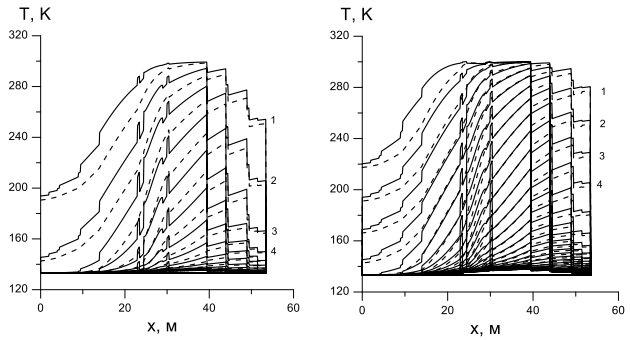
а) б)

Рисунок 7 – Распределение температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) по маршруту течения воздуха через емкость № 1. Работают 2 ВХМ – (а). Работает 1 ВХМ – (б).



а) б)

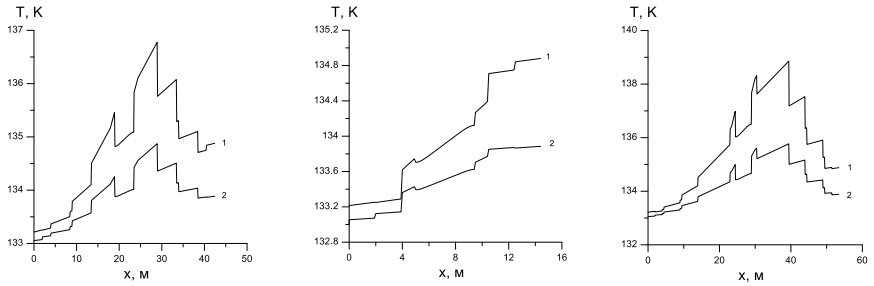
Рисунок 8 – Распределение температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) по маршруту течения воздуха через емкость № 10. Работают 2 ВХМ – (а). Работает 1 ВХМ – (б).



а) б)

Рисунок 9 – Распределение температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) по маршруту течения воздуха через емкость № 24. Работают 2 ВХМ – (а). Работает 1 ВХМ – (б).

По варианту 2 в расчетах учитываются тепловые потоки из окружающей среды и от десублимации потока газовой смеси.



а) б) в)

Рисунок 10 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 1 (а), №10 (б), № 24 (в)
1 – одна ВХМ в работе, 2 – две ВХМ в работе.

По результатам расчетов охлаждения всей системы емкостей определено, что при работе двух ВХМ-0,54/0,6 на одну сеть время охлаждения всех емкостей до рабочей температуры составляет 10-11 часов, при работе одной ВХМ-0,54/0,6 это время составляет 15 часов. Наиболее быстро охлаждаются емкости, расположенные ближе к точке подключения ВХМ-0,54/0,6 в трубопроводную сеть. Это обусловлено различным расходом воздуха по трубопроводной сети из-за различия аэродинамического сопротивления по маршрутам течения возду-

ха. Чем длиннее маршрут, тем больше суммарное аэродинамическое сопротивление, тем меньший объемный (и массовый) расход воздуха по соответствующим маршрутам течения холодного воздуха.

По результатам расчетов стационарного распределения температуры стенок емкостей определено, что температура стенок емкостей отличается от температуры воздуха на входе в трубопроводную сеть не более чем на 2°С при работе двух ВХМ-0,54/0,6, и не более чем на 5,5^{o}С (в наиболее удаленной емкости № 24) при работе одной ВХМ-0,54/0,6.

По результатам теоретического моделирования процессов теплообмена в воздушных теплообменниках ОС разработана принципиальная схема охлаждения на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ. Схема воздушного охлаждения разработана для 24 штук ОС, охлаждаемых от двух ВХМ-0,54/0,6 и приведена на рисунке 11. Выданы рекомендации для разработки ЧТД на организацию воздушного охлаждения от ВХМ-0,54/0,6 на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ.

