



Губанов Сергей Михайлович

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ПО РАЗДЕЛЕНИЮ ИЗОТОПОВ УРАНА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Крайнов Алексей Юрьевич

Официальные оппоненты:

Орлов Алексей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение ядерно-топливного цикла, профессор

Макаров Сергей Сергеевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», лаборатория физико-химической механики, ведущий научный сотрудник

Козлобродов Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теплогазоснабжения и инженерных систем в строительстве, профессор

Бубенчиков Алексей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», региональный научно-образовательный математический центр, ведущий научный сотрудник

Защита состоится 16 сентября 2022 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета НИ ТГУ.01.02, созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 2 ТГУ, аудитория 428).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/c19d7c8c-d9d2-4919-a0f3-a87213f96886>

Автореферат разослан « _____ » июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе представлены результаты исследований процессов термостатирования, применяемых в производстве по разделению изотопов урана. Отвод тепловой энергии, выделяемой производством по разделению изотопов урана, производится устройствами термостатирования, имеющими значительную мощность (до 55 Гкал/час). Требуемый диапазон температур от 77 К до 280 К. В структуре себестоимости единицы работы разделения энергетическая составляющая является определяющей, при этом на системы термостатирования приходится до 30 % энергопотребления всего производства.

Значительные энергетические ресурсы затрачиваются на функционирование технологических установок, обеспечивающих безопасность производства для окружающей среды. Здесь используются физические способы локализации целевого вещества и выделение из сбрасываемых в окружающую среду отходов производства химически и радиационно опасных веществ.

Программой инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года п. 1.2.2 «Конверсия и обогащение урана ...» основными направлениями повышения эффективности производства являются энергоэффективность, снижение нагрузки на окружающую среду.

Результатами исследований являются новые технологии термостатирования и технические решения в области сублимационных и десублимационных процессов в производстве по разделению изотопов урана, создание источников получения низких температур, новые сведения о физических свойствах HF в области криогенных температур.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16–48–700732 р_а, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания № 9.9625.2017/8.9 и № 0721–2020–0036.

Актуальность работы заключается в необходимости повышения эффективности производства, снижении удельных затрат энергии на единицу продукции, обеспечении безопасности производства для окружающей среды, персонала.

Разработка новых технологий основываются на более глубоком знании теплофизических свойств веществ, термодинамических процессов в установках трансформации тепловой энергии. Экспериментальные и теоретические исследования уточняют свойства веществ, находящихся в различном агрегатном состоянии, обосновывают новые методы интенсификации тепло- и массообмена.

Степень разработанности темы исследования. Каждый участок в технологии разделения изотопов урана имеет свои особенности. Применяемые для осуществления процессов термостатирования технические решения являются уникальными, присущими сложившемуся процессу.

Задачи повышения эффективности производства можно разделить на две группы. Первая группа охватывает задачи по обеспечению требований технических условий на эксплуатацию газовых центрифуг. Вторая группа задач

направлена на повышение эффективности конденсационно-испарительных установок, установок по сублимации и десублимации веществ, обращающихся в производстве.

Комплексное рассмотрение задач термостатирования и повышения эффективности этих процессов в рамках каждой группы до настоящего времени не применялось. Проработка технических решений для повышения эффективности каждой установки производилась индивидуально. Достижение максимальной энергоэффективности процессов возможно только при комплексном подходе, который предусматривает техническое перевооружение вспомогательных систем, изменение участков технологии.

Проблемы повышения энергоэффективности установок, обеспечивающих микроклимат в помещениях с газодвигательным оборудованием, проработаны для зимних режимов эксплуатации оборудования. Режим «самоотопления» (использование тепловой энергии, выделяемой оборудованием для теплоснабжения в зимний период времени) реализован на всех предприятиях отрасли. Но наибольшая нагрузка установок термостатирования приходится на летний период. В летний период проводится охлаждение оборудования, воздуха в помещениях рабочей зоны, осушка воздуха. Практические и экспериментальные исследования охлаждения помещения с газовыми центрифугами (ГЦ), исследования стратификации воздуха по ярусам размещения оборудования, распределение влажности воздуха в объеме цеха в летний период не проводились.

Условием режима эксплуатации вентиляционных систем в летний период является обеспечение требуемой влажности воздуха. Эксплуатация вентиляционных систем осуществляется в соответствии с техническими условиями. Определение энергоэффективных режимов работы вентиляционных систем, обеспечивающих осушку воздуха, не проводилось, и не реализовывалось.

Требуется изучение процессов кондиционирования, охлаждения ГЦ, гидравлических режимов системы «холодильная станция – потребитель» из-за расширения диапазона допустимых температур поверхностей ГЦ.

Анализ возможности реструктуризации гидравлических сетей транспортировки холодоносителя не проводился. Технические решения по изменению конфигурации систем снабжения холодоносителем не формулировались.

Процессы сублимации, десублимации гексафторида урана (ГФУ) системами охлаждения изучены достаточно хорошо в интервале температуры от 193 К до 293 К и при температуре жидкого азота 77 К. Такой температурный интервал определяется возможностями существующих технологий. Процессы десублимации в более широком температурном интервале от 77 К до 193 К не изучались в связи с отсутствием надёжного и универсального источника холода.

Целью диссертационного исследования является: разработка систем, устройств, технологических процессов и применение новых разработок в народном хозяйстве; теоретическое обоснование возможностей совершенствования процессов термостатирования технологических участков; описание порядка разработки и внедрения в производство эффективных

процессов; техническое перевооружение участков «искусственного» охлаждения действующего производства; рекомендации для перспективных производств; предложения по совершенствованию технологии разделения изотопов урана.

