Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Акционерное общество «Сибирский химический комбинат»

На правах рукописи

Ahapmont

Картавых Андрей Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФРАКЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,

профессор Крайнов Алексей Юрьевич

Оглавление

Введе	ние				•••••	5
Глава	1 Современное	состояние	проблемы	И	задачи	
исслед	цования					16
1	.1 Процесс фракц	ионного разделен	ия газовых смес	ей		16
1	.2 Описание устан	ювки К–09 ОУ К	ИУ			19
	1.2.1 Узел защи	ты откачной сист	гемы			20
	1.2.2 Характери	истика и состав от	гкачной системы			20
1	.3 Состав газовой	смеси				21
1.	.4 Обеспечение эк	сплуатации суще	ствующей схемн	ы фракци	ионного	
раздел	ения					24
	1.4.1 Применен	ние жидкого азота	a			24
	1.4.2 Эксплуат	ационные затрати	ы при ведении те	хнологи	ческого	
проце	сса на установке I	К–09 ОУ КИУ				25
1.	.5 Математическо	е моделирование	процессов тепло	ообмена	В	
проце	ссах десублимаци	и компонентов га	азовых смесей			27
В	ыводы по главе 1					29
Глава	2 Эксперимента	льное измерени	е давления на	асыщенн	ого пара	
основі	ных компонентов	газовой смеси		•••••	•••••	31
2.	1 Измерение давл	ения насыщенно	го пара НБ			32
2.	2 Измерение давл	ения насыщенно	го пара ГФУ			40
	2.2.1 Теоретич	еские данные	о давлении на	сыщенн	ых паров	
ГФУ					·····	40
	2.2.2 Опытный	стенд для измер	ения давления н	насыщен	ного пара	
ГФУ						42
	2.2.3 Методик	а проведения	экспериментали	ьного і	измерения	
давлен	ния насыщенного	пара ГФУ				43
	2.2.4 Результа	аты эксперимен	итального изме	ерения	давления	
насыц	ценного пара ГФУ	7			· · · · · · · · · · · · · · · ·	44

2.2.5 Выводы по измерению давления насыщенного пара	
ГФУ	48
2.3 Опробование холодопроизводительности ВХМ	49
Выводы по главе 2	54
Глава 3 Результаты экспериментов по оценке возможности применения	
воздушного охлаждения в процессе фракционного разделения газовых	
смесей	56
3.1 Описание эксперимента по оценке влияния неконденсируемых	
газов на процесс десублимации HF	56
3.2 Методика проведения эксперимента по оценке влияния	
неконденсируемых газов на процесс десублимации HF	58
3.3 Результаты эксперимента по оценке влияния неконденсируемых	
газов на процесс десублимации HF	6(
3.4 Схема воздушного охлаждения	61
3.5 Описание эксперимента по оценке возможности применения	
воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме фракционного	
разделения газовых смесей	62
3.6 Методика проведения эксперимента по оценке возможности	
применения воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме	
фракционного разделения газовых смесей	65
3.7 Результаты эксперимента по оценке возможности применения	
воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме фракционного	
разделения газовых смесей	67
3.8 Схема фракционного разделения в две ступени	69
Выводы по главе 3	7(
Глава 4 Результаты опытно-промышленной эксплуатации воздушного	
охлаждения емкостей на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ	72
4.1 Описание конструкции опытно-промышленной установки	72
4.2 Порядок проведения ОПЭ	75
4.3 Результаты проведения ОПЭ	76

4.4 Исходные данные для разработки ЧТД отсека охлаждения	78
Выводы по главе 4	80
Глава 5 Теоретическое моделирование процессов теплообмена в схеме	
воздушного охлаждения осадительных ёмкостей	82
5.1 Исходные данные для проведения расчетов	83
5.2 Конструктивные особенности схемы охлаждения	84
5.3 Результаты теоретического моделирования охлаждения ОС от	
начальной температуры	84
5.4 Стационарные режимы работы ОС при воздушном охлаждении	
одной и двумя ВХМ	92
5.5 Обсуждение результатов расчетов	96
5.6 Схема воздушного охлаждения установки К-09 ОУ КИУ ЗРИ	97
5.7 Исходные данные для разработки ЧТД схемы охлаждения	
технологических точек установки К-09 ОУ КИУ	100
Выводы по главе 5	101
Заключение	102
Список сокращений и условных обозначений	104
Список литературы	105

Введение

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 (НF) в ГФУ значительно превышает суммарное содержание других примесей, НF 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 НF 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.

Актуальность исследования

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, задача по изменению способа охлаждения ОС становится весьма актуальной [1].

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

Степень разработанности темы исследования

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 [2]. Холодный воздух с температурой 193 К генерирует воздушно-холодильная машина ВХМ–0,54/0,6 (ВХМ) на базе турбодетандерного агрегата [3]. Для обеспечения работы ВХМ используется схема очистки и осушки сжатого воздуха с применением цеолитов до точки росы 200 К [4].

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

Цель и задачи исследования

Целью исследования 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 определить эффективный путем температурный уровень охлаждения ОС, при котором концентрации основных компонентов газовой смеси будут соответствовать требованиям технологического процесса. Провести промышленные испытания существующего криогенного оборудования предмет возможности охлаждения OC на ДО величины эффективного температурного уровня.

2. Провести экспериментальные исследования влияния присутствия неконденсируемых примесей на процесс десублимации НF при имитации технологического процесса фракционного разделения газовых смесей с охлаждением холодным воздухом от ВХМ. Провести количественную оценку величины проскока HF через OC, 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 установки К–09 ОУ КИУ при существующей технологической нагрузке, с учетом потока тепла от десублимации газовой смеси и теплообмена оборудования с окружающей средой.

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

Научная новизна выполненной диссертации заключается в следующем:

1. Экспериментально доказана возможность фракционного разделения газовой смеси НF 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, охлаждаемой 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.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая и практическая значимость выполненной диссертации 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 BXM;

– предложена схема централизованной системы охлаждения технологических точек установки К–09 ОУ КИУ ЗРИ с применением ВХМ, 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 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 НF в режиме термостатирования емкости при температуре 137 К.

3. Эффективность улавливания легких примесей из технологических потоков ЗРИ в емкости охлаждаемой 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.

Степень достоверности результатов исследования

 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 результатов исследования

Работа докладывалась на Отраслевой научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности» (Северск, СТИ НИЯУ МИФИ, 2014), на Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение» (Томск, Национальный исследовательский Томский

политехнический университет, 2014), на V Международной школе-конференции молодых атомщиков Сибири (Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014), на VIII Международная научноконференция «Физико-технические проблемы практическая В науке, промышленности И медицине» (Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016), на IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2016), на III Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы применение» И (Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016), на VII Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда 2017» (Санкт-Петербург, AO «НИКИЭТ «АТОМПРОЕКТ», 2017), на Международном форуме молодых энергетиков и промышленников «Форсаж-2017» (Москва, Госкорпорация «РОСАТОМ», 2017), на Отраслевой научно-практической конференции «Молодежь ЯТЦ: Наука, производство, экологическая безопасность-2017» (Железногорск, АО «Горнохимический комбинат», 2017), на научной сессии НИЯУ МИФИ «Актуальные инновационного развития ядерных технологий-2018» проблемы (Северск. Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ" Северский технологический институт - филиал НИЯУ МИФИ (СТИ НИЯУ МИФИ), 2018).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований [47, 74, 79], в прочем научном журнале [31], в материалах конференций [1, 2, 15, 16, 37, 38, 46, 48, 49, 61, 65, 75, 78, 84], представлены в отчете НИР [50], получено 1 свидетельство о регистрации программы ЭВМ [87], получен 1 патент на изобретение [76].

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 изложение содержания

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

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

Исходя из среднесуточных величин натечек легких примесей в ОС после переработки содержимого ОС на сорбционной установке уточнены средние величины потоков газовых смесей, поступающих на установку К–09 ОУ КИУ, с учетом имеющихся данных по взвешиванию ОС после снятия и тренировки с технологических коллекторов установки К–09 ОУ КИУ. Определено соотношение основных компонентов газовой смеси.

Проведен сравнительный анализ эксплуатационных затрат при применении в качестве хладоносителя для охлаждения ОС установки К–09 ОУ КИУ жидкого азота и холодного воздуха от ВХМ.

Исходя из проведенного анализа технологических процессов фракционного разделения на ЗРИ АО «СХК», анализа схем организации процессов ОУ КИУ и оценки возможности применения более энергоэффективного способа охлаждения в схеме ОУ КИУ в первой главе диссертационной работы сформулирована цель работы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты исследования процессов тепломассобмена в ОС при охлаждении ОС жидким азотом и холодным воздухом. Результаты показали, что степень улавливания компонента газовой смеси в ОС будет определяться только давлением насыщенного пара этого компонента при температуре охлаждения стенки ОС. Расчетным путем определена температура охлаждения, при которой концентрация НF на выходе из ОС будет соответствовать требованиям технологического процесса. На опытном стенде проведены экспериментальные измерения давления насыщенного пара ГФУ. Полученные результаты сравнены с данными о давлении насыщенных паров ГФУ, приведенными в литературных источниках.

По результатам расчетно-экспериментальных работ определена необходимая температура охлаждения ОС, при которой концентрации основных компонентов газовой смеси будет соответствовать требуемым технологическим условиям.

Проведены работы по определению технической возможности применения ВХМ–0,54/0,6 для охлаждения емкостей и достижения необходимой температуры охлаждения ОС.

В третьей главе представлены результаты эксперимента по оценке возможности применения холодного воздуха для охлаждения емкостей в процессе фракционного разделения газовых смесей. Работы проводились на существующем опытном стенде, конструкция которого была изменена.

На опытном стенде проведен эксперимент, который заключался в имитации процесса санитарной очистки газа на установке К–09 ОУ КИУ с применением в качестве хладоносителя холодного воздуха от ВХМ. Целью эксперимента являлось определение величины проскока НF через OC, охлаждаемый холодным воздухом до температуры 137 К при параметрах идентичных параметрам в технологическом процессе OУ КИУ, и механизм влияния присутствия неконденсируемых примесей на процесс улавливания.

Также проведено экспериментальное исследование возможности организации работы схемы фракционного разделения газовых смесей в две ступени, взамен схемы в три ступени, применяемой в настоящее время. Принцип схемы в две ступени заключается в организации технологии улавливания компонентов газовой смеси в одной емкости при температуре 133 К, накоплением определенного количества десублимата, поднятием температуры до 193 К и

последующим отделением легких примесей от целевого продукта. Схема подразумевает применение двух контуров воздушного охлаждения.

Возможность применения описанной схемы была экспериментально подтверждена. Предложена схема фракционного разделения с воздушным охлаждением ОС на установке К–09 ОУ КИУ и схема организации разделения газовых смесей в две ступени.

В четвертой главе представлены результаты опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) воздушного охлаждения емкостей на установке К–09 ОУ КИУ от ВХМ.

Разработана программа проведения работ по охлаждению емкостей на установке К–09 ОУ КИУ холодным воздухом от ВХМ. Проведено три цикла работ по охлаждению емкостей на установке К–09 ОУ КИУ холодным воздухом от ВХМ с температурой 133 К. 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.

Разработана конструкция отсека воздушного охлаждения (воздушного теплообменника) для ОС объемом 24 л.

В пятой главе представлены результаты теоретического моделирования процесса теплообмена в воздушных теплообменниках ОС установки К–09 ОУ КИУ при охлаждении от ВХМ. Расчёты проведены для двух вариантов работы:

Охлаждение ОС установки К–09 ОУ КИУ от начальной температуры (298 К) до рабочей температуры (133 К) с использованием ВХМ для охлаждения.

2. Определение стационарного распределения температуры стенок ОС с учетом тепловой нагрузки от десублимации потока газовой смеси и тепловых потерь в окружающую среду при использовании ВХМ для охлаждения.

В исходные данные программы для расчета процессов тепло- и массообмена воздуха в блоке ёмкостей внесены уточнения, с учетом настоящей тепловой нагрузки технологического процесса на установке К–09 ОУ КИУ и технических особенностей эксплуатации ВХМ. Определено время охлаждения ОС установки К-09 ОУ КИУ с учетом существующей технологической нагрузки от десублимации потока газовой смеси и тепловых потерь в окружающую среду, в вариантах охлаждения при использовании одной и двух единиц ВХМ.

Разработана схема воздушного охлаждения технологических точек установки К-09 ОУ КИУ от ВХМ. Определено оптимальное расположение холодильных мощностей в схеме охлаждения. В состав схемы охлаждения включено: холодильные мощности (две единицы BXM-0,54/0,6), OC, предназначенные для десублимации потока газовой смеси на коллекторах установки К-09 ОУ КИУ и необходимые коммуникации.

Выданы исходные данные для разработки чертежно-технической документации (ЧТД) на организацию схемы охлаждения технологических точек установки К–09 ОУ КИУ ЗРИ холодным воздухом от ВХМ.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной работы.

Работа выполнялась на ЗРИ АО «СХК» и кафедре математической физики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Глава 1 Современное состояние проблемы и задачи исследования

Во время ведения процесса обогащения урана на ЗРИ подача сырьевого ГФУ в разделительный каскад и прием обогащенного и обедненного по изотопу U^{235} происходит в конденсационно-испарительной установке (КИУ) ОУ КИУ ЗРИ. Подача сырьевого ГФУ происходит из емкостей объемом 2,5 м³ при его сублимации на коллекторе К–01 КИУ при подогреве стенки емкости с помощью электрических индукторов. Прием обедненного и обогащенного по U^{235} ГФУ происходит в емкости объемом 2,5 м³ на коллекторе К–03 и в емкости объемом 1 м³ на коллекторе К–02, соответственно. В данных емкостях происходит десублимация ГФУ при охлаждении емкостей водным раствором CaCl₂ с температурой от 248 К до 258 К.

Во время работы КИУ и газодиффузионных очистительных каскадов возникает необходимость фракционной разгонки газовых смесей, образующихся в процессе производства. Газовые смеси возникают при тренировке емкостей с сырьевым ГФУ, или прокачке емкостей на коллекторах питания, отбора и отвала ЗРИ, а также при прокачке различных емкостей. Смеси газов, являющиеся отбором очистительных каскадов, также подвергаются фракционной разгонке. Основными компонентами образующихся смесей является ГФУ, НF, компоненты воздуха и другие неконденсируемые примеси в незначительном количестве. Сконденсированный ГФУ возвращается в технологическую цепочку, HF направляется на переработку, а компоненты воздуха и неконденсируемые примеси, проходя через узел защиты вакуумных насосов (УЗВН) и через специальную установку, выбрасываются в атмосферу.

1.1 Процесс фракционного разделения газовых смесей

Процесс разделения газовых смесей, образующихся при обогащении урана, производится прокачкой их через последовательно расположенные емкости, охлаждаемые до различных температур. Температура охлаждения емкости

определяется давлением насыщенного пара компонента газовой смеси, улавливаемого в данной емкости. Процесс фракционного разделения газовых смесей на ЗРИ производится в три ступени в термостатированных емкостях, на различных температурных уровнях: 253 К, 193 К, 77 К [5, 6, 7].

Температурный уровень 253 К предназначен для конденсации ГФУ в ёмкости. Охлаждение ёмкостей до температуры 253 К осуществляется рассолом [8], и в данной работе не рассматривается.