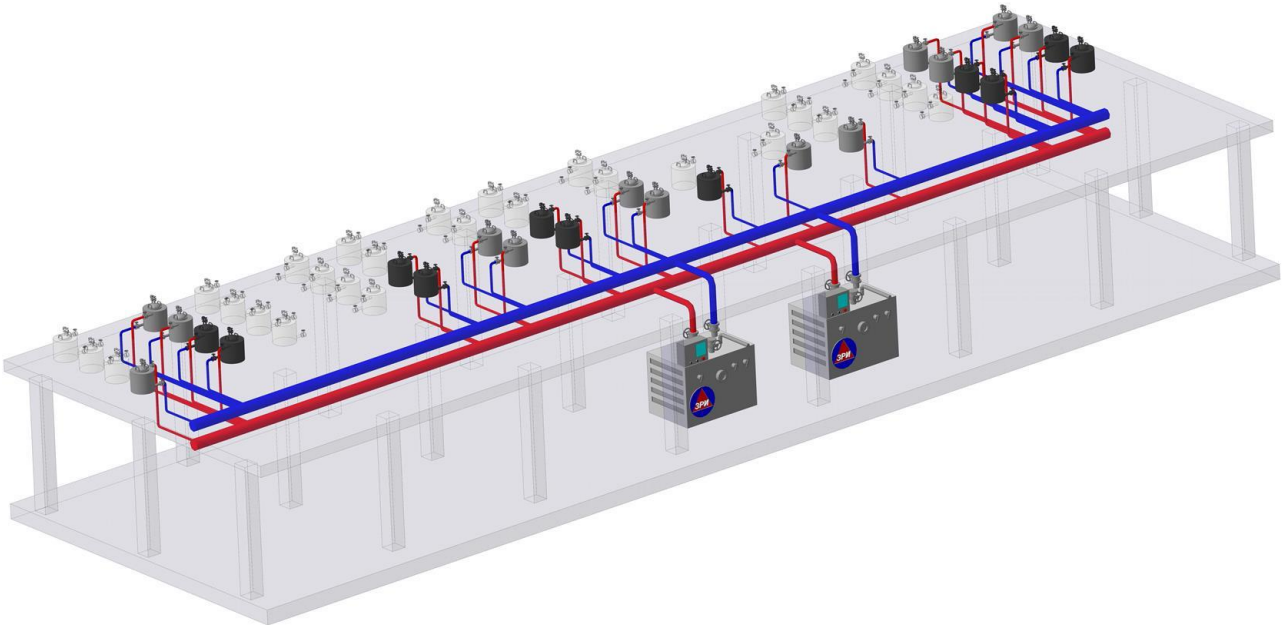


Рисунок 11 – Принципиальная схема воздушного охлаждения от ВХМ-0,54/0,6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена необходимая температура охлаждения емкостей для улавливания проскоков ГФУ и легких примесей в схеме фракционного разделения ОУ КИУ ЗРИ. При температуре 137 К и ниже концентрации основных компонентов газовой смеси – ГФУ и HF, удовлетворяют требованиям существующего технологического процесса. По результатам промышленных испытаний установлено, что холодопроизводительности ВХМ-0,54/0,6 достаточно для охлаждения емкостей до температуры 132 К.

2. Экспериментально установлено, что наличие неконденсируемых примесей не оказывает влияние на процесс десублимации HF в режиме термостатирования емкости при температуре 137 К.

3. Определена эффективность улавливания компонентов газовой смеси из технологических потоков ЗРИ. Проскок легких примесей через емкости, охлаждаемые холодным воздухом от ВХМ с температурой 133 К составляет не более 6,3 % от общего массового расхода газовой смеси. С учетом емкости поглотителей ХПУ полученные величины проскоков являются допустимыми для установок К-09 ОУ КИУ ЗРИ.

4. Определены необходимые холодильные мощности для охлаждения всей системы ОС на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ. Для охлаждения системы ОС в количестве 24 штук необходимо иметь в наличии две ВХМ-0,54/0,6, время охлаждения до рабочей температуры равной 133 К составит 11 часов.

5. Разработана централизованная система воздушного охлаждения технологических точек ОУ КИУ ЗРИ с применением ВХМ-0,54/0,6. Выданы рекомендации для разработки чертежно-технической документации системы воздушного охлаждения установки К-09 ОУ КИУ ЗРИ.

6. Подтверждена возможность организации технологии фракционного разделения газовых смесей с использованием двухступенчатой схемы, с десублимацией потока газовой смеси в одной технологической емкости при температуре 133 К и накоплением десублимата, с последующим поднятием температуры до 193 К и сублимацией легколетучих компонентов. Двухступенчатая схема предполагает организацию воздушного охлаждения с использованием двух контуров охлаждения 133 К и 193 К.