В рамках достижения цели диссертации предусматривалось проведение следующих работ и решение следующих **задач**:

- исследование стационарного турбулентного естественно-конвективного и принудительного течения влажного теплопроводного воздуха в окрестности теплонатяженных объектов специального электрооборудования. Получение численных значений тепловых потоков, значений распределения полей влагосодержания, а также распределения воздушных и тепловых потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей. Подтверждение адекватности модели результатами опытных работ. Реализация в действующем производстве режима кондиционирования с полученными при численном моделировании параметрами;

- определение пределов повышения мощности при техническом перевооружении турбохолодильного оборудования, связанным с переходом на озонобезопасный хладагент на основе моделирования термодинамических и тепло- и массообменных процессов холодильного цикла в испарителе и конденсаторе турбохолодильной машины типа ТХМВ-248. Исследование гидродинамики системы «холодильная станция – потребитель». Моделирование тепломассообмена и гидродинамики циркуляции охлаждающей воды. Техническое перевооружение турбохолодильного оборудования. Практическая реализация энергоэффективного гидравлического режима;

- термодинамический анализ теоретического и действительного турбодетандерного холодильного цикла, определение мощности установки генерации холодного воздуха. Расчёт тепловых потоков в установках десублимации веществ с учётом течения, диффузии на границе раздела газовой и твёрдой фаз;

- расчетно-теоретическое исследование газодинамических и тепломассообменных процессов при конденсации ГФУ. Создание модели расчёта аэродинамических параметров, алгоритма численного решения математической модели течения холодного воздуха в сети секционных трубопроводов различной конфигурации блока ёмкостей с учётом теплообмена потока холодного воздуха со стенками ёмкостей, теплообмена с окружающей средой и потоков тепла при десублимации веществ согласно технологическому циклу «десублимация – сублимация – охлаждение после сублимации», происходящих одновременно и асинхронно в системе емкостей;

- термодинамическое расчетно-теоретическое обоснование и формулирование требований к холодильному оборудованию для модернизации технологии очистки потоков ГФУ от примесей. Создание и внедрение в производство воздушной холодильной машины. Техническое перевооружение установок десублимации целевого вещества;

- расчетно-теоретическое исследование десублимации фтористого водорода в присутствии неконденсируемых компонентов газовой смеси с учётом различной степени ассоциации молекул фтористого водорода, влияния

неконденсируемых газов. Исследование течения холодного воздуха в системе «десублиматор – отсек охлаждения», с учётом теплообмена со стенками ёмкостей, окружающей средой и потоков тепла от газовой смеси при десублимации HF.

– опытно-экспериментальные работы направленные на изучение десублимации HF в отсеке охлаждения в динамическом режиме совместно с расходом неконденсируемых газов; определение температурной зависимости давления насыщенных паров HF при температуре ниже температуры замерзания HF.

– изучение возможностей замещения жидкого азота охлаждённым воздухом в технологическом процессе десублимации HF. Получение доказательств преимуществ изменения температурного уровня десублимации HF.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1 Исследовано естественно-конвективное и принудительное течение влажного теплопроводного воздуха в окрестности теплонапряженных объектов специального электрооборудования, распределение полей влагосодержания, воздушных и тепловых потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей в пределах требуемых величин. Путем прямого измерения параметров получены численные значения тепловых потоков и распределения полей влагосодержания, подтверждена адекватность математической модели. В действующем производстве реализован режим кондиционирования с параметрами, полученными при численном моделировании.

2 На основании расчётно-экспериментальных исследований тепломассообменных и термодинамических процессов в элементах турбохолодильной машины разработана методика определения предельных значений физических параметров рабочего тела при форсировании турбокомпрессора для перехода на озонобезопасное рабочее тело.

3 Разработана математическая модель охлаждения блока приёмных ёмкостей для десублимации газа с использованием в качестве хладагента воздуха; расчетно-теоретическим путем определены технологические параметры эффективного технологического цикла «десублимация – сублимация – охлаждение после сублимации», в системе блоков приемных емкостей, происходящих одновременно и асинхронно.

4 Теоретически обоснована, разработана, и внедрена в производство воздушно-холодильная машина ВХМ 0,54/0,6 - универсальный источник криогенных температур для осуществления процессов десублимации веществ.

5 Создан опытно-экспериментальный стенд по определению парциальных давлений веществ в диапазоне температуры от 93 К до 193 К.

6 Получены новые экспериментальные ранее не известные сведения о давлении HF в режиме конденсации и десублимации в диапазоне температуры от 93 К до 193 К. Получено новое уравнение зависимости парциального давления HF от температуры справедливое в диапазоне температуры от 140 К до 190 К.

7 Получены ранее не известные сведения о параметрах конденсации HF в динамическом режиме совместно с расходом неконденсируемых газов в интервале температуры от 133 К до 213 К.

8 На основании теоретических исследований, результатов экспериментальных работ обоснован способ десублимации фтористого водорода с исключением применения жидкого азота. Способ охлаждения газовой смеси и десублимации HF в смеси с гексафторидом урана внедрён в действующее производство.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем: Математическими моделями описаны характерные и критические режимы стационарного турбулентного, естественно-конвективного и принудительного течения вязкого теплопроводного воздуха в окрестностях электротехнического оборудования с учётом процессов стратификации по ярусам размещения оборудования, расположенного в помещении. Получены значения распределения полей влагосодержания, а также распределения воздушных потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей.

Разработана методика определения пределов форсирования турбокомпрессора холодильной машины при переходе на работу с озонобезопасным рабочим телом, основанная на определении достижимых предельных значений теплопередачи элементов холодильной машины. Методика включает математические модели испарителя, конденсатора, газодинамические характеристики нагнетателя и газовых коммуникаций, использует экспериментальные данные, полученные при физическом моделировании процессов в действующей установке.

Разработана методика прогнозирования оптимальных значений давлений для регулировок в гидравлической сети с использованием гидравлического подхода, позволяющая анализировать изменение распределения потоков при изменении коэффициентов сопротивления объектов.

Получены экспериментальные данные о зависимости давления насыщенного, безводного HF от температуры в интервале от 77 К до 213 К. Получено уравнение зависимости давления насыщенного пара HF от температуры, справедливое в диапазоне от 140 К до 190 К.