Температурные уровни 193 К и 77 К предназначены для вымораживания остатков ГФУ, так называемыми проскоками, и легких примесей. Охлаждение ёмкостей установки К–08 ОУ КИУ до температуры 193 К производится холодным воздухом [9]. На установке К–08 ОУ КИУ в режиме десублимации из потока газовой смеси улавливается ГФУ, при работе емкостей установки К–08 ОУ КИУ режиме сублимации осуществляется возврат целевого продукта в технологическую цепочку. В данной работе не рассматривается.

На установке К-09 ОУ КИУ в ОС, охлаждаемых жидким азотом до температуры 77 К, происходит десублимация проскоков ГФУ, НF и других примесей.

Принципиальная схема фракционного разделения приведена на рисунке 1.1. Технологические параметры работы каждой из ступеней схемы фракционного разделения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технологические параметры ступеней схемы фракционного разделения газовых смесей

№ ступени	Обозначение ступени	Объем емкости ступени, м ³ (л)	Хладагент	Температура стенки емкости, К	Давление в емкости, мм рт.ст.
1	ППЕ	2,5, 1, 0,8	Рассол	248 ÷ 258	менее 100
2	ПЕ	0,050 (50 л) 0,012 (12 л)	Холодный воздух	193 ÷ 213	менее 10
3	OC	0,024 (24 л)	Жидкий азот	77	менее 5

Температура предварительной охлаждения И давление газа В промежуточной емкости (ППЕ) и промежуточной емкости (ПЕ) выбраны таким образом, чтобы в них отсутствовали условия конденсации примесей. Давление в этих емкостях поддерживается меньше, чем упругость паров примесей при температуре стенок емкостей, но больше, чем упругость паров продукта при этой температуре. При таких условиях в емкостях конденсируется только ГФУ. В смеси, выходящей из ППЕ, содержание ГФУ уменьшается, его парциальное давление становится равным 1 ÷ 3 мм рт.ст. Остальное давление создают примеси. В ПЕ при температуре 193 ÷ 213 К вымораживаются остатки ГФУ и на выходе из ПЕ в газовой смеси остаются в основном примеси и следы ГФУ, которые называются проскоками. После ПЕ смесь поступает в ОС, которые охлаждаются жидким азотом, до температуры 77 К. В ОС происходит полное вымораживание проскоков ГФУ и большинства примесей, кроме воздуха и фтора, которые через химпоглотительные установки (ХПУ) откачиваются вакуумными насосами (ВН).



Рисунок 1.1 – Схема фракционного разделения газовых смесей

Технологическая цепочка разделения газовых смесей состоит из установок: 1. Установка К–08, предназначена для улавливания ГФУ из смесей, образующихся при тренировке и прокачке технологических емкостей с установок К–01, К–02, в ПЕ, охлаждаемых холодным воздухом с температурой 193 ÷ 213 К. 2. Установка К-04, предназначена для улавливания ГФУ из смесей, являющихся отбором очистительных каскадов в ПЕ, охлаждаемых холодным воздухом с температурой 193 ÷ 213 К.

3. Установка К–09, предназначена для улавливания проскоков ГФУ после установок К–04, К–08, а также улавливания НF, поступающего из емкостей питания и разделительных каскадов. В качестве устройств для десублимации компонентов газовой смеси применяются ОС объемом 24 л. [10], помещенные в отсек охлаждения [11] и охлаждаемые жидким азотом.

4. Химпоглотительная установка (ХПУ) или УЗВН, предназначенная для улавливания остатков газовой смеси на поглотителях с целью недопущения попадания их в вакуумные насосы и выброса в атмосферу.

5. Вакуумные насосы, предназначенные для откачки ёмкостей и коллекторов в процессе фракционного разделения.

1.2 Описание установки К-09 ОУ КИУ

В состав установки К–09 входят следующие технологические коллекторы, каждый из которых в двухтрубном исполнении (основной и резервный):

– Коллектор К–09–01 входит в систему откачки емкостей и трубопроводов коллектора К–01 подачи сырьевого ГФУ. В коллектор К–09–01 направляются газовые смеси, образующиеся при тренировке емкостей с сырьевым продуктом.

– Коллекторы К–09–02, К–09–05 входят в систему откачки емкостей и трубопроводов коллектора К–02 десублимации отборного ГФУ. Через коллектор К–09–02 ведется фракционное разделение смесей, поступающих с секций коллектора К–02

– Коллектор К–09–03 входит в систему откачки емкостей и трубопроводов коллектора К–03 десублимации отвального ГФУ. Через коллектор К–09–03 ведется фракционная разгонка смесей, поступающих с секций коллектора К–03. – Коллекторы К-09-04-1, К-09-04-2, К-09-04-3 входят в систему фракционного разделения отборных потоков очистительных каскадов ОК-1, ОК-2, ОК-3.

1.2.1 Узел защиты откачной системы

Для защиты окружающей среды, а также вакуумных насосов от агрессивных газов, перед вакуумными насосами всех коллекторов К–09 установлены химпоглотительные колонки. Для предотвращения попадания в полости вакуумных насосов сорбирующих веществ из поглотительных колонок последовательно за ними устанавливаются матерчатые фильтры из химически стойкой к агрессивным газам ткани, а также металлокерамические фильтры.

В качестве сорбентов в химпоглотителях применяются:

- алюмогель Al₂O₃;
- мраморная крошка CaCO₃ (МК);
- фтористый натрий NaF;
- XП–И Ca(OH)₂ (~96%) и NaOH (~4%);
- мерсеризованная древесина (МД, АМД).

Поглотитель в колонках подлежит замене после отработки определенного времени на сорбцию, в соответствии с «Графиком замены поглотителя на ОУ КИУ ЗРИ» [12]. Более подробно конструктивные особенности колонок с химическим поглотителем и фильтров рассмотрены в [13].

1.2.2 Характеристика и состав откачной системы

Одним из основных элементов откачной системы ОУ КИУ является вакуумные насосы, установленные на ресиверах нулевых приборных и регуляторных линий, на отсосных коллекторах после ОС всех технологических коллекторов установки К–09 ОУ КИУ. В технологической цепочке применяются насосы вакуумные золотниковые моделей: HB3–20, HB3–75, HB3–150, AB3–20, AB3–63, AB3–90, AB3–180. Конструкция, принцип действия и технические характеристики вакуумных насосов типов HB3, AB3 более подробно рассмотрены в [14].

За время эксплуатации насосов типа AB3, HB3 выявлен ряд недостатков, которые приводят к значительному сокращению срока службы насосов [15, 16]. Одним из недостатков является контакт вакуумного масла с рабочей средой, содержащей фтор и уран, что приводит к накоплению урана в вакуумном масле, разложению масла под воздействием фтора и необходимостью переработки б/у вакуумного масла[17].

Периодическая замена масла в вакуумных насосах производиться по «Графику замены масла в вакуумных насосах» [18, 19] и регистрируется в «Журнале учета вакуумного масла» [20].

1.3 Состав газовой смеси

На стадии обогащения урана по легкому изотопу применяется ГФУ, в котором постоянно присутствуют разнообразные примеси, молекулярная масса которых меньше массы ГФУ – так называемые легкие примеси. При этом содержание НF в ГФУ, значительно превышает суммарное содержание других примесей, HF поступает вместе с сырьем, а также образуется в технологической цепочке при попадании в оборудование влаги из воздуха. Подробно физические свойства компонентов газовой смеси описаны в [21, 22].

НF является основной примесью поступающей с $\Gamma \Phi Y$, а содержание легко летучих примесей в составе газовой смеси, таких как ClF₃, ClF, Cl₂, ClO₂, WF₆, NOFUF₆, NO₂FUF₆ незначительно.

Так же газовая смесь кроме примесей фтора, азота, кислорода, фтористого водорода, содержит летучие фториды: тетрафторид кремния (SiF₄), пентафторид фосфора (PF₅), гексафторид вольфрама (WF₆), пентафторид ванадия (VF₅),

гексафторид молибдена (MoF₆). Эти примеси трудно отделимы от ГФУ химическим путем и поступают вместе с сырьем.

Количество газовой смеси поступающей на установки разделения получено на основе данных по заполнению ОС на соответствующем коллекторе в период 2009–10гг., путем взвешивания ОС до и после отработки на конденсации. Расходы газовой смеси поступающей на установку фракционного разделения представлены в таблице 1.2.

Более подробно расходы смесей по каждому из коллекторов установки К-09 ОУ КИУ приведены в [23].

Varran	Расход смеси, кг/сутки					
коллектор	Минимальный	Расход смеси, кг/сут Средний 3,397 1,895 8,364 3,103 0,500 0,282 0,142 в ОС, вследствие	Максимальный			
К-09-01	0	3,397	16,833			
К-09-02	0	1,895	4,31			
К-09-05	0,035	8,364	97,7*			
К-09-03	0,028	3,103	30,2*			
К-09-04-1	0,373	0,500	0,629			
К-09-04-2	0,205	0,282	0,393			
К-09-04-3	0	0,142	0,400			
Примечание: эксплуатации установ	* накопление ГФУ вок разделения смесей.	в ОС, вследствие	неоптимального режима			

Таблица 1.2 – Расходы смесей веществ на коллекторах установки К-09

Приведем расход газовой смеси на коллекторах установки разделения исходя из среднесуточных величин натечек на ОС указанных установок после переработки содержимого ОС на сорбционной установке [24]. Данные приведены в таблице 1.3.

epeditecy to mbix beam mit nate tex						
	Средний расход газовой смеси, кг/сутки					
Период работы коллектора	К0901	К-09-04-1	К-09-04-2	К-09-04-3		
01.0131.12.2006	0,246	0,547	0,274	0,191		
01.0130.06.2007	0,322	0,472	0,222	0,261		
01.12.2007–30.06.2008	0,4	0,212	0,117	0,117		
01.06.2008 - 28.02.2009	0,376	0,328	0,129	0,103		
01.0430.06.2009	0,344	0,522	0,222	0,088		
01.0430.06.2009	0,344	0,522	0,222	0,088		
01.0130.06.2015	0,133	0,225	_	0,044		
Средний расход по	0.000	0.404	0.107	0.100		

Таблица 1.3 – Расходы смесей веществ на коллекторах установки К-09 исходя из среднесуточных величин натечек

Как видно из сравнения данных таблиц 1.2 и 1.3, расходы смеси полученные в результате взвешивания ОС больше расходов полученных по величинам натечек. Справедливо использовать данные полученные по результатам взвешивания, как более точные. При расчетах суточного расхода принимались данные для ОС, которые проработали в режиме конденсации не более месяца, тогда как в случае среднесуточной натечки принимались периоды работы от полугода до года.

0,309

коллектору

0,404

0,197

0,128

Для дальнейшей работы принимается расход газовой смеси поступающий в ОС (первый по ходу газа) равный 1 кг/сутки. Соотношение основных компонентов газовой смеси поступающей в ОС – НГ в количестве 90% и 10 % – компоненты воздуха и неконденсируемые примеси [23].

1.4 Обеспечение эксплуатации существующей схемы фракционного разделения

Приведем потребление материальных, трудовых и энергоресурсов необходимых для безотказной эксплуатации схемы фракционного разделения.

1.4.1 Применение жидкого азота

Процедура заливки жидкого азота весьма трудоемка, также при ее проведении существует вероятность получения травм, термических ожогов и т.д [25]. Для хранения и транспортировки жидкого азота используется множество различных сосудов, к которым предъявляются требования по обслуживанию и ремонту [26]. Также при доставке жидкого азота до потребителя производится несколько переливов из одного типа тары в другой, при которых в общей сложности происходит до 30% потерь от потребляемого количества жидкого азота.

Жидкий азот заливается в отсек охлаждения из переносных Дьюаров. Уровень жидкого азота при работе ОС поддерживается не ниже 1/3 высоты емкости. Норма заливки азота составляет 18 литров жидкого азота, в течение рабочей смены заливка жидкого азота производится дважды. Всего в составе установки 64 ёмкости. В работе постоянно находится до 18 ёмкостей.

В таблице 1.4 приведен расчет потребления жидкого азота для ведения технологического процесса на установке К-09 [27].

Потребление	Коллектор					
жидкого	K_09_01	K_09_02	K_09_03	K_09_05	K_09_04_1	K_09_04_3
азота, л	K 07 01	K 07 02	K-07-03	K 07 05	K-07-04-1	K-07-04-3
Январь	7700	8000	10000	6000	7200	7500
Февраль	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Март	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Апрель	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Май	7600	8000	10000	6000	7200	7500

Таблица 1.4 – Потребление жидкого азота на установке К-09 ОУ КИУ

Июнь	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Июль	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Август	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Сентябрь	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Октябрь	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Ноябрь	7600	8000	10000	6000	7200	7500
Декабрь	7600	8000	10000	6000	7200	7500

Окончание таблицы 1.4

Фактическое потребление жидкого азота за 2017 год для организации процесса фракционного разделения составило 624 565,7 кг.

1.4.2 Эксплуатационные затраты при ведении технологического процесса на установке К–09 КИУ

Операционные затраты на эксплуатацию установки К-09 ОУ КИУ складываются из:

– затрат на жидкий азот;

- затраты на ремонт технологического оборудования;

 – затрат на перевозку жидкого азота от станции перелива до конечного потребителя;

– трудозатраты на операции по заливке жидкого азота.



Рисунок 1.2 – Затраты на эксплуатацию существующей схемы

Как видно из рисунка 1.2, жидкий азот является основным источником затрат при эксплуатации установки К–09 ОУ КИУ.

Снижение операционных затрат и повышение культуры безопасности возможно при отказе от использования жидкого азота и применение альтернативного хладоносителя. Поиск хладоносителя способного удовлетворять требованиям существующей технологии и безопасности и при этом экономически оправданным является одной из приоритетных задач по снижению издержек разделительных производств.

При проведении испытаний ВХМ–0,54/0,6 на базе турбодетандерного агрегата [28] кратковременно была достигнута минимальная температура холодного воздуха равная 88 К. В данном режиме ВХМ может эксплуатироваться непродолжительное время, после чего необходима ее остановка, разморозка и продувка турбодетандерного агрегата от десублимированной влаги и углекислого газа. При повышении температуры холодного воздуха, генерируемого воздушнохолодильной машиной, до уровня 113 К, накопления влаги и углекислого газа в агрегатах ВХМ не происходит и машина способна работать в данном режиме продолжительное время. Более подробно конструкция и принцип работы ВХМ приведен в [29].

Учитывая потребление жидкого азота для ведения процесса фракционного разделения на установке К-09 ОУ КИУ, определим ориентировочное количество криогенных мощностей (ВХМ), необходимых для покрытия технологической нагрузки. Для охлаждения всей системы ОС на установке К-09 ОУ КИУ в 2017 году было израсходовано 624 565,7 кг жидкого азота, что в пересчёте на 29 716 836 [30] количество энергии составит ккал или 3 3 9 2 ккал/ч. Холодопроизводительность одной ВХМ равна 4 300 ккал/час, следовательно, для удовлетворения нужд производства, в работе необходимо иметь одну BXM (и одну в резерве).

Приведем сравнение затрат на эксплуатацию установки К–09 ОУ КИУ с применением в качестве хладоносителя жидкий азот и холодный воздух.

	Затраты, млн. руб. в год				
	Хладоноситель				
Статьи затрат	Wurrun abor	Холодный			
	Ладкий азот	воздух			
Жидкий азот	4,282	—			
Транспортировка жидкого азота	0,68	—			
Энергоресурсы		0.129			
(эл. энергия, охл. вода)	_	0,128			
Затраты на ремонт	0,258	0,041			
Трудозатрат на эксплуатацию	1,6	0,13			
Итого	6,82	0,299			

Таблица 1.5 – Сравнение затрат на эксплуатацию

Как видно из анализа таблицы 1.5 применение холодного воздуха в качестве хладоносителя позволит существенно снизить затраты на эксплуатацию схемы фракционного разделения ОУ КИУ ЗРИ.