7. Разработанные методики и оборудование могут быть использованы при проведении исследований физических свойств газообразных веществ при криогенных температурах.

8. Предложенный способ воздушного охлаждения технологических точек с применением ВХМ-0,54/0,6 может быть применен на аналогичных производствах разделительно-сублиматного комплекса АО «ТВЭЛ».

Список трудов по теме диссертационного исследования:

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Губанов С. М. Численное моделирование воздушного охлаждения емкости для десублимации компонентов газовой смеси / С. М. Губанов, М. И. Дурновцев, **А. А. Картавых**, А. Ю. Крайнов // Компьютерные исследования и моделирование. - 2016. - Т. 8, № 3. - С. 521−529. – 0,56 / 0,14 а.л.

2. **Картавых А. А.** Оценка влияния откачивания газовой смеси на процесс десублимации HF / И. М. Васенин, С. М. Губанов, А. А. Картавых, 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.

3. **Картавых А.А.** Оценка влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации фтористого водорода / С. М. Губанов, А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Вестник Том. гос. ун-та. Математика и механика. - 2017. - № 46. – С. 70-75. DOI: 10.17223/19988621/46/9. – 0,38 / 0,13 а.л.

4. **Картавых А.А.** Экспериментальное моделирование способа воздушного охлаждения в процессе разделения газовых смесей / А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Инженерно-физический журнал. - 2018. - Том 91, № 6 (ноябрь–декабрь). – С. 1457-1462. – 0,38 / 0,19 а.л.
Переводная версия Kartavykh A.A., Krainov A.Y. Experimental Modeling of the Method of Air Cooling in the Process of Gas Mixture Separation // Journal of Engineering Physics and Termophysics, 2018, 91(6), с/ 1385-1390/ DOI: 10.1007/s10891-018-1872-2.

Патент Российской Федерации:

5. Патент 2655347 Российская Федерация. МПК B01D 7/02 (2006/01). Стенд для моделирования процесса десублимации компонентов газовой смеси / Губанов С. М. (RU), Крайнов А. Ю. (RU), **Картавых А. А.** (RU); патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет" (ТГУ, НИ ТГУ) (RU). - № 2016126331; заявл. 30.06.2016, опубл. 25.05.2018, Бюл. № 15.

6. Программа расчета конвекции в камерах сухого хранения отработанного ядерного топлив. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Крайнов А. Ю., Моисеева К. М., Картавых А. А № 2017617114, 23 июня 2017.

Публикации в прочих научных изданиях:

7. Губанов С.М. Применение способа охлаждения с использованием воздушно-холодильной машины для десублимации гексафторида урана / С.М. Губанов, М.И. Дурновцев, **А.А. Картавых**, А.Ю. Крайнов А.Ю., М.В. Чуканов, Э.Р. Шрагер // Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016)», г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. - С. 389-391. – 0,19 / 0,03 а.л.

8. Губанов С. М. Оценка возможности применения воздушного охлаждения для замещения использования жидкого азота в производстве по разделению изотопов урана / С.М. Губанов, М.И. Дурновцев, **А.А. Картавых,** А.Ю. Крайнов А.Ю., М.В. Чуканов, Э.Р. Шрагер // Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные

проблемы современной механики (ФППСМ-2016)», г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. – С. 392-394. – 0,19 / 0,03 а.л.

9. **Картавых А. А.** Исследование и оптимизация откачных систем разделительного производства / С. М. Губанов, А. А. Картавых, М. В. Чуканов // Изотопы: технологии, материалы и применение: сборник тезисов докладов Международной научной конференции молодых учёных, аспирантов и студентов (Томск, 20-24 октября 2014г.)/Томский политехнический университет.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 136. – 0,06 / 0,02 а.л.

10. **Картавых А.А.** Оценка возможности применения способа воздушного охлаждения в процессе десублимации фтористого водорода /А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов. VII Научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда 2017»: тезисы выступлений.-СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2017. – С. 105-107. – 0,19 / 0,095 а.л.