Представлены результаты теоретического исследования и экспериментальных работ по выявлению условий осуществления эффективного процесса удаления фтористого водорода из газовой смеси, в том числе в динамическом режиме.

Практическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании, последующем внедрении в производство эффективных технологий термостатирования, кондиционирования, конденсации, сублимации и десублимации в совокупности с изменениями технологических процессов.

Разработанные физико-математические модели, результаты физического моделирования процессов, данные, полученные при экспериментальных работах, о давлении насыщенных паров фтористого водорода могут использоваться при проектировании оборудования и создания технологий в химической отрасли. Предложенный принцип охлаждения с помощью холодного воздуха может быть рекомендован для применения в различных областях промышленности.

Практическая значимость также заключается в **реализации результатов работы** в технологии разделения изотопов урана, а именно:

– реализован эффективный режим эксплуатации вентиляции действующего производства на основании исследования процессов кондиционирования и осушки воздуха в помещениях с тепловыделяющим электрооборудованием с использованием режимов стационарного турбулентного естественно-конвективного и принудительного течения вязкого теплопроводного воздуха. Даны рекомендации для распространения опыта на предприятиях отрасли;

– достигнуто повышение холодопроизводительности единицы турбохолодильного оборудования на 20,98 % при одновременном снижении потребления электроэнергии на 17 % путем технического перевооружения элементов турбохолодильных машин;

– создана воздушно холодильная машина; решён комплекс задач, необходимых для внедрения нового оборудования;

– расчётно-теоретическим путём обоснована и внедрена в действующее производство децентрализованная система термостатирования установки десублимации;

– выявлены оптимальные температурные режимы сублимации и десублимации UF_6 , конденсации HF ; осуществлена имитация процесса на опытно-экспериментальном стенде;

– внедрён способ фракционной разгонки газовой смеси HF и UF_6 в действующее производство по разделению изотопов урана.

Методология и методы исследования. Методологическая стратегия настоящего исследования представляет собой структурированную программу действий.

На первом этапе всесторонне изучается литература и публикации по данному направлению исследования. Выявляются возможности по снижению требуемой мощности участков технологии. Определяются перспективные параметры процессов. Изучаются смежные элементы технологии с целью определения технических возможностей и необходимых изменений для приближения к перспективным параметрам процесса. Используются методы физико-математического моделирования и численного решения сформулированных задач. Активно используются инструменты компьютерного моделирования.

После проработки каждого технологического участка производится комплексный анализ совокупности факторов и определяются достижимые границы изменений технологии. При необходимости уточнения параметров разрабатываются методики экспериментов, организуются опытно-экспериментальные работы для подтверждения гипотез, либо для получения дополнительных сведений, требуемых для доказательств исходных предпосылок.

Этап внедрения разработок в производство характеризуется решением разноплановых инженерных задач. Спектр решаемых задач – от конструирования оборудования до разработки управляющих программ, использующих логические модули элементов существующего оборудования, технических комплексов.

Логическим завершением исследований является: обобщённый анализ достигнутых результатов; выдача рекомендаций для оформления технических

заданий на модернизацию, техническое перевооружение производства; постановка задач для последующих исследований.

На защиту выносятся:

1 Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств:

- HF особой чистоты (99,99 % об.), и его смеси с UF_6 и неконденсируемыми газами при его десублимации. Влияние на процесс десублимации HF неконденсируемых газов в смеси, оценки критической степени перенасыщения HF эффективного процесса. Экспериментальные данные о зависимости давления насыщенного, безводного HF от температуры в интервале от 77 К до 213 К. Уравнение зависимости давления насыщенного пара HF от температуры, справедливое в диапазоне от 140 К до 190 К;

- фреонов R-12, R-134a в широкой области температур и давлений холодильного цикла в элементах турбохолодильной машины.

2 Аналитические и численные исследования теплофизических свойств:

- безводного HF и UF_6 от температуры в интервале от 77 К до 213 К при изменении агрегатного состояния в процессах сублимации-десублимации;

- фреонов R-12, R-134a в жидком и газообразном агрегатных состояниях.

3 Исследования термодинамических процессов и холодильных циклов применительно к установкам трансформации энергии, а именно:

- методика определения достижимой мощности турбохолодильной машины при переходе на работу с озонобезопасным рабочим телом;

- теоретическое обоснование и результаты внедрения в промышленность универсального источника криогенных температур – воздушной холодильной машины ВХМ 0,54/0,6.

- способ охлаждения газовой смеси ГФУ и HF;

- методика расчета течения холодного воздуха в сети секционных трубопроводов блока ёмкостей и в теплообменниках ёмкостей, теплообмена от потока холодного воздуха к стенкам ёмкостей при десублимации потоков ГФУ согласно циклу процессов «десублимация – сублимация – охлаждение после сублимации», происходящих одновременно и асинхронно в динамическом режиме;

- способ фракционной разгонки газовой смеси, состоящей из ГФУ, HF и примесей. Результаты внедрения способа в производство.

4 Экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия потоков энергии максимально достижимой интенсивности:

- фреонов R-12, R-134a в условиях фазовых переходов обратного цикла Карно в турбохолодильной машине. Методика определения достижимой эффективности турбохолодильной машины при переходе на работу с озонобезопасным рабочим телом, использующая экспериментальные данные, полученные в действующей установке;

- десублимации HF особой чистоты, и его смеси с UF_6 в присутствии неконденсируемых газов.

5 Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции турбулентного естественно-конвективного

и принудительного течения вязкого теплопроводного воздуха в широком диапазоне режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей с учётом процессов стратификации по ярусам размещения оборудования, расположенного в заданном объёме. Значения распределения полей влагосодержания, а также распределения воздушных потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей. Внедрение энергоэффективного режима вентиляции в действующее производство.