1.5 Математическое моделирование процессов теплообмена в процессах десублимации компонентов газовых смесей

Одним из наиболее перспективных путей решения задач, стоящих перед производством, является создание математических моделей процессов теплообмена, протекающих на установках ОУ КИУ при сублимации и десублимации ГФУ и легких примесей [31], и предварительный расчетно-теоретический анализ процессов.

На сегодняшний день отсутствует единый подход к математическому моделированию процесса десублимации газовых смесей [32]. Существующие подходы можно условно разделить на две группы:

1. «Тепловой подход» – десублимация целиком определяется отводом тепла через стенку емкости и слой десублимата [33].

2. «Диффузионный подход» – вводится понятие пограничного слоя около поверхности раздела фаз [34], процесс десублимации определяется диффузионным обменом между поверхностью десублимации и газом, а

интенсивность процесса десублимации характеризуется величиной коэффициента диффузии.

Подробный обзор известных подходов к математическому моделированию процесса десублимации ГФУ представлен в работе [35].

В работе [32] разработана и реализована нестационарная математическая модель десублимации ГФУ в вертикальной емкости, учитывающая наличие конвекции и десублимации ГФУ на донной стенке емкости. С использованием полученной математической модели произведен расчет временных зависимостей скорости десублимации, толщины и массы образующегося слоя твердой фазы и распределения температуры в системе стенка емкости – слой десублимата с учетом нестационарности, связанной с изменением значений теплоемкости, теплопроводности и плотности ГФУ от температуры. Произведенный расчет динамики заполнения вертикальной емкости Б–12 твердым ГФУ показал, что представленная математическая модель адекватно описывает происходящие процессы тепло- и массопереноса.

По полученной в работе [36] математической модели процесса десублимации реализован пакет прикладных программ, произведен расчет временных зависимостей скорости десублимации, толщины И массы образующегося слоя твердого ГФУ и распределения температуры в системе стенка емкости – слой десублимата.

В случае использования холодного воздуха для охлаждения ОС в технологическом процессе ОУ КИУ для расчета процесса теплообмена холодного воздуха в трубопроводной сети схемы воздушного охлаждения установки К–09 целесообразно применить математическое моделирование нестационарных процессов теплообмена [37].

Задача расчета процесса теплообмена холодного воздуха в трубопроводной сети заключается в проведении численного анализа процессов теплообмена хладоносителя со стенками ОС при десублимации газа и трубопроводов, при температуре хладоносителя [38]. Моделирование нестационарных процессов течения охлажденного воздуха в разветвленной трубопроводной сети, воздушных

теплообменниках ОС, нестационарные процессы охлаждения стенок ОС с учетом тепловыделения при десублимации, охлаждения стенок трубопроводов подробно представлены в источниках [39–43].

Выводы по главе 1

Проведен анализ работы установки К–09 в составе ОУ КИУ ЗРИ. Рассмотрены режимы работы технологических коллекторов установки К–09 ОУ КИУ, предназначенных для фракционного разделения газовых смесей после тренировки и прокачки емкостей и коллекторов предназначенных для разделения смесей, поступающих с очистительных каскадов.

Рассмотрен состав газовой смеси поступающей на установку К–09 ОУ КИУ, определено соотношение основных компонентов в составе газовой смеси. Уточнены средние величины потоков газовых смесей, поступающих на установку К–09 ОУ КИУ. Средний расход смеси уточнен не только по данным о взвешивании ОС после снятия с технологических коллекторов установки К–09 ОУ КИУ и после их тренировки, но и исходя из среднесуточных величин натечек на ОС на соответствующих коллекторах, после переработки содержимого ОС на сорбционной установке.

Приведены затраты на эксплуатацию существующей схемы фракционного разделения газовых смесей на установке К–09 ОУ КИУ ЗРИ. Проведен сравнительный анализ затрат при применении в качестве хладоносителя для охлаждения ОС установки К–09 ОУ КИУ жидкого азота и холодного воздуха от ВХМ.

Исходя из проведенного анализа технологических процессов фракционного разделения на ЗРИ АО «СХК», анализа схем организации процессов на ОУ КИУ и оценки возможности применения более энергоэффективного способа охлаждения в схеме ОУ КИУ, в диссертационной работе ставится цель: обоснование возможности замещения жидкого азота холодным воздухом для охлаждения ёмкостей на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ АО «СХК». Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

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

2. Провести экспериментальные исследования влияния присутствия неконденсируемых примесей на процесс десублимации НF при имитации технологического процесса фракционного разделения газовых смесей с охлаждением холодным воздухом от ВХМ. Провести количественную оценку величины проскока HF через OC, 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 установки К–09 ОУ КИУ при существующей технологической нагрузке, с учетом потока тепла от десублимации газовой смеси и теплообмена оборудования с окружающей средой.

Глава 2 Экспериментальное измерение давления насыщенного пара основных компонентов газовой смеси

Как было упомянуто в пункте 1.4 главы 1, основными компонентами газовых смесей является ГФУ и НF. Проведенный анализ парциальных давлений основных компонентов газовой смеси показал, что давления компонентов в диапазоне температур 77 К ÷ 143 К пренебрежимо малы [44, 45].



Рисунок 2.1 – Парциальные давления основных компонентов газовой смеси

Существующий температурный уровень охлаждения в 77 К избыточен для ведения технологического процесса. Для достижения требуемых результатов ориентировочно необходимо иметь температуру в интервале 133 К ÷ 143 К.

В публикациях [46–49] рассмотрены перспективы использования холодного воздуха в качестве хладоносителя, при необходимости организации технологического процесса улавливания компонентов смеси при криогенных температурах. При этом одним из важнейших является вопрос о температурном уровне ведения процесса десублимации НF удовлетворяющего требованиям технологического процесса. В источнике [50] методом математического моделирования исследованы процессы десублимации НF на стенках OC. Целью исследований являлся прогноз определения количества HF в воздухе на выходе из охлаждаемого холодным воздухом OC. Проведен расчет изменения концентрации HF по высоте ёмкости при течении газовой смеси, состоящей из 90% – HF и 10% – компоненты воздуха, для случаев охлаждения ёмкости жидким азотом и холодным воздухом с температурой 113 К. Показано, что тепловое равновесие между температурой стенок ёмкости и температурой потока смеси газов устанавливается на одной трети пути газа по высоте ёмкости. Концентрация HF стремится к равновесному значению, соответствующему давлению насыщенных паров при температуре стенок ёмкости. Вследствие чего степень улавливания HF в OC будет определяться только давлением его насыщенных паров при температуре охлаждения стенки OC.

Оценку эффективности улавливания HF из газовой смеси целесообразно проводить по величине концентрации HF на выходе из OC. Для характеристики предельно возможного уровня содержания HF в газовой смеси на выходе из OC, удовлетворяющего требованиям существующего технологического процесса, применим понятие допустимая технологическая норма. Величину допустимой технологической нормы (ДТН) HF/ГФУ на выходе из OC примем исходя из характеристики XПУ, установленной после OC.

2.1 Измерение давления насыщенного пара HF

Проведенные расчеты по математической модели при охлаждении холодным воздухом и жидким азотом основывались на давлении насыщенного пара HF, определяемого по следующим формулам [51]:

$$lgP = A - \frac{B}{C+t} \tag{2.1}$$

$$lgP = D - \frac{E}{T} + F * lgT$$
(2.2)

где

t – Температура среды, °С;

Т – Температура среды, К;

 $A = 8,38036 \pm 0,10896;$

 $B = 1952,55 \pm 125,85;$

 $C = 335,52 \pm 8,15;$

 $D = -1,91173 \pm 1,02;$

 $E = -918,24 \pm 48,06;$

 $F = 3,21542 \pm 0,34672.$

Результаты расчетов давления паров НF по формулам 2.1, 2.2 в интервале температур 77 ÷ 193 К приведены на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Зависимость давления насыщенного пара HF от температуры, по формулам (2.1), (2.2)

Формулы (2.1), (2.2) справедливы для температуры в диапазоне 273 ÷ 378 К.

Анализ научно-технических источников показывает, что данные, полученные экспериментальным путем, по давлению насыщенных паров HF при температуре ниже 193 К отсутствуют. Для проведения расчетов по степени улавливания HF в OC необходимо получить экспериментальные данные о давлении насыщенного пара HF при температурах от 77 до 223 К.

Для получения экспериментальных данных, поставлена задача ПО разработке опытного стенда, требованиям. конструкции отвечающего предъявляемым к условиям эксплуатации при десублимации HF. Для максимальной его унификации с используемыми в промышленности решениями, целесообразно в качестве сосуда для десублимации HF использовать OC объемом 24 л. по черт.322-06-0006, помещенный во вновь разработанный отсек охлаждения [52]. Отсек охлаждения предназначен для установки в него сосуда для десублимации компонентов газовой смеси. Охлаждение сосуда производится путем подачи холодного воздуха от ВХМ в нижнюю часть отсека. Далее, из нижней части отсека воздух поступает в спиральный канал сосуда охлаждения. Протекая по спиральному каналу воздух охлаждает сосуд по всей его высоте и выходит в верхней части отсека через патрубок и возвращается в ВХМ. Для снижения потерь тепла в окружающую среду выполнена теплоизоляция наружной поверхности отсека с применением современных вспененных материалов [53]. Толщина теплоизоляции выбрана исходя температуры наружной ИЗ на поверхности теплоизоляции не менее 293 К.

С учетом теоретических данных величины давлении насыщенного пара HF находятся в диапазоне до 1 мм рт.ст. Принимая во внимание столь малые величины давления, особое внимание стоит уделить подбору средств измерений давления и их метрологическим характеристикам. Перечень применяемых средств измерений и их характеристики представлены в таблице 2.1.

Контролируемы й параметр	Наименование и тип прибора	Предел, единица измерения	Погрешность измерения, единица измерения
Давление в	Мерадат – ВИТ, вакуумметр комбинированный ионозационно-тепловой [54]	1·10 ⁻⁴ ÷ 0.2, мм. рт.ст.	± 30 %
нулевой полости	ПМТ–4М, преобразователь манометрический тепловой термопарный [55]	1·10 ⁻³ ÷ 0,2 мм. рт.ст.	± 30 %
Давление в напускном патрубке	ОМ–6–50, оптический манометр [56]	от 0 до 50 мм. рт. ст.	1%
	Метран–100 [57]	0÷10 кПа	± 1 %, кПа
Давление в	TELEVAC MP4AR, моноблочный конвекционный вакууметр [58]	0÷10 мкм. pt.ct. 10 ⁻² ÷10 мм. pt.ct. 10÷100 мм. pt.ct. 100÷1000 мм. pt.ct.	±1 мкм рт.ст. ± 10 % ± 20 % ± 10 %
стенде	Мерадат – ВИТ, вакуумметр комбинированный ионозационно-тепловой	1·10 ⁻⁴ ÷ 0.2, мм. рт.ст.	± 30 %
	ПМТ–6–3М–1, преобразователь манометрический терморезисторный [59]	1·10 ⁻² ÷ 75 мм. рт. ст.	± 30 %
	ОМ–7, оптический манометр [60]	от 0 до 1 мм. рт.ст.	2,5%

Таблица 2.1 – Перечень применяемых средств измерений и их характеристики

Для измерения давления насыщенных паров безводного HF был разработан и изготовлен опытный стенд [61].

Опытный стенд (рисунок 2.3) состоит из перевернутой вверх днищем ОС (1) объемом 24 л, помещенной в специально разработанный отсек охлаждения, покрытый слоем теплоизоляции (2).



Рисунок 2.3 – Схема стенда по измерению давления насыщенных паров HF

Отсек охлаждения имеет два патрубка (3): нижний – для подачи охлажденного воздуха от ВХМ и верхний – для возврата нагретого воздуха из отсека в ВХМ. Для организации равномерного течения холодного воздуха вдоль ОС, на стенке отсека охлаждения, изготовлена напайка (4) из стальной ленты в виде серпантина. ОС имеет два патрубка. К одному из патрубков посредством медной трубки подсоединяется емкость объемом 0,5 л с безводным HF (5). Ко второму патрубку посредством коллектора подключены приборы измерения абсолютного и относительного давления в стенде. Также ко второму патрубку подключена система вакуумирования стенда.

В качестве приборов измерения абсолютного давления используются моноблочный конвекционный вакууметр Televac MP4AR (6) и Метран–100 (7). В качестве приборов измерения относительного давления используются оптические манометры OM–7 и OM–6–50. Для контроля разряжения в стенде используется мановакууметр (8). Для поддержания минимального давления в нулевых полостях оптических манометров используется нулевая система, которая включает в себя ресивер (9) объемом V = 20 л, для снижения пульсаций давления, и
турбомолекулярный вакуумный насос (10) [62]. Давление в нулевой системе контролируется по показаниям моноблочного конвекционного вакуумметра Televac MP4AR (6),преобразователя И манометрического теплового термопарного ПМТ-4М (11) в паре с вакуумметром комбинированным ионозационно-тепловым Мерадат – ВИТ. Откачка стенда производится вакуумным насосом АВЗ-20 (13) через узел защиты вакуумного насоса (14).

Для проведении работ использовали безводный НF марки "А" [63]. Емкость объемом 0,5 л с безводным HF была подсоединена к экспериментальной установке, установка была вакуумирована до давления не более 50 мкм рт.ст. и проверена на вакуумную плотность. Путем троекратного напуска и откачки безводного фтористого водорода в установку были пропассивированы внутренние поверхности установки. При проведении эксперимента по измерению давления насыщенного пара безводного HF OC промораживалась холодным воздухом, подаваемым от ВХМ, до температуры от 88 до 93 К не менее 2 часов. Безводный HF из емкости объемом 0,5 л подавался в ОС дросселированием вентиля на емкости. После выдержки в течение 10 минут регистрировалось давление в стенде по показаниям приборов, а также температура подаваемого ВХМ холодного воздуха. Увеличивалась температура подаваемого ВХМ воздуха на 10 К, после отогрева ОС в течении одного часа фиксировалось давление в стенде. Измерение давления производилось в интервале температур 88 – 193 К с шагом в 10 К. При необходимости в ОС подавалось дополнительное количество фтористого водорода для обеспечения насыщения.

Экспериментальное измерение давления насыщенных паров HF в области низких температур более подробно описано в статье [64].

В ходе проведения эксперимента было проведено три цикла измерения давления насыщенного пара безводного НF в диапазоне температуры 88–190 К. а Результаты эксперимента по измерению давления насыщенного пара HF представлены в таблице 2.2.

Номер опытной работы					
1		2		3	3
Т, К	Р, Па	Т, К	Р, Па	Т, К	Р, Па
88,1	0,27	91	0,54	88,3	0,27
106,6	0,32	103,2	0,49	103,4	0,20
111,9	0,29	113,3	0,44	113,5	0,15
124,4	0,37	125,1	0,52	125,4	0,10
134,8	0,32	134,3	0,48	134,8	0,05
144,3	0,41	143,3	0,58	142,9	0,28
156,1	1,16	155,3	1,19	155,8	1,03
164,1	3,79	162,4	3,83	163,9	3,79
177,7	35,45	175,8	31,23	172,8	16,01
187	145,78	184,9	119,17	181,3	65,56
194,7	385,69	200,2	558,99	191,8	305,72
204,4	945,50	_	_	_	_
218	2305,10	—	_	—	_

Таблица 2.2 – Результаты эксперимента по измерению давления насыщенного пара HF [65]

По экспериментальным данным, приведенным в таблице 2.2, методом наименьших квадратов найдено уравнение прямой [66–68], описывающей зависимость $\ln(P)$ от (1/T) и получена эмпирическая зависимость давления насыщенного пара безводного НF в интервале температуры 140 ÷ 190 К.