11. **Картавых А. А.** Воздушное охлаждение в производстве по разделению изотопов урана// Итоги диссертационных исследований. Том 2. – Материалы X Всероссийского конкурса молодых учёных. – М.: РАН, 2018. –С. 12-22. – 0,69 а.л.

12. **Картавых А. А.** Экспериментальное определение эффективности воздушного охлаждения емкостей для десублимации фтористого водорода / А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 27–29 ноября 2017 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск, 2017. –С. 286-288. – 0,19 / 0,095 а.л.

13. Дурновцев М. И Экспериментальное измерение давления насыщенных паров безводного фтористого водорода / М. И. Дурновцев, С. М. Губанов, **А. А. Картавых**, А. Ю. Крайнов // Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016)», г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. - С. 396-397. – 0,13 / 0,03 а.л.

14. Крайнов А. Ю. Численное моделирование воздушного охлаждения емкостей для десублимации фтористого водорода / А. Ю. Крайнов, Л.Л. Миньков, **А.А. Картавых** // Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий: материалы III Всероссийского научного семинара с международным участием [Электрон. текстовые дан.] ; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 37 - 44. – 0,5 / 0,17 а.л.

15. Дурновцев М. И. Стенд для измерения давления насыщенных паров при низких температурах / М. И. Дурновцев, С. М. Губанов, **А. А. Картавых,** А. Ю. Крайнов // Сборник трудов IX всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016)», г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016. 395 С. - 0,06 / 0,015 а.л.

16. **Картавых А. А.** Перспективный способ охлаждения в производстве по разделению урана // Сборник тезисов докладов отраслевой научно-практической конференции «Молодежь ЯТЦ: Наука, производство, экологическая безопасность-2017». – М.:Издательство «Перо», 2017. -80 С. – 0,06 а.л.

17. **Картавых А. А.** Низкотемпературное охлаждение емкостей для десублимации компонентов газовой смеси / А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Изотопы: технологии, материалы и применение: Материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (19 ноября - 23 ноября 2018 г.) Национальный исследовательский

Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Графика, 2018. 33 С. -0,06 / 0,03 а.л.

18. **Картавых А.А.** Исследование возможности применения воздушного охлаждения на разделительных производствах АО «ТВЭЛ». / Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий: научная сессия НИЯУ МИФИ - 2018, 2-6 апреля 2018 г.: материалы конференции / Северский технологический институт - филиал НИЯУ МИФИ (СТИ НИЯУ МИФИ) – Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018. – 47 С. – 0,06 а.л.

Результаты диссертационного исследования включены в отчеты о НИР:

19. Разработка и обоснование энергоэффективной схемы системы охлаждения емкостей конденсационно-испарительных установок, используемых в технологии разделительного производства изотопов урана: отчет о НИР / Моисеева К. М., Дурновцев М. И., **Картавых А. А.**, Красницкий Е. А., Никитин П. Ю. – Томск: ТГУ, 2018. – № госрегистрации АААА-Б18-218071290027-5.

АНТИПЛАГИАТ
ТВОРИТЕ СОБСТВЕННЫМ УМОМ

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: kaashk@mail.ru / ID: 6963690
Проверяющий: (kaashk@mail.ru / ID: 6963690)

Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат»- http://users.antiplagiat.ru

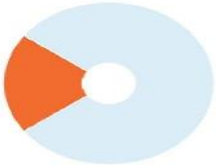
ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 1
Начало загрузки: 24.06.2019 17:51:59
Длительность загрузки: 00:00:02
Имя исходного файла: НД
Размер текста: 1055 кБ
Символов в тексте: 45282
Слов в тексте: 5630
Число предложений: 446

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 24.06.2019 17:52:02
Длительность проверки: 00:00:01
Комментарии: не указано
Модули поиска: Модуль поиска Интернет

ЗАИМСТВОВАНИЯ	ЦИТИРОВАНИЯ	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ
19,79%	0%	80,21%



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.
Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	7,86%	https://esu.citis.ru/dissertation/JF02GLJSJGPIK1EEQUTOJ3T7	https://esu.citis.ru	21 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[02]	3,79%	Скачать полнотекстовую версию	http://journals.tsu.ru	31 Июл 2017	Модуль поиска Интернет
[03]	3,1%	Моделирование технологии фторидного передела вольфрама	http://ams.tsu.ru	06 Ноя 2018	Модуль поиска Интернет

Еще источников: 10
Еще заимствований: 5,05%