6 Результаты физического и численного моделирования процессов переноса массы, импульса и энергии сухим воздухом при десублимации и сублимации фтористого водорода, с учетом различной степени диссоциации молекул, подтверждение теоретических исследований результатами экспериментальных работ.

7 Разработка научных основ эффективной совместной десублимации HF и UF₆. Способ фракционной разгонки газовой смеси HF и UF₆.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- результатами опытно-промышленной эксплуатации систем вентиляции на объектах АО «СХК», показавшими хорошую сходимость значений величины тепловой энергии, отводимой от объектов, распределения полей температуры и влажности в массиве оборудования с результатами расчётов и математической модели;

- достигнутыми параметрами работы холодильной станции, подтверждающими прогнозируемые эффекты после проведения технического перевооружения турбохолодильных машин;

- согласованием результатов расчётов температуры воздуха на выходе из теплообменников ёмкостей, времени охлаждения ёмкостей до температуры десублимации с результатами измерений, проведёнными при экспериментальных испытаниях ВХМ;

- результатами экспериментального исследования изменений парциальных давлений основных компонентов газовых смесей HF, UF₆ в стационарном и динамическом режимах конденсации и десублимации в присутствии неконденсируемых газов;

- имитацией перспективного технологического процесса, осуществлённой на опытно-экспериментальном, испытательном стенде;

- внедрением в действующее производство «Способа охлаждения газовой смеси»;

- внедрением в действующее производство «Способа фракционной разгонки газовой смеси, состоящей из гексафторида урана, фтористого водорода и примесей».

Апробация работы. Материалы работы докладывались на III Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2013), Отраслевой научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики и промышленности» (Северск, 2014), VI Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности» (Томск, 2014), V Международной школе-конференции молодых атомщиков Сибири (Томск,

2014), VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» (Томск, 2015), IX Всероссийской научной конференции (Томск, 2016), Международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2017, 2018), Всероссийская научная конференция «XII Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (г. Сочи 2021 г.) – 2 доклада, XIV Международная научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» ТПУ (Томск, 2021) – 2 доклада, XXVIII Всероссийская конференция с международным участием «Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды», посвященная 100-летию со дня рождения Н.Н. Яненко. (г. Новосибирск 2021) – 2 доклада. Всего сделано 20 докладов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 49 работ, в том числе 10 статей в журналах, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (из них 2 статьи в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Web of Science; 1 статья в белорусском научном журнале, переводная версия которого входит в Web of Science), 5 статей в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 1 статья в прочем научном журнале, 3 статьи в сборниках научных трудов, 12 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций; получено 10 патентов Российской Федерации, 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 1 свидетельство о регистрации электронных баз данных.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 302 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений и списка литературы, включающего 299 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы.

В первой главе проведён анализ существующих систем термостатирования технологии разделения изотопов. Представлена блок-схема газоцентрифужного производства. Приведено описание элементов технологии, порядок протекания процессов с указанием мест приложения энергии.

На рис. 1 представлена блок-схема газоцентрифужного производства.

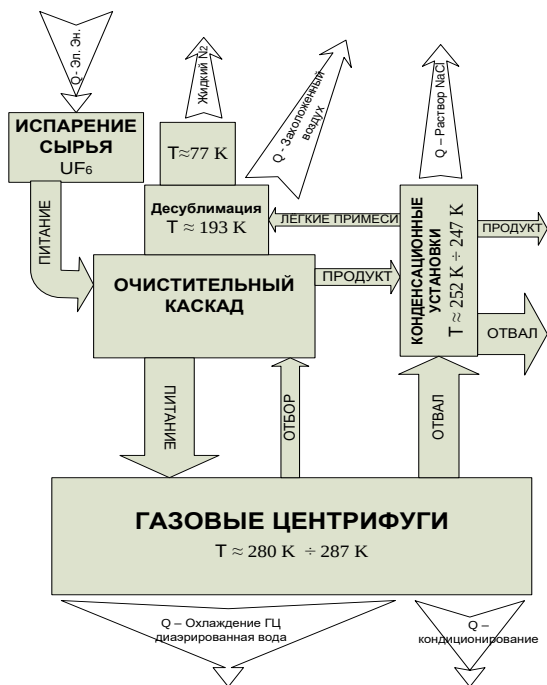


Рисунок 1 – Блок-схема
газоцентрифужного производства

ГФУ поступает для испарения в технологию в твердом состоянии. Испарение сырья производится путём индукционного нагрева материала ёмкости в специальных индукторах. Газообразный ГФУ поступает в очистительный каскад. Здесь производится очистка сырьевого UF_6 от примесей. В процессе очистки образуется «отвал», представляющий собой смесь воздуха и газов с невысокими атомными массами. Образовавшаяся газовая смесь поступает на разделение в установку по десублимации.

Очищенный от примесей ГФУ поступает в блоки газовых центрифуг, где на каждой ступени происходит повышение концентрации UF_6 , содержащего ^{235}U .

Процесс разделения изотопов сопровождается значительным выделением тепловой энергии. Отвод тепловой энергии организован двумя способами: путём водяного охлаждения специальных рубашек газовых центрифуг, являющихся элементом их конструкции, а также путём охлаждения корпусов газовых центрифуг (электроагрегатов) воздухом.

Охлаждение воздухом осуществляется с применением систем вентиляции. Помимо функции по охлаждению электроагрегатов, вентиляция обеспечивает требуемый режим влажности в производственном помещении.

После обогащения в блоках газовых центрифуг поток ГФУ (рис. 1) делится на две части. Одна часть – «отбор» – поступает на очистку в блоки очистительного каскада, а затем «продукт» – на конденсацию в товарные ёмкости. Вторая обеднённая по изотопу ^{235}U часть ГФУ – «отвал» – поступает на конденсацию в ёмкости хранения.