Давление насыщенного пара безводного HF определяется выражением:

$$P = 1.4879 \cdot 10^{11} e^{-3911.2/T}, \ [P] = \Pi a, \ 140 \le T \le 190 \ K$$
(2.3)

По экспериментально полученным данным определим давление насыщенного пара HF которое будет соответствовать допустимой технологической норме HF, по формуле:

$$P_{\rm HF} = v_{\rm HF} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{T} \tag{2.4}$$

где $v_{\rm HF}$ – молярная концентрация HF, моль/м³;

При давлении насыщенного пара НF равного 0,0619 Па концентрация HF будет соответствовать допустимой технологической норме, величина давления HF соответствует температуре равной 104,2 К по формуле (2.1), тогда как по экспериментальной зависимости (2.3) соответствие концентраций HF будет достигнуто при температуре 137 К.

На рисунке 2.4 приведено сравнение зависимости давления насыщенного пара HF от температуры по формуле (2.1) и экспериментально полученной зависимости по формуле (2.3). Для наглядности приведен интервал температур 103÷153 К.



Рисунок 2.4 – Зависимость давления насыщенного пара HF от температуры

Как видно из сравнения рисунков 2.2 и 2.4 результаты расчетов давления насыщенного пара HF, вычисляемые по формулам (2.1) и (2.3) имеют существенные различия при одинаковой температуре. Принимая во внимание, что приведенные значения давления насыщенного пара HF при отрицательных температурах получены экстраполяцией формулы (2.1), а формула (2.3) получена в результате экспериментальных работ и справедлива в интервале температур 140 ÷ 190 К. Погрешность значений вычисленных температур, при использовании в расчетах формулы (2.3) значительно меньше, чем при использовании формулы (2.1).

Приведем значения величин давления насыщенного пара HF при интересующих нас температурах в таблице 2.3.

	Теоретиче (по форм	ские данные муле (2.1))	Экспериментальные данные (по формуле (2.3))		
	Температура,	Давление, мм.	Температура,	Давление, мм.	
	К	рт.ст. (Па)	К	рт.ст. (Па)	
Холодный	112	0,0018	112	0,00104	
воздух	115	(0,24)	115	(0,138)	
Жидкий	77	$0,243*10^{-5}$	77	$9,75*10^{-11}$	
азот	//	$(0,324*10^{-3})$	11	$(1,3*10^{-17})$	
ΠΤΠ	104.2	$0,465 \times 10^{-3}$	127.2	$0,465*10^{-3}$	
ДІП	104,2	(0,062)	137,2	(0,062)	

Таблица 2.3 – Давление насыщенного пара HF

Как видно из таблицы 2.3, давление паров НF при температуре в 77 К пренебрежимо мало. Различие в температуре, при которой достигается соответствие концентраций, вычисленной по формулам (2.1) и (2.3) составляет более 30 градусов. По экспериментально полученной формуле (2.3) при температуре равной 137 К концентрация HF будет соответствовать требованиям технологического процесса.

2.2 Измерение давления насыщенного пара ГФУ

2.2.1 Теоретические данные о давлении насыщенных паров ГФУ

Определим давление насыщенного пара ГФУ как одного из основных компонентов газовой смеси. Давление насыщенного пара ГФУ определяется по формуле [69]:

$$lgP = 11,19 - \frac{2714}{T} \tag{2.5}$$

Результаты расчета давления паров ГФУ по формуле (2.5) в интервале температур 133 – 253 К приведены в таблице 2.4.

Температура	Давление		
К	мкм. рт. ст.	Па	
253	2902,2	385,993	
243	1050,2	139,678	
233	348,2	46,322	
223	104,6	13,914	
213	28,068	3,733	
203	6,615	0,880	
193	1,342	0,179	
183	0,229	0,030	
173	0,032	0,00423	
163	0,00346	$0,46*10^{-3}$	
153	$0,28*10^{-3}$	$0,38*10^{-4}$	
143	$0,16*10^{-4}$	0,216*10 ⁻⁵	
133	$0,6*10^{-6}$	$0,809*10^{-7}$	

Таблица 2.4 – Давление насыщенного пара ГФУ

Как видно из таблицы 2.4 давление насыщенного пара ГФУ при температуре 153 К и ниже пренебрежимо мало.

По результатам расчетов определено, что концентрация ГФУ будет соответствовать допустимой технологической норме при температуре равной 157 К.



Рисунок 2.5 – Зависимость давления паров ГФУ от температуры

Для подтверждения полученных результатов были проведены экспериментальные измерения давления насыщенного пара ГФУ.

2.2.2 Опытный стенд для измерения давления насыщенного пара ГФУ

Экспериментальные измерения давления насыщенного пара ГФУ при температуре ниже 253 К проводились на существующем опытном стенде, на котором ранее были проведены работы по измерению давления насыщенных паров HF. Взамен емкости с безводным HF была подсоединена емкость с обедненным по изотопу U^{235} ГФУ, объемом 0,5 л. Принципиальная схема опытного стенда представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Принципиальная схема опытного стенда измерению давления насыщенных паров ГФУ

Конструктивное устройство, приборы измерения и их метрологические характеристики идентичны, что и при проведении работ по измерению давления насыщенного пара HF.

2.2.3 Методика проведения экспериментального измерения давления насыщенного пара ГФУ

Емкость объемом 0,5 л (5) с обедненным по изотопу U²³⁵ ГФУ была подсоединена к экспериментальному стенду, стенд отвакуумирован до давления не более 50 мкм рт.ст. и проверен на вакуумную плотность.

Опытная работа по измерению давления насыщенного пара ГФУ производилась в следующем порядке:

1. ОС (1) промораживался холодным воздухом, подаваемым от ВХМ, до температуры 190 К, не менее 2 часов.

2. Исходное вещество (ГФУ) из емкости (5) подавалось в ОС (1).

3. После выдержки в течение 10 минут регистрировалось давление в стенде по показаниям приборов, а также температура подаваемого от ВХМ холодного воздуха.

4. Повышалась температура подаваемого от ВХМ воздуха на 10 К.

5. После выдержки в течение одного часа после повышения температуры, фиксировалось давление в стенде и в нулевой линии.

6. Вновь повышалась температура воздуха от ВХМ и после выдержки, фиксировалось давление, аналогично пункту 5.

7. При достижении температуры равной 253 К, производилась прокачка стенда вакуумным насосом (13) до минимального давления.

8. OC (1) вновь промораживался аналогично пункту 1 и процесс измерения повторялся.

2.2.4 Результаты экспериментального измерения давления насыщенного пара ГФУ

В ходе проведения эксперимента было выполнено три цикла измерения давления насыщенного пара ГФУ в диапазоне температуры 210÷253 К. Результаты измерений представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты экспериментального измерения давления насыщенного пара ГФУ

	Дата измерения										
	12.08	.2015г.			20.08.	2015г.			25.08.2015г.		
Темпе	ература	Давл	ение	Темпеј	ратура	Давл	тение	Температура		Давление	
t, °C	Т, К	мкм. рт. ст.	Па	t, °C	Т, К	мкм. рт. ст.	Па	t, °C	Т, К	мкм. рт. ст.	Па
-20	253	3100	413,2	-19,9	253,1	3200	426,5	-20,2	252,8	3350	446,5
- 23,2	249,8	2611	348	-28,5	244,5	1400	186,6	-32,9	240,1	800	106,6
- 31,6	241,4	1208	161	-53,4	219,6	273	70,6	-40,4	232,6	444	59,2
- 41,8	231,2	670	89,3	-61,8	211,2	199	36,3	-51	222	233	31
-54	219	360	47,9					-60	213	105	13,9
-63	210	261	34,7								

Измеренные величины давления насыщенного пара ГФУ при температуре менее 243 К отличаются. Так давление пара ГФУ измеренное 25.08.2015г. существенно ниже, чем 12.08.2015г. и 20.08.2015г. при соответствующей температуре. Проведем сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими данными по формуле 2.5.

На рисунках 2.7–2.9 представлены графики зависимости $\ln(P)$ от (1/T), построенные по данным экспериментальных измерений.



Рисунок 2.7 – График зависимости $\ln(P)$ от (1/T), измерения от 12.08.2015 г.



Рисунок 2.8 – График зависимости $\ln(P)$ от (1/T), измерения от 20.08.2015 г.



Рисунок 2.9 – График зависимости $\ln(P)$ от (1/T), измерения от 25.08.2015г.

По экспериментальным данным методом наименьших квадратов найдено уравнение прямой, описывающей зависимость $\ln(P)$ от (1/T), уравнение имеет вид:

- измерения 12.08.2015г.:

$$Ln (P) = 18,183 - 3155,5/T$$
(2.6)

- измерения 20.08.2015г.:

$$Ln (P) = 19,798 - 3522/T$$
 (2.7)

- измерения 25.08.2015г.:

$$Ln (P) = 23,596 - 4489,3/T$$
(2.8)

Давление насыщенного пара ГФУ определяется выражениями, где [P] = Па, в диапазоне температуры 210–253 К:

- измерения 12.08.2015г.:

$$P = 7,88 * 10^7 * e^{\frac{-3155,5}{T}}$$
(2.9)

- измерения 20.08.2015г.:

$$P = 3,96 * 10^8 * e^{\frac{-3522}{T}}$$
(2.10)

- измерения 25.08.2015г.:

$$P = 1,77 * 10^{10} * e^{\frac{-4489,3}{T}}$$
(2.11)

Приведем сравнение результатов вычисления давления насыщенных паров ГФУ, теоретических данных вычисленных по формуле (2.5) и экспериментальных данных вычисленных по формулам (2.9) – (2.11) на рисунке 2.10 и таблице 2.6.



Рисунок 2.10 – Зависимость давления насыщенного пара ГФУ от температуры, экспериментальные и теоретические данные

			Давление, Па	
Т, К	Экспе	риментальные	данные	Теоретические данные
	12.08.2015	20.08.2015	25.08.2015	Формула (2.5)
253	301,9	356,4	348,1	386,9
248	234,8	269,2	243,4	235,1
243	180,7	201,0	167,7	140,0
238	137,6	148,2	113,8	81,6
233	103,5	107,9	75,9	46,4
228	76,9	77,4	49,7	25,8
223	56,4	54,8	32,0	13,9
218	40,8	38,1	20,2	7,3
210	23,5	20,6	9,2	2,5

Таблица 2.6 – Результаты экспериментальных измерений

2.2.5 Выводы по измерению давления насыщенного пара ГФУ

Как видно из анализа таблицы 2.6 и рисунка 2.10, величина давления насыщенного пара ГФУ, вычисленная по формуле (2.5) значительно меньше величины давления, полученной по экспериментальным данным, при соответствующей температуре. Максимальное отличие наблюдается при температуре ниже 233 К. Так же имеет место значительный разброс данных о давлении насыщенного пара при разных циклах экспериментального измерения, при соответствующей температуре.

Такой разброс полученных данных может быть объяснен, как натечкой воздуха в стенд во время проведения экспериментальных работ, которая внесла существенные искажения при измерении столь малой величины давления, так и тем, что величины давления насыщенного пара ГФУ при соответствующей температуре ниже чувствительности моноблочного конвекционного вакууметра TELEVAC MP4AR.

Исходя из полученных результатов измерения давления насыщенного пара ГФУ, предлагается принимать величины давления паров ГФУ, вычисленные по формуле (2.5). Исходя из расчетно-экспериментальных измерений давления насыщенных паров, видно, что при температуре равной 137 К концентрация НF будет соответствовать безопасной технологической норме, концентрация ГФУ при температуре 157 К. Таким образом, снижение температуры ниже 137 К при охлаждении ОС не целесообразно и энергетически не эффективно. За эффективный температурный уровень принимается уровень равный 137 К.

Повышение точности измерения давления насыщенного пара ГФУ возможно при выполнении следующих условий:

– использование приборов измерения давления (вакууметров) с большей чувствительностью. Например, моноблочный широкодиапазонный вакууметр Televac CC–10, с диапазоном измерений до 10⁻⁹ мм. рт.ст. [70].

– длительная и глубокая прокачка экспериментального стенда и коммуникаций между циклами измерений;

 проведение вакуумных испытаний между циклами измерений, для определения плотности вакуумных коммуникаций и возможности натечки «легких» примесей в стенд.

2.3 Опробование холодопроизводительности ВХМ

Для определения технической возможности использования ВХМ–0,54/0,6 для охлаждения технологических емкостей, таких как ПЕ и ОС до температуры в 137 К проведены промышленные испытания ВХМ–054,0,6. Испытания проводились на технологическом коллекторе К–08–01 КИУ участка «Челнок» ЗРИ.

В испытаниях было задействовано следующее оборудование:

– BXM №5;

- две ПЕ, объемом 50 л. каждая, на коллекторе К-08-01 КИУ;

- осушитель адсорбционный DRE/E-350 №1.

Во время проведения испытаний регистрировались следующие параметры:

- температура на выходе и входе в ВХМ, обороты турбодетандера ВХМ;

– температура внутри ПЕ на технологических точках №1 и №3 коллектора К–08–01, с помощью термометра сопротивления ТСП с нижним диапазоном измерения 73 К [71].

На рисунке 2.11 представлена принципиальная схема охлаждения ПЕ.



Рисунок 2.11 – Схема охлаждения ПЕ

Регистрация температуры воздуха ВХМ производилась на местном щите управления ВХМ №5, а температура ПЕ регистрировалась на щите АКСУ «ФОБОС».

Таблица 2.7 – Температура в	эздуха

	Температура, К						
Время	на выходе из	на входе в ВХМ	Средняя	Точка	Точка		
	ВХМ (напор)	(возврат)	(в ПЕ)	№ 1	N <u></u> 23		
10 ^{<u>25</u>}	249,4	291,6	—	—	—		
10^{35}	217,3	286,5	_	_	_		
10^{50}	205	273	—	257	259		
$12^{\underline{25}}$	149,3	181	165,15	211,5	201,7		
12^{30}	145,1	177,7	161,4	211	201		
12^{40}	143	173	158	199,1	190,8		
13 <u>00</u>	136	160,4	148,2	182,6	175,9		
13^{10}	135,1	158,2	146,65	178	171,1		
$15^{\underline{50}}$	124,6	139,4	132	159	155		

В 15⁵⁰ ВХМ № 5 была остановлена, закрыта подача сжатого воздуха и охлаждающей воды. При температуре холодного воздуха в диапазоне 124,6 ÷ 143 К от ВХМ, обороты турбодетандера составляли 110÷117 тыс. об. в мин., температура подшипникового узла не более 303 К. Уставки срабатывания аварийной защиты на ВХМ №5 равны, по оборотам турбодетандера 145 тыс. в мин, по температуре подшипникового узла 318 К.

В результате испытаний с помощью ВХМ №5 были охлаждены две ПЕ на технологических точках №1 и №3 коллектора К–08–01. Как видно из таблицы 2.7, показания термометров сопротивления на точках №1 и №3 отличаются, что может быть вызвано, различием гидродинамики течения холодного воздуха в коммуникациях охлаждения. Так же видно различие температур по показаниям термометров сопротивления и воздуха на входе в ВХМ (возвратного, отходящего от ПЕ). Данное различие объясняется, тем, что вследствие разряженной среды в ПЕ (откачана до давления не более 10 мм рт. ст.), отсутствовал теплообмен датчика термометров сопротивления с внутренним откаченным объемом ПЕ, теплообмен осуществлялся по захоложенной стенке ПЕ к гильзе термометра. Показания термометров сопротивления на точках №1 и №3, не отражают действительной температуры ПЕ. С учетом приведенных фактов, предлагается для определения температуры ПЕ в дальнейшем принимать среднее значение между температурами выхода и входа воздуха в ВХМ.