Процесс конденсации и очистки технологических потоков для достижения продуктом требуемого качества осуществляется на двух температурных уровнях, $T = 193 \text{ K}$ и $T = 77 \text{ K}$, и состоит в проведении десублимации и сублимации потока ГФУ в специальных термостатированных осадительных ёмкостях (ОС). Охлаждение установки десублимации $T = 193 \text{ K}$ производится «захолаженным» воздухом, установки десублимации $T = 77 \text{ K}$ – жидким азотом.

На рис. 1 представлено взаимное влияние каждой системы термостатирования как на весь процесс в целом, так и на смежные участки технологии. Снижение энергоёмкости и энергонапряжённости каждого элемента неизбежно оказывает влияние на весь энергобаланс системы. Детальный разбор каждого элемента и общий анализ совокупности факторов позволяет сформулировать основные проблемы и задачи исследования, а также пути их решения.

Кондиционирование производственных помещений с газовыми центрифугами. Нагрузка на вентиляцию составляет от 15 % до 22 % общей мощности искусственного охлаждения и имеет высокую степень неравномерности, полностью отсутствует в начале и конце периода охлаждения или имеет максимальные значения в период температурных максимумов наружного воздуха. Эмпирический характер методик получения значений тепловых потоков для управления процессом имеет значительную погрешность, искажающую реальную картину физического процесса теплообмена. Для выявления условий протекания эффективного процесса проанализированы возможности по оптимизации организации теплообмена электрооборудования с воздухом. Сформулированы задачи и направления исследования.

Системы холодоснабжения большой мощности. Рассматриваются системы холодоснабжения разделительных производств большой мощности. Описывается острота проблемы, связанная с запрещением использования галогеносодержащих фреонов, являющихся рабочим телом турбохолодильных машин.

Анализ работы холодильной станции по укрупнённым показателям показал низкую эффективность работы холодильных машин. Отмечается необходимость в проведении параметрических исследований эффективных теплообменных и газодинамических пределов турбохолодильной машины. Потребность в определении мощности, имеющей максимальную эффективность, заключается в том, что поскольку неизбежно техническое перевооружение, связанное с переходом на озонобезопасный хладагент, то рационально одновременно произвести улучшение энергетических характеристик оборудования. Определение предела повышения мощности является необходимым условием проведения технического перевооружения турбохолодильного оборудования.

Оптимизация гидравлических режимов. Требуется разработка методики расчёта параметров холодоносителя в контуре циркуляции воды в объекта с тепловой нагрузкой более 25 Гкал/час для повышения эффективности использования турбохолодильного оборудования с увеличенной единичной мощностью. Необходим инструмент, позволяющий прогнозировать оптимальные значения давлений для регулировок в гидравлической сети термостатирования объектов.

Перспективные системы термостатирования. Обобщая результаты исследования систем и оборудования, обеспечивающих термостатирование производств по разделению изотопов урана, практические результаты работ по повышению эффективности работы вентиляционного оборудования, потребность в техническом перевооружении турбохолодильных машин, оптимизацию гидравлических режимов, можно констатировать необходимость кардинального

пересмотра принципов организации охлаждения. Нагрузка на кондиционирование характеризуется значительными колебаниями мощности. Наличие значительных количеств отводимого от технологических комплексов тепла позволяет применить технические решения по его утилизации. Комплекс возникших проблем возможно решить путем обоснования перспективных схем термостатирования.

Процессы сублимации, десублимации. При эксплуатации очистительных каскадов образуются газовые смеси, подлежащие фракционной разгонке. Компонентами газовых смесей являются ГФУ, НФ, воздух и другие неконденсируемые газы. UF_6 , обеднённый и обогащенный по изотопу ^{235}U , подлежит строгому учёту. Для этого ГФУ извлекается из газовых смесей и возвращается в процесс обогащения.

Очистка и конденсация технологических потоков для достижения продуктом требуемого качества осуществляется на трёх температурных уровнях: $T = 253 \text{ K}$; $T = 193 \text{ K}$; $T = 77 \text{ K}$. Очистка состоит в проведении десублимации и сублимации потока ГФУ в специальных термостатированных ёмкостях. Температурный режим $T = 253 \text{ K}$ (ступень 1) служит для конденсации ГФУ в ёмкости. Температурные режимы $T = 193 \text{ K}$ (ступень 2) и $T = 77 \text{ K}$ (ступень 3) предназначены для вымораживания остатков продукта и примесей. Из трёх температурных режимов наиболее затратным является процесс, происходящий при температуре $T = 193 \text{ K}$, так как используется жидкий азот. Главным недостатком использования жидкого азота в третьей ступени является сложность в автоматизации процесса при переливе жидкого азота из сосуда Дьюара в отсеки емкостей.

Для окончательного решения вопроса о замещении жидкого азота холодным воздухом требуется проведение исследования в области газодинамики, тепломассообмена, изучения сублимационно-десублимационных процессов. Получение экспериментальных данных о давлении насыщенного пара фтористого водорода в диапазоне температуры от 77 K до 143 K .

В выводах по главе констатируются возможности экономии значительных ресурсов, задействованных в обеспечении объектов, использующих «искусственный» холод, указывается комплекс мероприятий, реализация которых позволяет достигнуть основной цели – рационального, энергоэффективного процесса термостатирования.

Во второй главе описываются механизмы переноса массы, импульса и энергии при сложном теплообмене, возникающем при естественно-конвективном и принудительном движении вентиляционного воздуха в окрестностях поверхностей условных электроагрегатов и показываются возможности полезного использования естественных эффектов.

Рассматривается модель помещения, в котором электрооборудование расположено (рис. 2) двумя рядами с проходом в центре здания и отступом от торцов здания. Однотипные элементы оборудования находятся в каждом ряду в шахматном порядке. За счет тепловыделений для известной части поверхности оборудования характерна повышенная температура. В производственном помещении организована распределенная по площади пола подача воздуха.

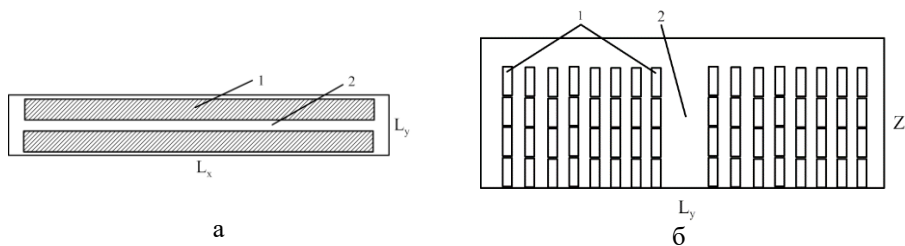


Рисунок 2 – Вид сверху (а) и поперечное вертикальное сечение (б) производственного помещения: 1 — элементы электрооборудования; 2 — центральный проход; L_y , L_x , Z — длина, ширина и высота здания соответственно

Теплообмен воздуха производственного помещения происходит с поверхностью оборудования, стенами, полом и потолком. Массообмен атмосферы помещения с окружающей средой осуществляется за счёт негерметичности здания, когда при небольших перепадах давления воздух проходит через поры строительных материалов, оконные блоки и другие неплотности элементов конструкций. Поверхности охлаждаются за счёт теплообмена с воздухом.

Существующая практика определения мощности тепловой нагрузки электрооборудования не учитывает влияние естественно-конвективных потоков воздуха. Естественно-конвективное движение, когда восходящие потоки воздуха забирают часть тепла от поверхностей электроагрегатов, имеющих высокую температуру и переносят к электроагрегатам, находящимся выше, у которых внизу расположены участки с пониженной температурой. В такой структуре течения возможно ожидать, что все тепло, которое снимается воздухом с теплых поверхностей, передается участкам поверхностей с низкой температурой.

Рассматривается ограниченная область производственного помещения (рис. 3), где размещено группами попарно в пять ярусов электрооборудование. Область представляет собой прямоугольный параллелепипед, являющийся элементом периодического расположения оборудования. Высота области равняется 7,3 м, глубина области – 0,2 м, ширина области – 1,5 м. Внутри этой области рассматривается турбулентное естественно-конвективное течение вязкого теплопроводного воздуха. Для расчёта приняты геометрические размеры условного оборудования (рис. 4), стилизованные с поверхностью среднестатистического электроагрегата. Поверхность каждого электроагрегата разделена на участки, температура которых имеет постоянную величину. Для участков расположения обмотки электродвигателя и рубашки охлаждения приняты характерные значения температуры.

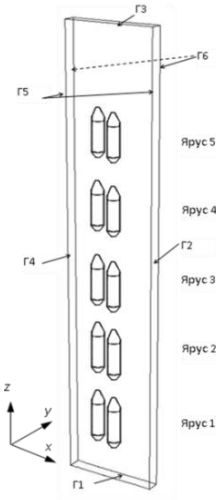


Рисунок 3 – Область течения воздуха

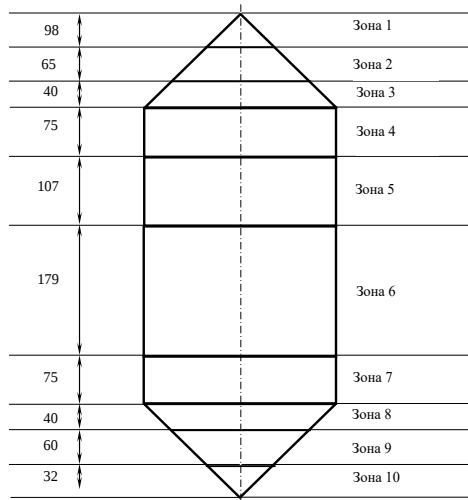


Рисунок 4 – Размеры поверхностей электроагрегата, мм

Стационарное естественно-конвективное течение воздуха описывается трёхмерными уравнениями Навье–Стокса для несжимаемого идеального газа с учетом вязкости, теплопроводности и действия силы Архимеда с привлечением к-ε модели турбулентности. Система определяющих уравнений имеет вид:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \tau_{eff} - \vec{g} (\rho - \rho_0), \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho H \vec{V}) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + \nabla \cdot (\tau_{eff} \cdot \vec{V}) - \vec{g} (\rho - \rho_0) \vec{V}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho k \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) замыкается уравнением состояния идеального газа:

$$p = \rho \frac{R_y}{M} T, \quad (6)$$

На внешних границах расчетной области (рис. 3), которые представляют собой плоскости симметрии Г2, Г4, Г5, Г6, задаются условия симметрии. В случае принудительной вентиляции помещения предполагается, что через границу Г1 воздух поступает в область, а через границу Г3 воздух выходит из неё. На границе Г3 задаётся давление, соответствующее атмосферному.

Значения теплофизических характеристик воздуха, принятые в расчетах: $c_p = 1006 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\lambda = 0.0242 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $g = 9.81 \text{ м/с}^2$; $\mu = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $Pr_{\text{турб}} = 0.85$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Для решения системы уравнений (1) - (6) использовался вычислительный пакет «Ansys Fluent». Точность расчёта контролировалась балансом тепловых потоков и потоков массы. Разностная сетка обеспечивает выполнение закона сохранения массы 99.7 % и точность вычисления величин тепловых потоков на поверхности электрооборудования 96.6 %.

На рис. 5 представлены результаты для двух предельных вариантов исследований течения воздуха: 1 – с принудительным движением воздуха, 2 – принудительное движение воздуха отсутствует.