В процессе проведения работ выявлены значительные теплопотери через неплотности в изоляции ПЕ (рисунок 2.12) и локальное обмерзание коммуникаций ВХМ (рисунок 2.13).





Рисунок 2.12, а, б – Обмерзание поверхности ПЕ



a)



б)



Рисунок 2.13, а, б, в – Локальное обмерзание коммуникаций ВХМ

По результатам испытаний можно сформулировать следующие выводы:

1. Холодопроизводительности одной ВХМ–0,54/0,6 достаточно для охлаждения двух ПЕ до температуры 132 К. Время достижения температуры 132 К, составило чуть более 5 часов. Так как суммарный объем двух ПЕ составляет 100 л., то холодопроизводительности одной ВХМ достаточно для охлаждения не менее четырех ОС объемом 24 л на установке К–09 ОУ КИУ.

2. Выявленные теплопотери приводят к повышению температуры возвратного воздуха в ВХМ и к последующему повышению температуры воздуха поступающего в турбодетандерный агрегат ВХМ, что снижает КПД турбодетандерной установки ВХМ.

3. Улучшение теплоизоляционного слоя положительным образом скажется на энергоэффективности процесса охлаждения воздуха в турбодетандерном агрегате BXM, в таком случае возможно получение более низких температур воздуха на выходе BXM.

Выводы по главе 2

Приведены результаты исследования процессов тепло- массобмена в ОС при охлаждении жидким азотом и холодным воздухом. В результате установлено, что степень улавливания компонента газовой смеси в ОС будет определяться только давлением насыщенного пара этого компонента при температуре охлаждения стенки ОС.

По полученной зависимости давления насыщенного пара безводного HF в интервале температуры 140 ÷190 К, подтвержденной экспериментальными работами расчетным путем определена требуемая температура охлаждения OC, при которой концентрация HF будет удовлетворять требованиям технологического процесса.

Разработана методика экспериментального измерения давления насыщенного пара ГФУ на существующем опытном стенде.

Проведено три цикла экспериментальных измерений давления насыщенного пара ГФУ. Полученные результаты сравнены с теоретическими данными о давлении насыщенных паров ГФУ. Величина давления насыщенного пара ГФУ по теоретическим данным меньше величины давления, полученной по экспериментальным данным, при соответствующей температуре.

Данные о давлении насыщенного пара ГФУ принимаются в соответствии с теоретическими данными.

По результатам расчетно-экспериментальных работ установлено, что для достижения требуемых технологических параметров достаточно иметь температуру не выше 137 К.

По результатам испытаний установлено, что холодопроизводительности ВХМ–0,54/0,6 достаточно для охлаждения технологических емкостей до температуры 132 К.

Глава 3 Результаты экспериментов по оценке возможности применения воздушного охлаждения в процессе фракционного разделения газовых смесей

При использовании холодного воздуха для охлаждения ОС одним из приоритетных вопросов является вопрос о величине температурного уровня ведения процесса фракционного разделения, удовлетворяющего технологическим требованиям. Для оценки возможности применения воздушного охлаждения в процессе фракционного разделения и подтверждения полученных теоретических результатов о величине эффективного температурного уровня проведена серия экспериментов.

3.1 Описание эксперимента по оценке влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации HF

В источниках [74–75] приводятся оценки величин проскоков HF через OC. Согласно [74] применение жидкого азота в качестве хладагента обеспечивает степень очистки газовой смеси от HF в пределах 70–90%, рассмотренные процессы улавливания HF сопровождаются проскоками HF, составляющими в лучших случаях не менее 10% общего расхода газовой смеси. Тогда как в [75] упоминается, что при охлаждении холодным воздухом с температурой 103 К, величина проскока HF будет составлять 30–40% общего расхода газовой смеси. Обобщенных данных о количествах проскока HF через OC в рассмотренных источниках не представлено. Можно сделать вывод, что минимально возможный проскок через OC, составляет не менее 10 % от общего расхода газовой смеси на входе в OC.

Целью проведения эксперимента являлось определение величин проскока НF через OC, охлаждаемый холодным воздухом до температуры 137 К и влияние неконденсируемых примесей на процесс десублимации одного из основных компонентов газовой смеси при воздушном охлаждении OC [76].

Эксперимент проводился на опытном стенде [77, 78] с конструкционными изменениями. Схема опытного стенда приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Принципиальная схема опытного стенда

УЗВН опытного стенда был дополнен ХПУ. ХПУ представляет собой колонку объемом 6 л., наполненную химическим поглотителем известняковым.

Перечень используемых средств измерения аналогичен средствам измерений, используемых в экспериментальных работах по определению давления насыщенного пара HF (глава 2).

Опытный стенд (рисунок 3.1) состоит из перевернутого вверх днищем ОС (2), помещённого в специально разработанный отсек охлаждения (4). Сосуд охлаждения в сборе с отсеком охлаждения, покрытый слоем низкотемпературной теплоизоляции ArmaFlex. Отсек охлаждения имеет два патрубка: нижний для подачи охлажденного воздуха от воздушной холодильной машины (ВХМ) и верхний для возврата нагретого воздуха из отсека в ВХМ. Для организации равномерного течения холодного воздуха вдоль стенки отсека охлаждения изготовлена напайка из стальной ленты в виде серпантина. ОС (2) имеет два патрубка. К напускному патрубку посредством коллектора подсоединяется емкость объемом 6 л с безводным HF (1) и напускное устройство (3). К отсосному патрубку посредством коллектора подключены приборы измерения давления: мановакууметр (5); оптический манометр ОМ-6-50 (6); оптический манометр OM-7-1 (7); вакуумметр Televac MP4A (8). К отсосному патрубку подключена система откачки, соединенная металлическим трубопроводом и включающая ОС (9), помещенный в отсек охлаждения (14); УЗВН, состоящий из колонки с химическим поглотителем известковым (ХПИ) (10); вакуумный насос BH-1 (BH) (11).

3.2 Методика проведения эксперимента по оценке влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации HF

Методика проведения эксперимента заключалась в имитации проточной схемы десублимации HF через OC, используемые в схеме фракционного разделения, но при охлаждении холодным воздухом от BXM.

В напускной патрубок опытного стенда через коллектор подавалась газовая смесь HF и воздуха (в соотношении 90 % HF и 10 % воздуха) с расходом, близким существующего к величине технологического процесса. Расход HF поддерживался с помощью критической шайбы (12), а расход воздуха с помощью напускного устройства (3), отрегулированного на расход воздуха G = 0,1 кг/сутки. Для проведения опытов использовали безводный HF марки «А», что соответствует содержанию основного вещества 99.9 мас.% и осушенный воздух, с точкой росы минус 70 °C. Коммуникации стенда были отвакуумированы до давления не более 90 мкм рт. ст. и проверены на вакуумную плотность. Путем трёхкратного напуска и откачки безводного HF в коммуникации стенда была проведена пассивация внутренних поверхностей установки. Перед проведением работ выполнено взвешивание OC (9) и емкости с HF (1) на весах Metler-Toledo [79]. Предварительно ОС (9) была охлаждена жидким азотом до температуры 77 К, ОС (2) охлаждена воздухом, генерируемым ВХМ до температуры 136 К, ВН (11) включен в работу. Температура стенки ОС определялась как средняя температура между температурой подачи и возвратом воздуха в ВХМ.

После окончания подготовительных работ открывались вентили подачи воздуха (16) и HF (15). Давление в напускном коллекторе до шайбы (12) поддерживалось равным 30 мм рт.ст., в откачном коллекторе давление соответствовало технологическому процессу 1 мм рт.ст. Напуск газовой смеси продолжался не менее 8 часов, во время которых периодически подливался жидкий азот в отсек охлаждения (14).

По истечении заданного времени, закрывалась подача воздуха (16) и HF (15), коммуникации стенда откачивались в ОС (9). Подача холодного воздуха в отсек охлаждения прекращалась. ОС (9) отсоединялась и изымалась из отсека охлаждения (14) для отогрева. После отогрева, ОС (9) и ёмкость с HF (1) взвешивались на весах, по разнице с первоначальным весом, определялось количество испитанного HF и количество проскока HF в ОС (9).

Проверка количества десублимированного HF в OC (2) производилась следующим образом: после отогрева OC (2) выполнялась переконденсация HF во

вновь установленную ОС (9). ОС (9) была предварительно взвешена и охлаждена жидким азотом в отсеке охлаждения (14). Коммуникации откачной системы до вентиля (17) откачивались ВН (11) до давления не более 1 мм рт.ст., после чего закрывался вентиль (18) на вновь установленной ОС (9) и открывался вентиль (17) для переконденсации НF из ОС (2). После переконденсации ОС (9) изымалась из отсека охлаждения (14), отогревалась и взвешивалась, по разнице с первоначальным весом определялось количество десублимированного HF в ОС (2).

3.3 Результаты эксперимента по оценке влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации HF

Было проведено три цикла измерений. Материальный баланс веществ подводился путем взвешивания емкости с HF (1) до и после напуска в стенд, по разнице с первоначальным весом определялось количество испитанного HF. Количество HF сконденсированного в OC (2) стенда определялось по разнице веса OC (9), охлаждаемой жидким азотом, до и после переконденсации HF из OC (2). Переконденсация HF из OC (2) производилась после ее отогрева до температуры помещения (298 K), но не ранее чем через 24 часа после переконденсации HF в него производилось так же не менее чем через 24 часа после переконденсации HF в него производилось так же не менее чем через 24 часа после после прекращения заливки жидкого азота в отсек охлаждения (14).

Величина проскока HF через OC, охлаждаемую холодным воздухом, определялась как разница между количеством испитанного HF из емкости (1) и количеством HF сконденсированного в OC (9), с учетом изменения его веса после завершения напуска. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента по оценке влияния не конденсируемых газов на процесс десублимации HF

Покоротоци	Номер эксперимента			
Показатели	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	3,67	0,26	1,50	
% от количества испитанногоНF	0,87%	0,07%	0,38%	

Анализ таблицы 3.1 показывает, что наличие неконденсируемых газов не оказывает влияния на процесс десублимации НF при охлаждении OC воздухом с температурой 137 К. Величина несоответствия количества испитанного HF из емкости и десублимируемого HF в OC составляет менее 1%, что может быть объяснено погрешностью средств измерений. Для существующего технологического процесса проскок HF равный 1%, вполне допустим, т.к. газовая смесь проходит дальнейшую очистку на XПУ [80].

3.4 Схема воздушного охлаждения

Воздушное охлаждение ОС 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 3.2.



Рисунок 3.2 – Принципиальная схема воздушного охлаждения ОС

Для организации охлаждения ОС необходимо изготовить отсек воздушного охлаждения. Конструкция вновь разрабатываемого отсека должна не только обеспечивать достаточный теплообмен между потоком холодного воздуха и стенкой ОС для десублимации HF, но и позволять производить многократную установку и снятие ОС с технологической точки. Более подробно конструкция отсека охлаждения изложена в п.4.4 главы 4.

3.5 Описание эксперимента по оценке возможности применения воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме фракционного разделения газовых смесей

Положительные результаты, полученные при проведении эксперимента по оценке влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации HF, создают предпосылки для применения в схеме фракционного разделения в качестве хладоносителя холодного воздуха, генерируемого BXM.

Существующая схема фракционного разделения подразумевает очистку газовой смеси на трех технологических переделах (ступенях). Схема в три ступени отличается значительной протяжённостью вакуумных коммуникаций и использованием хладоносителей с различными температурными уровнями.

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 из ППЕ (1 ступень), в одной технологической емкости ПЕ при температуре 133 К. После накопления определенного количества десублимата, емкость переключается на коллектор откачки легколетучих примесей из состава десублимата, и температура охлаждающего емкость воздуха поднимается до значения 193 К. При такой температуре НF и другие легколетучие компоненты сублимируют и удаляются из емкости. После сублимации легколетучих компонентов в ПЕ остается сконденсированный ГФУ, который возвращается в технологию разделения изотопов.

Использование двухступенчатой схемы фракционного разделения позволит не только сократить протяженность технологических коммуникаций, являющихся значительным источником натечки легких примесей в оборудование, но и применить одну единицу оборудования (ВХМ) на различных температурных режимах.

Для проверки возможности организации схемы фракционного разделения в две ступени был проведен эксперимент на опытном стенде, схема которого представлена на рис. 3.3.

Конструкция опытного стенда была незначительно изменена. Изменение конструкции заключалось, в добавлении коллектора напуска газов и узла откачивания коллектора напуска с помощью ВН (18). Данное изменение схемы позволило производить откачивание коллектора напуска, не задействовав коммуникации стенда, что положительным образом повлияло на точность измерений.

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



Рисунок 3.3 – Принципиальная схема опытного стенда

3.6 Методика проведения эксперимента по оценке возможности применения воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме фракционного разделения газовых смесей

В качестве температурного уровня охлаждения ОС в процессе эксперимента, была принята температура отходящего воздуха от ВХМ равная 133 К. Что обусловлено следующими факторами:

– алгоритм автоматического режима работы ВХМ настроен на поддержание температуры ± 5 градусов от величины уставки, т.е. при уставке на выходе от ВХМ в 137 К температура может повысится до значения в 142 К. Повышение температуры подачи холодного воздуха более 142 К приведет к увеличению проскока HF;

– при проведении промышленных испытаний (пункт 2.3 главы 2) температура емкости принималась как среднее значение между температурой воздуха на выходе и входе в ВХМ. В силу неизбежности теплопотерь, температура возвратного воздуха в ВХМ будет больше температуры на выходе из турбодетандера. Т.е. при температуре на выходе из турбодетандера равной 137 К, температура возвратного воздуха будет несколько больше, так же как и средняя температура.

Эксперимент проводился по следующей схеме: ОС (3) охлаждается до температуры 133 К холодным воздухом из ВХМ и термостатируется. Путем испарения из емкостей (1) и (2) формируется газовая смесь, состоящая из известного количества ГФУ и НF, которая подается в ОС (3). После полного испарения веществ из емкостей (1) и (2) температура в ОС (3) поднимается до значения в 193 К. При температуре 193 К легколетучие компоненты сублимируют и удаляются из ОС (3) и в ней остается только ГФУ, давление насыщенных паров которого при заданной температуре составляет 0,0013 мм рт. ст. НF отделяется от ГФУ путем переконденсации в ОС (16), охлаждаемую жидким азотом. После переконденсации HF, ВХМ отключается и ОС (3) отогревается до температуры помещения, ГФУ переконденсируется во вновь, установленную ОС (16),

охлаждаемую жидким азотом. После чего все емкости взвешиваются и подводится расчет массового баланса всех компонентов.

Для проведения работы установка, коммуникации и «нулевка» откачены до минимально возможного давления, ОС (3) охлаждена воздухом, генерируемым ВХМ до температуры 133 К, ОС (16) охлаждена жидким азотом до температуры 77 К, предварительно взвешены емкости с ГФУ (2), безводным HF (1) и ОС (16).

Работы выполнялись в следующей последовательности: в ОС (3) из емкости (2), объемом 0,5 л. напускался ГФУ путем открытия вентилей (19), (21), (24). Во время напуска регистрировалось давление по приборам (8), (9), (12), (13), (14). Напуск продолжался в течение 2 часов, и прекращался закрытием вентилей (19), (21).