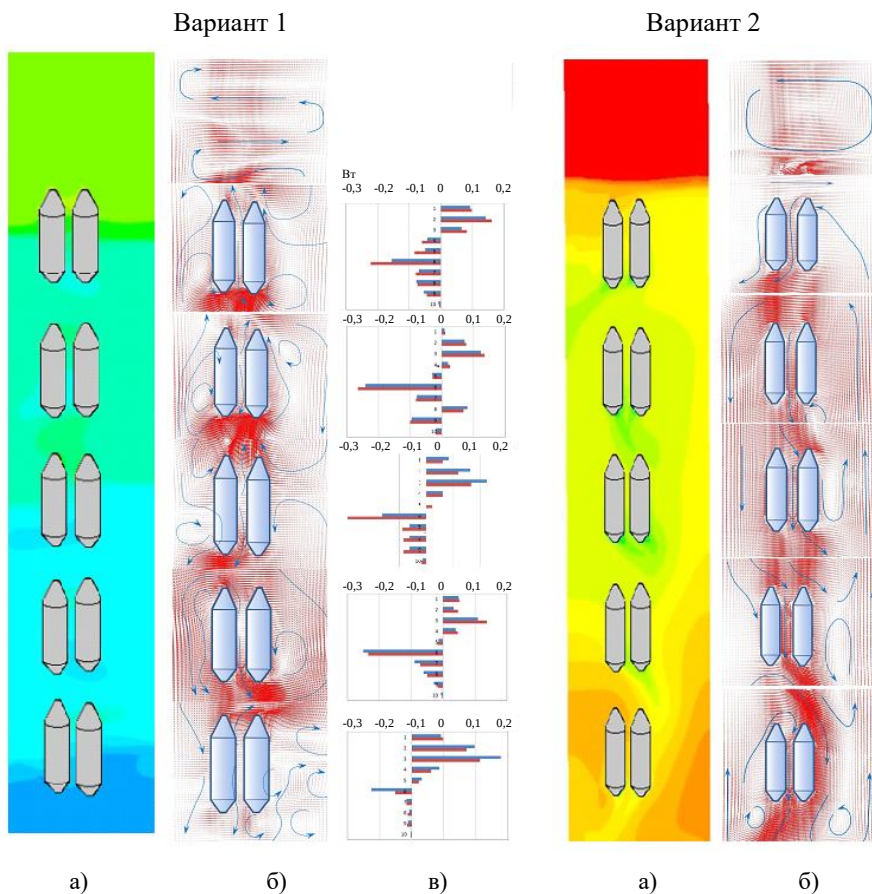


Рисунок 5 – Поле температуры (а), поле течения воздуха (б), распределение теплового потока по поверхностям в срединной плоскости расчетной области (в)

Из рис. 5 видно, что воздух стратифицирован по высоте: более холодный воздух находится в нижней части, более тёплый воздух – вверх. Наибольший градиент температуры при отсутствии принудительного движения воздуха (рис. 5 Вариант 2 б) в вертикальном направлении наблюдается в областях выше уровней расположения электроагрегатов. Оба режима удовлетворяют условиям термостатирования электроагрегатов. Но для режима Вариант 2 б) требуется меньше затрат энергии.

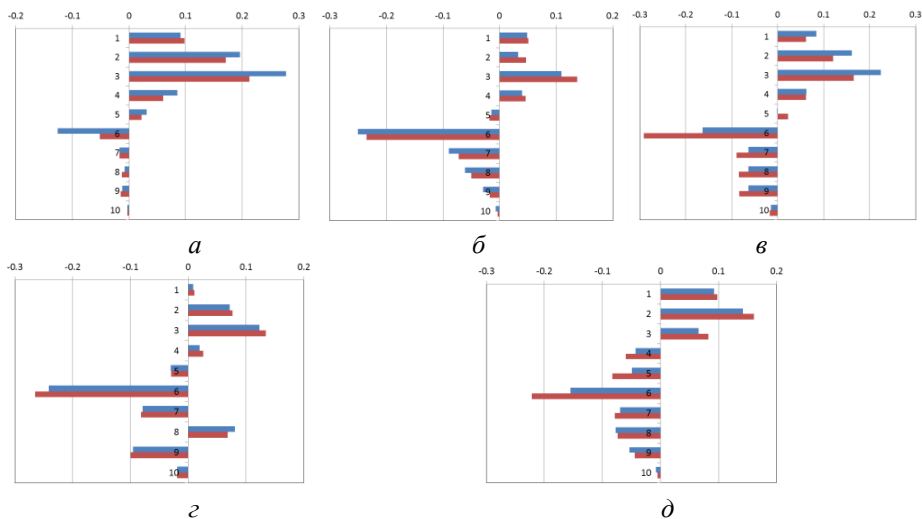


Рисунок 6 – Распределение теплового потока по зонам, Вт

Красный цвет соответствует правому ряду электрооборудования (см. область исследований, рис. 3), синий – левому. Положительные значения соответствуют потоку тепла в воздух, отрицательные величины – от воздуха. Как видно из диаграмм, на нижнем (первом) ярусе (рис. 6а) верхняя часть отдаёт тепло в окружающий воздух, поток тепла в нижнюю её часть незначителен. Для расположенных выше электроагрегатов интенсивность потока тепла в нижнюю часть оборудования возрастает (рис. 6в-д). Наибольших значений скорость движения воздуха достигает в области 2-го и 3-го ярусов (рис. 6б, в). Здесь наблюдаются наибольшие различия в направленности тепловых потоков. На пятом ярусе различие меньше.

тепло от воздуха. Потоки тепла для двух соседних единиц оборудования (левого и правого рядов) различаются, что связано с гидродинамикой течения воздуха.

Таблица 1 – Суммарные потоки тепла, поглощаемые электрооборудованием, Вт

Ряд	Ярус 1	Ярус 2	Ярус 3	Ярус 4	Ярус 5
Левый	0.516906	-0.21986	0.161542	-0.15862	-0.1561
Правый	0.467085	-0.11478	-0.13286	-0.17814	-0.22543

Суммарный поток тепла от электроагрегатов в воздух составляет 1.1455 Вт, суммарный поток тепла ко всем электроагрегатам 1.1858 Вт. Баланс потоков составляет -0.0403 Вт. Эта величина менее 4 % от величины суммарного потока тепла, поступающего к электроагрегатам от воздуха. При отсутствии принудительного движения воздуха естественно-конвективное движение обеспечивает практически нулевой баланс тепловых потоков. Воздух осуществляет перенос тепла между поверхностями электроагрегатов. Это явление оказывает существенное влияние на весь процесс термостатирования.