После выдержки в течение 15 мин. был открыт вентиль (22) для напуска в OC (3) безводного HF из емкости (1), объемом 6 л. Напуск продолжался в течение 4 ч., и отключался закрытием вентиля (22). После этого емкости с ГФУ (2) и HF (1) отсоединялись и повторно взвешивались. По разнице с первоначальным весом определялось количество вещества испитанного в OC (3).

После наполнения ОС (3) температура воздуха ВХМ поднималась до 193 К, OC (3)отогревалась, после производилась переконденсация чего HF. Переконденсация HF в OC (16), охлажденную жидким азотом до температуры 77 К проводилась путем открытия вентилей (26), (28). После прекращения снижения давления включался вакуумный насос ВН (18) и открывались вентили (31), (30) для откачивания остатков HF из коммуникаций стенда и конденсации их в ОС (16). Откачка продолжалась до момента, когда прекращался рост давления, при закрытии вентиля (26). Затем закрывались вентили (26), (28), (30), (31), ВН (18) и ВХМ останавливались. ОС (16) извлекалась из отсека охлаждения (17) и отогревалась при температуре помещения в течение 24 часов. После отогрева, ОС (16) взвешивалась, по разнице с первоначальным весом определялось количество сконденсированного HF.

После отогрева ОС (3) производилась переконденсация ГФУ во вновь установленную ОС (16), который был предварительно взвешен и охлажден до температуры 77 К жидким азотом. Переконденсация производилась путем открытия вентилей (26), (28). После прекращения снижения давления в стенде, включался ВН (18), открывались вентили (31), (30) для откачивания остатков ГФУ из стенда и конденсации их в ОС (16). Откачка продолжалась до момента прекращения роста давления, при закрытии вентиля (26). Далее закрывались вентили (26), (28), (30), (31), ВН (18) останавливался. ОС (16) извлекалась из отсека охлаждения (17) для отогрева. После отогрева ОС (16) взвешивалась, по разнице с первоначальным весом определялось количество сконденсированного ГФУ.

3.7 Результаты эксперимента по оценке возможности применения воздушного охлаждения в двухступенчатой схеме фракционного разделения газовых смесей

Материальный баланс подводился в три стадии. На первой стадии определялось количество поданного в ОС (3) ГФУ и НF, путем взвешивания емкостей с HF (1) ГФУ (2) до и после напуска в стенд, по разнице с первоначальным весом определялось количество испитанного HF и ГФУ. Во второй стадии определялось количество сконденсированного HF и ГФУ в ОС (16). Для определения количества HF проводилась переконденсация в ОС (16), после отогрева, которого в течение 24 часов проводилось повторное его взвешивание. По разнице с первоначальным весом определялось количество Количество количество Количество и в ОС (16), после отогрева, которого в течение 24 часов проводилось повторное его взвешивание. По разнице с первоначальным весом определялось количество HF сконденсированного в ОС (16) из ОС (3) экспериментальной установки. Количество ГФУ определялось аналогичным способом во вновь установленную ОС (16). В третьей стадии проводилось сравнение количества поданного ГФУ и HF в ОС (3) опытного стенда и количество сконденсированного ГФУ и HF, выделенного из состава газовой смеси. Результаты эксперимента приведены в таблицах 3.2–3.4.

	H	łF	ГФУ		
Результат	Вес емкости с	Вес емкости с	Вес емкости с	Вес емкости с	
взвешивания	HF до	HF после	ГФУ до	ГФУ после	
	испитки, гр.	испитки, гр.	испитки, гр.	испитки, гр.	
1	20 035,60	19 665,30	1 832,30	1 448,10	
2	20 035,70	19 665,20	1 832,30	1 448,00	
3	20 035,90	19 665,20	1 832,20	1 448,10	
Среднее	20.035.73	10 665 23	1 832 27	1 448 07	
значение	20 055,75	19 005,25	1 052,27	1 440,07	
Испитано,	270 50		384	20	
всего	57	0,50	564,20		

Таблица 3.2 – Количество испитанного ГФУ и HF

Таблица 3.3 – Количество сконденсированного ГФУ и HF

	H	łF	ГФУ		
	Вес ОС для	Bec OC для HF	Вес ОС для	Вес ОС для	
ГСЗУЛЬТАТ	HF до	после	ГФУ до	ГФУ после	
взесшивания	конденсации,	конденсации,	конденсации,	конденсации,	
	гр.	гр.	гр.	гр.	
1	41 033,70	41 407,70	42 120,10	42 497,00	
2	41 033,80	41 407,50	42 120,30	42 496,90	
3	41 033,90	41 407,60	42 119,90	42 497,10	
Среднее	<i>A</i> 1 033 80	<i>A</i> 1 <i>A</i> 07 60	<i>A</i> 2 120 10	12 197 00	
значение	41 055,00	41 407,00	42 120,10	42 477,00	
Сконденсиров	37'	3 80	376	90	
ано всего	57.	5,00	570,90		

Таблица 3.4 – Материальный баланс веществ

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

Из анализа таблиц 3.2–3.4 видно, что величина несоответствия испаренного из емкостей (1) и (2) количества веществ газовой смеси и количества сконденсированной смеси составило немногим более 0,5 % от общего количества

испаренной газовой смеси. Количество сконденсированного НF, превышающее количество испаренного из емкости (1) и недостаток ГФУ, объясняется уносом части ГФУ из ОС (3) при переконденсации HF в ОС (16), а также при откачивании HF вакуумным насосом (18). Давление насыщенного пара ГФУ при температуре 193 К составляет 0,0013 мм. рт. ст., поэтому при переконденсации HF из ОС (3) в ОС (16) часть ГФУ попадает в ОС (16).

Представленные результаты эксперимента показывают, что возможно проводить процесс фракционного разделения с десублимацией основных компонентов газовой смеси в одном объеме при температуре 133 К, и последующим разделением ГФУ и НF при изменении температуры OC.

3.8 Схема фракционного разделения в две ступени

В предлагаемом варианте организации технологии возможно использование двухступенчатой схемы фракционного разделения газовых смесей с организацией охлаждения в два контура. Принципиальная схема фракционного разделения в две ступени представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Схема фракционного разделения в две ступени

Принцип фракционного разделения в предлагаемой схеме заключатся, в десублимации газовой смеси на второй ступени в одну ПЕ, охлаждаемую

холодным воздухом с температурой 133 К. После накопления определенного количества десублимата, производится подъем температуры ПЕ до величины 193 К. После подъема температуры до 193 К, НГ будет сублимировать, пары поступают на коллектор размораживания ОС, откуда затем направляются на дальнейшую переработку. При отогреве ПЕ до температуры до 193 К, давление насыщенных паров НГ составляет ≈ 2 мм рт. ст. Откачка НГ проводится до стабилизации давления в ПЕ на уровне ниже этой величины. После извлечения НГ из состава газовой смеси ПЕ отогревается, по мере отогрева ГФУ испаряется в технологическую цепочку [81].

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 соответствии с допустимыми и безопасными параметрами для ГФУ, обогащенного до 5 % по U²³⁵ в смеси с HF, объем технологической емкости не должен превышать 27 л [82]. Применение представленной схемы, с использованием ПЕ объемом 50л возможно только при обогащении до 3 % по U²³⁵, например, на коллекторах К-01, К-03 и установке К-04 КИУ. Применение представленной схемы на коллекторе К-02 не представляется возможным в виду ограничений накладываемыми требованиями безопасности. ядерной Для коллектора К-02 целесообразно применение трехступенной схемы в которой, охлаждение ОС осуществляется холодным воздухом с температурой 133 К.

Выводы по главе 3

Изменена и дополнена конструкция существующего опытного стенда для проведения эксперимента по имитации процесса фракционного разделения при охлаждении воздухом.

По разработанной методике проведено три цикла измерений. В результате определена величина проскока HF через OC охлажденную до температуры 137 К холодным воздухом от ВХМ. Величина проскока составила менее 1% от общего количества газовой смеси на входе в OC. Так же установлено, что наличие неконденсируемых примесей не оказывает влияние на процесс десублимации HF при воздушном охлаждении.

Предложена схема воздушного охлаждения ОС на установке К–09 ОУ КИУ. В схеме охлаждения ОС в качестве хладоносителя используется воздух с температурой 133 К, источником которого является турбодетандерная ВХМ.

Разработана методика проведения эксперимента по оценке возможности виде двухступенчатой схемы фракционного организации технологии В разделения газовых смесей с двумя контурами воздушного охлаждения. Проведенная работа подтвердила возможность применения схемы в две ступени в процессе фракционного разделения и доказала, что температурный уровень в 133 К эффективным является температурным уровнем ведения процесса фракционного разделения.

Представлена принципиальная схема фракционного разделения в две ступени с двумя контурами воздушного охлаждения, с различными температурными режимами.

Глава 4 Результаты опытно-промышленной эксплуатации воздушного охлаждения емкостей на установке К–09 ОУ КИУ ЗРИ

В работ главе приведены результаты ПО 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 до температуры 133 К. Опробование воздушного охлаждения ёмкостей от ВХМ на установке К-09 ОУ КИУ проведено на специально разработанной и смонтированной опытно-промышленной установке.

4.1 Описание конструкции опытно-промышленной установки

В соответствии с разработанной конструкторской документацией [83] была смонтирована опытно-промышленная установка, состоящая из двух опытных промежуточных емкостей (ОПЕ), объемом 50 литров [84], 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 4.1.



Рисунок 4.1 – Принципиальная схема фракционного разделения при проведения 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 соединенные опытные промежуточные емкости (ОПЕ), охлаждаемые холодным воздухом с температурой 133 К от ВХМ. Далее газовая смесь поступает на установку К–09, в коллектор К–09–04–3, где проходит через две 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 производилась сборка штатной схемы работы коллектора К–01 без ОПЕ опытно-промышленной установки. 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 НF в десублимате.

Перед проведением ОПЭ были завершены монтажные работы в соответствии с конструкторской документацией. Проведена проверка вновь смонтированных коммуникаций на вакуумную плотность. Выполнена пассивация вновь смонтированных коммуникаций и ОПЕ. На вновь смонтированные клапаны нанесена маркировка.

Для ведения контроля и регистрации технологических параметров при проведении ОПЭ был выполнен монтаж системы обогрева, технологического контроля и защиты вновь установленных ОПЕ от точек № 9, 10 коллектора К–04– 3:

схема обогрева ОПЕ;

схема обогрева горловин ОПЕ;

73

- схема контроля температуры газа в ОПЕ;

схема контроля перекрытия трасс при испарении (концевые выключатели на клапанах Ду25);

схема защиты от превышения давления в коллекторе испарения.

На рисунке 4.2 приведена схема подключения опытной установки к технологическим коммуникациям установок К-04, К-08, К-09 ОУ КИУ.



Рисунок 4.2 – Принципиальная схема подключения опытной установки

В соответствии с техническими характеристиками эксплуатация ОПЕ предусмотрена при температурах от 163 К до 333 К. Для подтверждения возможности эксплуатации ОПЕ при температурах до 123 К проведен проверочный расчет на прочность. Расчет показал, что конструктивные элементы ОПЕ обеспечивают условия прочности и устойчивости при рабочих условиях в процессе проведения ОПЭ [85].

4.2 Порядок проведения ОПЭ

Работы проводятся с ГФУ обогащением по изотопу U²³⁵ менее 1%, в связи, с чем требования по ядерной безопасности не устанавливаются.

Перед подачей газовой смеси в ОПЕ проводятся следующие подготовительные мероприятия:

 – технологические коммуникации и ОПЕ были откачаны до давления не более 2 мм рт. ст.;

– подготавливаются к включению пара ПЕ на коллекторе К–08–01;

– в точки коллектора К–09–04–3 устанавливаются заранее взвешенные OC.

Далее ВХМ включается в работу в автоматическом режиме, уставка температуры воздуха на выходе из машины 133 К. ОПЕ замораживаются холодным воздухом с температурой 133 К не менее двух часов. Процесс захолаживания ОПЕ установки считается законченным при достижении среднего значения между температурой напорного и возвратного воздуха ВХМ равного 133 К. ОС коллектора К–09–04–3 замораживаются жидким азотом в течение не менее двух часов.

Опытная установка включается в работу путем организации потока газовой смеси по схеме: ПЕ коллектора К–08–01/К–04–3 \rightarrow ОПЕ №1, 2 установки \rightarrow ОС №7, 8 коллектора К–09–04–3.

При проведении работ контролируются следующие параметры работы:

- температура холодного воздуха на входе и выходе из ВХМ;

 давление до и после ПЕ коллектора К-08-01, давление после ОПЕ опытной установки, давление до и после ОС коллектора К-09-04-3.

После завершения цикла работы установки на конденсацию производится сборка штатной схемы работы без опытной установки. ОС с коллектора К–09–04– 3 размораживаются и взвешиваются, по разнице с исходным весом определяется общее количество вещества в каждой из ОС. Далее ОС тренируются до давления насыщенного пара ГФУ при температуре маш. зала и повторно взвешиваются. По разнице с исходным весом определяется количество ГФУ в ОС.

Далее собирается схема испарения ОПЕ во вновь установленные и предварительно взвешенные ОС коллектора К–09–04–3. После окончания испарения ОС размораживались и взвешивались, по разнице с исходным весом определяется общее количество вещества в каждой из ОС. Далее ОС тренируются до давления насыщенного пара ГФУ при температуре маш. зала и повторно взвешиваются. После чего подводился материальный баланс веществ и определение количественного состава ГФУ и НF в десублимате.

4.3 Результаты проведения ОПЭ

Было проведено три цикла работы на конденсацию потока газовой смеси в ОПЕ с воздушным охлаждением до температуры 133 К и последующим испарением десублимата в ОС. Работы проводились в следующие сроки:

– с 22.02.2018г. по 06.03.2018г. – конденсация потока газовой смеси с коллектора К–04–3, испарение десублимата с 07.03.2018г. по 21.03.2018г.;

– с 28.03.2018г. по 17.04.2018г. – конденсация потока газовой смеси с коллектора К-08-01, испарение десублимата с 19.04.2018г. по 27.04.2018г.;

– с 28.04.2018г. по 18.05.2018г. – конденсация потока газовой смеси с коллектора К–08–01 (задействован основной и резервный коллекторы), испарение десублимата с 21.05.2018г. по 30.05.2018г.

Результаты по ОПЭ приведены в таблице 4.1, для наглядности приведена принципиальная схема проведения ОПЭ.



Рисунок 4.3 – Принципиальная схема проведения ОПЭ

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

Из результатов проведения ОПЭ 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 №1), охлаждаемой холодным воздухом, десублимируется весь ГФУ содержащийся в составе газовой смеси и более 91 % общего массового потока газовой смеси;

эффективность улавливания ГФУ и легких примесей (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).

4.4 Исходные данные для разработки ЧТД отсека охлаждения

В связи с отсутствием отсеков воздушного охлаждения ОС объемом 24 л холодным воздухом, при проведении ОПЭ были использованы ПЕ объемом 50 л.

7

В случае возможной модернизации системы охлаждения установки К-09 ОУ КИУ необходимо разработать конструкцию отсека охлаждения для ОС, позволяющего применять в качестве хладоносителя холодный воздух. Для унификации разрабатываемого отсека охлаждения с используемыми В промышленности в настоящее время, целесообразно разработать отсек на базе сосуда охлаждения емкости объемом 24 л [87]. Для организации равномерного распределения потока холодного воздуха по всей высоте ОС, отсек охлаждения дооснастить ребром в виде спирали, состоящей из полуколец, приваренных к внутренней обечайке отсека охлаждения на высоту цилиндрической части ОС. При этом для предотвращения срыва потока захоложенного воздуха, должен обеспечиваться минимальный зазор между стенкой ОС и ребрами.

Охлаждение ОС производится путем подачи холодного воздуха от ВХМ в нижнюю часть отсека. Далее, из нижней части отсека воздух поступает в

78

спиральный канал. Протекая по спиральному каналу воздух охлаждает ОС по всей его высоте и выходит в верхней части отсека через патрубок и возвращается в ВХМ. Принципиальная конструкция отсека охлаждения приведена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Принципиальная конструкция отсека воздушного охлаждения

Требования к отсеку охлаждения:

 материал элементов, применяемых разработке отсека – сталь марки 12X18H10T;

материал теплоизоляции – вспененный каучук, с диапазоном рабочей температуры до 73 К, теплопроводностью не более 0,04 Вт/(м К), категория пожаробезопасности Г1;

– температура помещения эксплуатации – от 288 до 300 К;

– режим работы – периодический, цикл охлаждения от 3 до 14 дней, цикл отогрева – до 3 дней;

– рабочая среда – воздух с температурой от 123 до 300 К, рабочее давление среды – не более 0,3 кгс/см².

На основании требований к условиям эксплуатации отсека охлаждения для ОС была разработана ЧТД на изготовление отсека охлаждения [86].

Выводы по главе 4

Разработана конструкция и смонтирована опытно-промышленная установка воздушного охлаждения емкостей на установке К–09 ОУ КИУ ЗРИ. Разработана программа проведения ОПЭ воздушного охлаждения емкостей на установке К–09 ОУ КИУ ЗРИ.

Проведено три цикла работ по охлаждению емкостей опытно– промышленной установки на ОУ КИУ. Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

 при воздушном охлаждении до температуры 133 К полностью десублимируется весь ГФУ, содержащийся в составе газовой смеси и более 93 % легких примесей;

 – эффективность улавливания практически не зависит от расхода и количественного соотношения компонентов в составе газовой смеси (при расходах и параметрах технологических потоков на ОУ КИУ);

– более 91 % потока газовой смеси десублимируется в первой по ходу движения газа охлаждаемой емкости. Для получения приемлемых результатов достаточно одной емкости охлаждаемой до температуры 133 К, при этом возможно увеличение сорбционной нагрузки и более частая замена сорбента;

– степень улавливания будет определяться величиной давления насыщенного пара компонентов газовой смеси при соответствующей температуре

ОС. Чем ниже температура, тем соответственно больше и эффективность улавливания.

Выданы рекомендации на разработку ЧТД отсека воздушного охлаждения ОС объемом 24 л.

Глава 5 Теоретическое моделирование процессов теплообмена в схеме воздушного охлаждения осадительных ёмкостей

Для снижения эксплуатационных затрат и повышения энергоэффективности работы рассматривается возможность использования ВХМ–0,54/0,6 для охлаждения ОС на установке К–09 ОУ КИУ. В качестве варианта режима работы установки К–09 ОУ КИУ условно примем, что в режиме термостатирования находятся 24 штуки ОС.

Расчет газодинамических процессов течения холодного воздуха в трубопроводной системе и теплообмена со стенками ёмкостей и трубопроводов выполнен с помощью «Программы для расчета охлаждения блока приемных емкостей для десублимации газа» [87] доработанной в соответствии с уточненной математической моделью. Физико-математическая модель уточнена в части:

наличия 24 штук ОС, одновременно охлаждаемых воздухом, подаваемым от ВХМ в трубопроводную сеть;

- постепенного выхода работы ВХМ на стационарный режим работы;

- температуры отходящего от ВХМ воздуха равной 133 К.

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

1. Охлаждение всей системы емкостей (24 штуки ОС) от начальной температуры (298 К) до рабочей температуры (133 К) с использованием одной и двух ВХМ, 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, работающих на один коллектор.

Исходные данные для расчета были взяты из руководства по эксплуатации машин ВХМ 0,54/0,6 и паспортных теплофизических характеристик материалов, а также данных технологического процесса, с учетом уточнения характеристик

тепло- и массообменных процессов. Также была уточнена топология секционных трубопроводов.

Учитывался постепенный выход ВХМ на рабочий режим. Это учитывалось заданием температуры на входе ВХМ на 60 К ниже температуры воздуха, поступающего в турбодетандерный агрегат ВХМ. После выхода работы ВХМ на заданную температуру воздуха на выходе из нее, это условие отменяется.

5.1 Исходные данные для проведения расчетов

Материал ОС и воздушного теплообменника (отсека воздушного охлаждения) – сталь марки 12X18H10T:

- коэффициент теплопроводности: $\lambda_n = 16.178 \ \square m \cdot c \cdot K$;

- удельная теплоёмкость: $c_n = 502.8 \ \square m c/(\kappa r \cdot K)$;

- плотность стали: $\rho_m = 7900.0 \, \kappa c \, / \, M^3$.

Хладоноситель – Воздух:

- коэффициент теплопроводности: $\lambda_{e} = 0.0182 \ \square \mathcal{M} \cdot c \cdot K$;

- коэффициент динамической вязкости: $\mu_{e} = 1.362 \cdot 10^{-5} \Pi a \cdot c$;

- газовая постоянная: $R = 290 \ \square \mathcal{H} / (\kappa_{\mathcal{E}} \cdot K);$

- показатель адиабаты k = 1.36;

- температура холодного воздуха на выходе из турбодетандера ВХМ: 133 К.

Температура ёмкости (начальная): 298 К.

Давление воздуха в атмосфере: $p = 101320 \ \Pi a$.

Средний тепловой поток при конденсации газовой смеси (Q) с учетом потока тепла из окружающей среды (Q_{вн}) принят из данных о массовом расходе;

Средний тепловой поток из окружающей среды на теплоизолированные трубопроводы:

- Dy 100 MM. $- q_m = 96 \ \square \mathcal{M} \cdot c);$

- Dy 50 MM. $- q_m = 48 \ \square m c / (m^2 \cdot c)$.

5.2 Конструктивные особенности схемы охлаждения

Трубопроводная сеть выполнена в виде общего напорного и отборного трубопроводов, каждый в однотрубном исполнении. В напорный коллектор подается холодный воздух от ВХМ, далее по секционным трубопроводам проходит через теплообменник ОС и возвращается через отборный трубопровод в ВХМ. Участки напорного и отборного трубопроводов изготовлены из стали марки 12X18H10T, с внутренним диаметром 100 мм., покрытых многослойной теплоизоляцией толщиной 100 мм. Секционные трубопроводы изготовлены из стали марки 12X18H10T, с внутренним диаметром 50 мм., длиной 1000 мм., покрытые многослойной теплоизоляцией толщиной 50 мм. На рисунке 5.1 представлена принципиальная схема численного моделирования.



Рисунок 5.1 – Принципиальная схема численного моделирования

5.3 Результаты численного моделирования охлаждения ОС от начальной температуры

Был проведен расчет варианта 1 охлаждения всей системы емкостей от начальной температуры до рабочей температуры с использованием одной и двух ВХМ, работающих на один коллектор.

На рисунках 5.2–5.13 представлены распределения скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршрутам течения воздуха через емкости № 1, 4, 10, 16,

20, 23 (на рисунке 5.1) при работе одной и двух ВХМ. 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.







Рисунок 5.3 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 4 (на рисунке 5.1)

Работают 2 ВХМ



Рисунок 5.4 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 10 (на рисунке 5.1)

Работают 2 ВХМ



Рисунок 5.5 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 16 (на рисунке 5.1)

Работают 2 ВХМ



Рисунок 5.6 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 20 (на рисунке 5.1)

Работают 2 ВХМ



Рисунок 5.7 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 24 (на рисунке 5.1)

Работают 2 ВХМ



Рисунок 5.8 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 1 (на рисунке 5.1)

Работает 1 ВХМ



Рисунок 5.9 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 4 (на рисунке 5.1)

Работает 1 ВХМ



Рисунок 5.10 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 10 (на рисунке 5.1)

Работает 1 ВХМ

89



Рисунок 5.11 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 16 (на рисунке 5.1)

Работает 1 ВХМ



Рисунок 5.12 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 20 (на рисунке 5.1) Работает 1 ВХМ

90



Рисунок 5.13 – Распределение скорости воздуха (а), температуры воздуха (штриховые линии) и стенок трубопроводов и емкости (сплошные линии) (б) по маршруту течения воздуха через емкость № 24 (на рисунке 5.1)

Работает 1 ВХМ

Из рисунков видно, что время охлаждения емкостей № 1–24 до рабочей температуры отличается. Наиболее быстро охлаждаются емкости, находящиеся ближе к трубопроводу подачи холодного воздуха от ВХМ в напорный коллектор, например, емкость № 10 (на рисунке 5.4), которая охлаждается при работе двух ВХМ за время 200–250 минут. Емкость № 16 охлаждается чуть дольше, при работе двух ВХМ за время 500–550 минут (на рисунке 5.5). Емкость № 24, находящаяся на максимальном удалении от трубопровода подачи холодного воздуха в напорный коллектор, охлаждается при работе двух ВХМ за время 600–650 минут (на рисунке 5.7).

При работе на трубопроводную сеть одной ВХМ время охлаждения емкостей до рабочей температуры увеличивается. Например, емкость № 10 (на рисунке 5.10) охлаждается за время 350–400 минут. Емкость № 16 охлаждается за время 450–500 минут (на рисунке 5.11). Емкость № 24, находящаяся на

максимальном удалении от трубопровода подачи холодного воздуха в напорный коллектор, охлаждается за время 900 минут (на рисунке 5.13).

Отличие во времени охлаждения емкостей обусловлено разной скоростью течения холодного воздуха в теплообменниках соответствующих емкостей.

5.4 Стационарные режимы работы ОС при воздушном охлаждении одной и двумя ВХМ

Были проведены расчеты стационарного распределения температуры стенок трубопроводов и стенок емкостей по маршруту течения охлаждающего воздуха в соответствующие емкости. В расчетах учитываются тепловые потоки из окружающей среды и от десублимации потока газовой смеси. Данные о массовом расходе газовой смеси, поступающем на установку К–09 ОУ КИУ, приняты из таблицы 1.5 главы 1.

Результаты расчетов представлены на рисунках 5.14–5.19 в виде стационарного распределения температуры по соответствующему маршруту течения охлаждающего воздуха в соответствующие емкости для двух вариантов охлаждения: кривые 1 построены при работе одной ВХМ, кривые 2 построены при работе 2 ВХМ.



1 – одна ВХМ, 2 – 2 ВХМ

Рисунок 5.14 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 1 (на рисунке 5.1)



1 – одна ВХМ, 2 – 2 ВХМ

Рисунок 5.15 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 4 (на рисунке 5.1)



Рисунок 5.16 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 10 (на рисунке 5.1)



Рисунок 5.17 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 16 (на рисунке 5.1)



1 – одна ВХМ, 2 – 2 ВХМ

Рисунок 5.18 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 20 (на рисунке 5.1)



1 – одна ВХМ, 2 – 2 ВХМ

Рисунок 5.19 – Распределение температуры стенок трубопроводов и емкости по маршруту течения воздуха через емкость № 24 (на рисунке 5.1)

Из рисунков 5.14 – 5.19 видно, что температура стенок емкостей отличается от температуры воздуха на входе в трубопроводную сеть не более чем на 2°С при работе двух ВХМ, и не более чем на 5,5°С (в емкости № 24) при работе одной ВХМ.

5.5 Обсуждение результатов расчетов

Проведено теоретическое моделирование процесса теплообмена в воздушных теплообменниках ОС в двух вариантах работы схемы:

1. Охлаждение всей системы емкостей (24 емкости) от начальной температуры до рабочей температуры с использованием одной и двух ВХМ, работающих на один коллектор.

2. Определение стационарного распределения температуры стенок емкостей (24 штук) с заданными величинами потоков тепла от десублимации и из окружающей среды при их охлаждении с использованием одной и двух ВХМ, работающих на один коллектор.

По результатам расчетов охлаждения всей системы емкостей определено, что при работе двух ВХМ на одну сеть время охлаждения всех емкостей до рабочей температуры составляет 10–11 часов, при работе одной ВХМ это время составляет 15 часов. Причем, в зависимости от расположения ОС относительно точки подключения ВХМ в трубопроводную сеть время охлаждения каждой емкости до рабочей температуры различается. Наиболее быстро охлаждаются емкости, расположенные ближе к точке подключения ВХМ в трубопроводную сеть. Это обусловлено различным расходом воздуха по трубопроводной сети из– за различия аэродинамического сопротивления по маршрутам течения воздуха. 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, и не более чем на 5,5°С (в наиболее удаленной емкости № 24) при работе одной ВХМ.

5.6 Схема воздушного охлаждения установки К-09 ОУ КИУ ЗРИ

По результатам теоретического моделирования процессов теплообмена в воздушных теплообменниках ОС разработана принципиальная схема охлаждения установки К–09 ОУ КИУ. Схема воздушного охлаждения разработана для условного варианта работы 24 штук ОС, охлаждаемых от двух ВХМ–0,54/0,6. Принципиальная схема воздушного охлаждения от ВХМ на установке К–09 ОУ КИУ приведена на рисунке 5.20.

Схема коммуникаций холодного воздуха (см. рис. 5.20) выполнена в однотрубном исполнении, в виде магистрального трубопровода подачи холодного воздуха от ВХМ и магистрального трубопровода возврата воздуха в ВХМ от потребителей (ОС). От магистральных трубопроводов подачи и возврата холодного воздуха под углом 90° градусов отходят колена с вертикальными участками и проходя через строительные конструкции соединяются отводом с патрубками воздушного теплообменника ОС на технологической точке установки К–09 ОУ КИУ.

Расположение холодильных мощностей на схеме охлаждения подобрано таким образом, что при работе в режиме термостатирования тепловая нагрузка от десублимации потока газовой смеси и потерь тепла в окружающую среду равномерно распределена между каждой единицей ВХМ. В случае работы одной единицы ВХМ тепловые нагрузки с правой и левой плеч схемы охлаждения идентичны.



Рисунок 5.20 – Принципиальная схема воздушного охлаждения от ВХМ-0,54/0,6

На схеме охлаждения (см. рис. 5.20) цветом визуализированы следующие элементы:

- Темно-серый цвет - ОС заморожен и находится в работе;

- Светло-серый цвет - ОС заморожен и находится в резерве;

- Синий цвет - трубопровод подачи холодного воздуха от ВХМ;

– Красный цвет – трубопровод возврата холодного воздуха от ОС к ВХМ.

5.7 Исходные данные для разработки ЧТД схемы охлаждения технологических точек установки К–09 ОУ КИУ

Схема охлаждения представляет собой двухтрубную централизованную систему охлаждения емкостей (ОС).

В качестве холодильных мощностей используется две единицы ВХМ– 0,54/0,6. Подсоединение трубопроводов подачи осушенного воздуха на ВХМ, напорного и сливного трубопроводов охлаждающей воды предусмотреть к существующим коммуникациям, с монтажом запорной арматуры. Сброс отепленного воздуха предусмотреть в существующую вентиляционную шахту . Электроснабжение ВХМ выполнить по второй категории, электропитание 380 В взять от щита PBXM–1 (2).

Материал магистральных трубопроводов подачи и возврата холодного воздуха – сталь марки 12Х18Н10Т, внутренним диаметром 100 мм., секционных трубопроводов – сталь марки 12Х18Н10Т, внутренним диаметром 50 мм.

В качестве воздушного теплообменника для ОС применить Дьюар охлаждения [85], доработанный в соответствии с [86]. Для снижения теплопотерь теплоизолировать наружную поверхность трубопроводов и Дьюара охлаждения с применением современных вспененных теплоизоляционных материалов. Толщина слоя теплоизоляции для трубопроводов холодного воздуха не менее величины одного внутреннего диаметра трубопровода, для Дьюара охлаждения – не менее 50 мм., по всей наружной поверхности.

В качестве запорной арматуры на коммуникациях холодного воздуха предусмотреть низкотемпературную полно-проходную арматуру.

Выводы по главе 5

По результатам теоретического моделирования процессов теплообмена в воздушных теплообменниках ОС установлено, что:

 при работе двух ВХМ на одну сеть время охлаждения всех емкостей до рабочей температуры составляет 10–11 часов;

 при работе одной ВХМ время охлаждения всех емкостей до рабочей температуры составляет 15 часов;

 при работе двух ВХМ на одну сеть температура стенок емкостей отличается от температуры воздуха на входе в трубопроводную сеть не более чем на 2 °C;

– при работе одной ВХМ температура стенок емкостей отличается от температуры воздуха на входе в трубопроводную сеть не более чем на 5,5 °С.

Разработана схема охлаждения технологических точек установки К–09 ОУ КИУ от ВХМ. Схема содержит: две единицы ВХМ–0,54/0,6, 24 технологические емкости и коммуникации холодного воздуха. Схема разработана с учетом оптимального размещения ВХМ при существующей тепловой нагрузке от десублимации потока газовой смеси, потерь тепла в окружающую среду и разной скорости течения холодного воздуха в теплообменниках соответствующих ОС.

Выданы рекомендации для разработки ЧТД на организацию воздушного охлаждения от ВХМ-0,54/0,6 на установке К-09 ОУ КИУ ЗРИ.

Заключение

В ходе исследования получены следующие результаты:

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 НF, 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 НF 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».

Дальнейшие исследования могут быть посвящены оптимизации режимов охлаждения осадительных емкостей с учетом тепловой нагрузки и технических характеристик ВХМ-0,54/0,6, а также моделированию процессов теплообмена в схемах воздушного охлаждения технологических установок как на ЗРИ АО «СХК», так и на разделительных предприятиях АО «ТВЭЛ».

Список сокращений и условных обозначений

АО «ТВЭЛ» – акционерное общество Топливная компания «ТВЭЛ»;

АО «СХК» – акционерное общество «Сибирский химический комбинат»;

ВН – вакуумный насос;

ВХМ – воздушно-холодильная машина ВХМ–0,54/0,6;

ГФУ – гексафторид урана;

ДТН – допустимая технологическая норма;

ЗРИ – завод разделения изотопов;

КИУ -конденсационно-испарительная установка;

ПЕ – промежуточная емкость;

ППЕ – предварительная промежуточная емкость;

ОПЕ – опытная промежуточная емкость;

ОПЭ – опытно-промышленная эксплуатация;

ОС – осадительная ёмкость;

ОУ КИУ-объединенный участок конденсационно-испарительных установок;

УЗВН – узел защиты вакуумных насосов;

ХПУ – химпоглотительная установка;

ЧТД – чертежно-техническая документация;

HF – фтористый водород.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. Способ охлаждения газовой смеси: патент 2563564 Рос. Федерация, №2013159280/06, заявл. 30.12.2013, опубл. 20.09.2015.

4. Очиститель воздуха турбодетандерной холодильной машины: патент на полезную модель 152946 Рос. Федерация, № 2014108522/06, заявл. 06.03.2014, опубл. 27.06.2015.

5. Рабочая инструкция по эксплуатации конденсационно-испарительной установки (КИУ) технологического цеха (цех 42) (КИУ и установки перелива жидкого гексафторида урана) ЗРИ АО «СХК». РИ 40/42–066–2016.

6. Синев Н. М. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива: Учеб. пособие для вузов. – 3–е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

7. СанПиН 2.6.1.08–03. Организация и проведение работ по производству урана из высокообогащенного урана (СП ВОУ–03).

8. «Рабочая инструкция по эксплуатации системы охлаждения оборудования ОУ КИУ ЗРИ». РИ 03-054-2016.

9. «Рабочая инструкция по устройству и эксплуатации воздушно-

холодильных машин ВХМ-0,54/0,6 завода разделения изотопов», РИ 40-03-112-2019.

10. Емкость осадительная V-24 л. Технические условия 322-06-0006ТУ.

11. Сосуд охлаждения емкости объемом 24 литра. М.03.042.000.

12. «График замены поглотителей на коллекторах 2019г.» №11-40/42-07/4137-ВК от 22.01.2019г.

13. «Рабочая инструкция по эксплуатации сорбционных установок М–1895 и М–1281 цеха №42». РИ 40/42–055–2014.

14. «Рабочая инструкция по эксплуатации вакуумных насосов цеха 42 ЗРИ АО «СХК». № 40–02/10975.

15. Картавых А.А., Губанов С.М., Чуканов М.В. Исследование и оптимизация откачных систем разделительного производства / А. А. Картавых, С. М. Губанов, 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. – 136 С.

16. Картавых А. А. Оптимизация откачных систем разделительного производства / А. А. Картавых, С. М. Губанов, М. В. Чуканов // V Международная школа–конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, 22–24 октября 2014, г.Северск: Изд. СТИ НИЯУ МИФИ, 2014. – 141 С.

17. «Рабочая инструкция по эксплуатации установки сжигания вакуумного масла б/у в зд.4 группы ревизии и регенерации УРиР ЗРИ». РИ 40–40–045–2018.

18. «График замены масла в вакуумных насосах на 2019 год» №40-03/3821 от 22.11.2018г.

19. Агрегат вакуумный золотниковый типа АВЗ. Паспорт 352.13.00.00 ПС.

20. «Журнал учета вакуумного масла» №42/1073.

21. Обогащение урана / Под ред. С. Виллани. Пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина.– М.: Энергоатомиздат, 1988. -320 с.

22. Рысс И.Г. Химия фтора и его неорганических фторидов. – М.: Химия, 1956. –719 с.

23. Дурновцев М.И. Математическое и физическое моделирование процессов тепло– и массообмена в устройствах для десублимации фтористого водорода. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.–м.н. – Томск: ТГУ, 2016. – 137 с.

24. «Справки по количеству НF за период 01.01. – 31.12.2006 г., 01.01. – 30.06.2007 г., 01.12.2007 – 30.06.2008 г., 01.06.2008 – 28.02.2009 г., 01.04. – 30.06.2009 г., 01.04. – 30.06.2009 г., 01.01. – 30.06.2015 г.

25. Перечень опасностей и ВПФ ЗРИ АО «СХК» №11-40/42-10/14271-ВК от 23.04.2018г.

26. «Инструкция по охране труда аппаратчика воздухоразделения по эксплуатации и обслуживанию систем хранения жидкого азота УКХО ЗРИ». ИОТ–Л–40/46–014–2018.

27. Расчет-обоснование потребления жидкого азота в 2017 году. №40-02/882 от 14.03.2017.

28. Воздушно-холодильная машина: патент на полезную модель 148542 Рос. Федерация, № 2014108524/06, заявл. 06.03.2014, опубл. 10.12.2014.

29. Машина воздушно-холодильная ВХМ-0.54/0.6. Руководство по эксплуатации. НПО «Гелиймаш». 2010. – 33 с.

30. Кнунянц И. Л. (гл. ред.). Химическая энциклопедия: в 5 т. – Москва: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 623 с.

31. 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.

32. Орлов А. А. Математическая модель процесса десублимации uf6 в вертикальной емкости / А.А. Орлов, А.Ф. Цимбалюк, Р.В. Малюгин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. - Т.58, № 2/2.-14 С.

33. Мейрманов А.М. Задача Стефана. – Новосибирск: Наука, 1986. – 240 с.

34. Горелик А.Г., Амитин А.В. Десублимация в химической промышленности. – М.: Химия, 1986. – 272 с.

35. Орлов А. А. Математическая модель процесса десублимации гексафторида урана / А. А. Орлов, Р. В. Малюгин // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2014. – № 4. – С. 14–21.

36. Орлов А. А. Математическое моделирование процесса десублимации газообразного гексафторида урана на предприятиях по обогащению урана / А.А. Орлов, А.Ф. Цимбалюк, Р.В. Малюгин // Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ". -2016.-Т. 5, № 6.-С. 558–563.

37. Krainov A. Yu. Numerical modeling of air cooling of containers for desublimation of fluorine hydrogen Interdisciplinary / A. Yu. Krainov, L. L. Minkov, A. A. Kartavykh // Problems in Additive Technologies: book of abstracts III Russian Scientific Seminar with International Participation, 4–6 December 2017, Tomsk. [Electronic text data]. – Tomsk : Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, 2017. – 75 p.

38. 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.

39. Васенин И. М. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И. М. Васенин, Э. Р. Шрагер, А. Ю. Крайнов, Д. Ю. Палеев, О. Ю. Лукашов, В. Н. Костеренко // Компьютерные исследования и моделирование.– 2011.-Т. 3, № 2.-С. 155–163.

40. Крайнов А. Ю. Численное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров / А. Ю. Крайнов, С. М. Губанов // Компьютерные исследования и моделирование.– 2011. – Т.3, №4.-С. 383–388.
41. Губанов С. М. Математическая модель и результаты численных расчетов охлаждения осадительных емкостей при десублимации потока UF6 и легких примесей / А. Ю. Крайнов, С. М. Губанов // Вестник ТГУ. Математика и механика. -2012. -№ 4(20). -С. 56–65.

42. Губанов С. М. Математическое моделирование газодинамических процессов охлаждения аппаратов для десублимации гексафторида урана / С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, О. Б. Громов, Р. Л. Мазур, С. Л. Кочубеева // Химическая промышленность.-2012.-Т. 89., № 3.- С. 129–137.

43. Губанов C. M. Математическое моделирование теплообмена осадительных емкостей для улавливания паров UF6 / С. М. Губанов, П. В. Зернаев, И. М. Васенин, А. Ю. Крайнов // Фундаментальные и прикладные Материалы Всероссийской проблемы современной механики: научной конференции, посвященной 50 – летию полета Ю.А. Гагарина и 90 – летию со дня рождения основателя и первого директора НИИ ПММ ТГУ А. Д. Колмакова. Томск, 12 – 14 апреля 2011 г.-Томск. 2011.-С. 443–444.

44. Химия и технология фтористых соединений урана. /Под ред. Н.П. Галкина. – М.: Госатомиздат, 1961. – 286 с.

45. Справочник. Основные свойства неорганических фторидов. Под редакцией Н.П. Галкина. – М.: Атомиздат, 1976. – 400 с.

46. 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, М. В. Чуканов, А. Ю. Крайнов, Э. Р. Шрагер // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ–2016): Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, 21–25 сентября 2016 года, г. Томск. – Томск: Томский государственный университет, 2016.-С. 389–391.

47. Картавых А. А. Оценка влияния откачивания газовой смеси на процесс десублимации НF / 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.

48. 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 2018г.: материалы конференции / Министерство образования и науки РФ, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ (СТИ НИЯУ МИФИ); под ред. М.Д. Носкова. – Северск: Изд–во СТИ НИЯУ МИФИ, 2018.-47 С.

49. Картавых А. А. Экспериментальное определение эффективности воздушного охлаждения емкостей для десублимации фтористого водорода / А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017 международная молодежная научная конференция.-Томск, 2018.-С. 286–288.

50. 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. – 39 с.

51. Рысс И.Г. Химия фтора и его неорганических фторидов. – М.: Химия, 1956. – 719 с.

52. СМ.СО.11. Сосуд охлаждения в сборе с отсеком охлаждения.

53. Каталог продукции компании Armacell Engineered Foams, Armaflex Tubolit OKA – Product.

54. Руководство по эксплуатации СК 421200.012 РЭ. Вакууметр Мерадат-ВИТ.

55. Преобразователь манометрический тепловой термопарный ПМТ-4М. 3.390.000 ТУ.

56. Паспорт. Микроманометр оптический ОМ-6.

57. Паспорт СПГК.5070.000.00 ПС. Датчик давления Метран 100.

58. Инструкция по эксплуатации моноблочного конвекционного вакууметра TELEVAC MP4AR.

59. Руководство по эксплуатации ПМТ-6-3М-1.

60. Паспорт. Микроманометр оптический ОМ-7.

61. Дурновцев М. И. Экспериментальное измерение давления насыщенных паров безводного фтористого водорода / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, М. В. Чуканов, А. А. Картавых // Программа IX всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55–летию полета Ю. А. Гагарина.Томск, 21–25 сентября 2016г. - Томск, 2016.-С.396-397.

62. Руководство по эксплуатации. Течеискатель Масс-спектрометрический ТИ 1-22 («Гелмасс»).

63. ГОСТ 14022-88. Водород фтористый безводный. Технические условия.

64. Дурновцев М. И. Измерение давления насыщенных паров фтористого водорода в области низких температур / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, М. В. Чуканов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т.58, № 2/2. - С. 10–13.

65. 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.

66. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математикостатистической теории обработки наблюдений. – 2–е изд. – М.: 1962.-336.

67. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. – М.: Юнити–Дана, 2001. – Т. 2.-432 с.

68. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в лабораторном практикуме. Томск: Изд-во ТПУ. 2011. – 87 с.

69. Дж. Кац, Е. Рабинович. Химия урана. – М.: Издательство иностранной литературы, 1953. – 481 с.

70. Инструкция по эксплуатации моноблочного широкодиапазонного вакууметра Televac CC–10.

71. Термопреобразователь ТСП-0879. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 5ЦО.282.181-04 ТО.

72. Очистка F₂ от HF методом конденсации: Отчет/ГИПХ, науч. рук. Аджемян А.Г., 1956. -156 с.

73. Громов О.Б. Анализ технологических схем защиты вакуумных насосов коллекторов КИУ на разделительных заводах ТК ОАО «ТВЭЛ» и последствия отказа от применения жидкого азота в качестве хладагента // Громовские чтения – 2014: Материалы всероссийской научно–практической конференции, приуроченной к 105–летию со дня рождения Б.В. Громова. г.Томск, 1-3 октября 2014г.-Томск, 2014.-С.28–29.

74. 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.

75. 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. – С. С. 395.

76. Патент 2655347 Российская Федерация. МПК В01D 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. № <u>15</u>.

77. «Рабочая инструкция по эксплуатации весов KA15s и KC300s фирмы «Metler Toledo» №40–02/10946.

78. 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.

79. 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.

80. ПБЯ-06-06-07. Правила ядерной безопасности для разделительных и сублиматных производств.

81. Конструкторская документация Т9960.00.00.

82. Чертеж промежуточной ёмкости 322-06-0010.

83. Ёмкость V=50 л. Расчет. Р-802.

84. Картавых А.А. Воздушное охлаждение в производстве по разделению изотопов урана // Итоги диссертационных исследований. Том 2. – Материалы Х Всероссийского конкурса молодых учёных. – М.: РАН, 2018.-С. 12–22.

85. Чертеж сосуда охлаждения М.03.042.000.

86. Конструкторская документация на доработку Дьюара. СМ.054-00.

87. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617679 «Программа для расчета охлаждения блока приемных емкостей для десублимации газа» / Крайнов А. Ю., Губанов С. М., Моисеева К. М., Дурновцев М. И.; правообладатель Федеральное государственное автономное образования образовательное учреждение высшего «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2015614455; заявл. 28.05.2015, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17.07.2015.