Влияние вентиляционной нагрузки задействованной для поддержания влажности изменяет картину течения естественно конвективных потоков. Очевидно, что при минимуме влияния вентиляции баланс тепловых потоков на поверхностях стремиться к нулю. Необходимая составляющая правильно организованной системы вентиляции – удаление влажного воздуха из помещения должно стремиться к минимальным объемами подачи в помещений «свежего» – подготовленного воздуха. Режим осушки также имеет параллельную задачу – восстановление нормального режима от некоторого неудовлетворительного состояния. Прогнозирование динамики изменения влажности по времени позволяет правильно организовать систему вентиляции.

В основу модели вентиляции здания размером 500×50×8,5 метров (подобного см. рисунок 2) положены уравнения газовой динамики, записанные в двумерном плоском приближении:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p u}{\partial x} + \frac{\partial p v}{\partial y} = (G_{in} - G_{out}) \frac{1}{Z}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial \rho_p u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_p v}{\partial y} = \left(\frac{\rho_{p,in}}{\rho_{in}} G_{in} - \frac{\rho_p}{\rho} G_{out} \right) \frac{1}{Z}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} = (G_{in} u - G_{out} u - F_x) \frac{1}{Z}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + p)}{\partial y} = (G_{in} v - G_{out} v - F_y) \frac{1}{Z}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E u + p u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho E v + p v)}{\partial y} = \left\{ H_{in} G_{in} - \left(H_{out} + \frac{u^2 + v^2}{2} \right) G_{out} - \right. \\ \left. - \alpha_1 (T - T_1) - \alpha_2 (T - T_2) - \alpha_3 (T - T_3) - \alpha_4 s_{ud1} (T - T_4) - \alpha_4 s_{ud2} (T - T_5) \right\} \frac{1}{Z}, \quad (11)$$

$$p = \rho R T, \quad (12)$$

$$E = c_v T + \frac{u^2 + v^2}{2}, \quad H_{in} = c_p T_{in}, \quad H_{out} = c_p T,$$

начальные условия:

$$p(x, y, 0) = p_0, \quad T(x, y, 0) = T_0, \quad u(x, y, 0) = 0, \quad v(x, y, 0) = 0, \quad \rho_p(x, y, 0) = \rho_{p,0}. \quad (13)$$

граничные условия:

$$u(0, y, t) = u(L_x, y, t) = 0, \quad v(x, 0, t) = v(x, L_y, t) = 0, \quad (14)$$

Сила сопротивления движению воздуха, согласно формуле Эргуня:

$$F_x = \frac{150\eta(1-\varphi)^2}{\varphi^3 d_{ekv}^2} u + \frac{1.75(1-\varphi)}{\varphi^3 d_{ekv}} \rho u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (15)$$

Коэффициент теплоотдачи α_3 определялся по формулам теплоотдачи при естественно-конвективном течении воздуха вдоль вертикальной стенки.

Расчёты для нескольких характерных вариантов подачи воздуха в здание в виде тоновых полей относительной парциальной плотности примесей (H_2O) в моменты времени 1 ч, 2 ч, 4 ч, 6 ч, 8 ч, 10 ч представлены на рис. 7, 8.

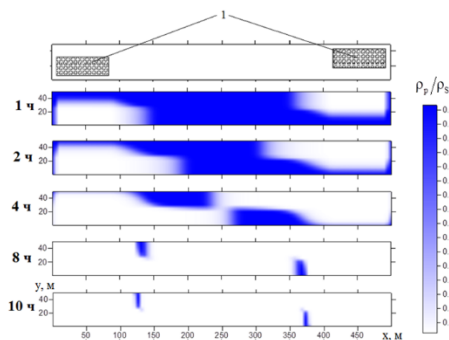


Рисунок 7 – Вариант 1

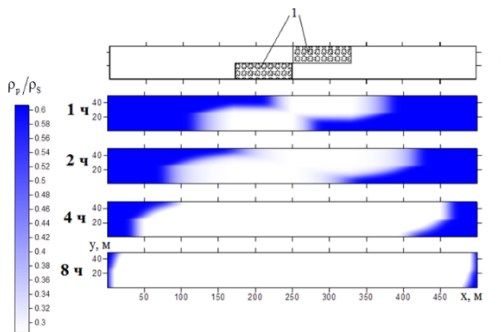


Рисунок 8 – Вариант 2

Для подтверждения результатов моделирования в 2014 и 2015 годах проведена опытно-промышленная эксплуатация (ОПЭ), подтвердившая исходные предпосылки и адекватность модели. Сравнение зарегистрированных результатов с математической моделью, проектными значениями представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение опытно-промышленной эксплуатации 2014 и 2015 гг.

Показатель	Математическая модель		ОПЭ-2014		ОПЭ-2015
	Вариант 1	Вариант 2	Этап 1	Этап 2	
Количество ВУ в работе, шт.	3	2	10	7	2,54
Производительность ВУ, м ³ /ч	125058	74000	28506	157752	74030
Потребление эл. энергии, кВт	120	80	110	63	22,86
Холодопотребление, Мкал/ч	447,11	447,11	577,4	374,37	135

Из таблицы 2 следует, что количество работающих вентиляционных установок (ВУ), необходимых для обеспечения параметров воздуха, составляет от 2 до 3 единиц. Производительность задействованных ВУ близка с результатами математического моделирования, отличие составило 1,7 %. Производительность вентиляционных систем меньше заложенной в математической модели при варианте 1 и совпадает с вариантом 2. В отличие от расчёта для наиболее напряжённого режима забора атмосферного воздуха без рециркуляции, ОПЭ 2014 и 2015 гг. проводились в режиме рециркуляции. Учитывая хорошее совпадение результатов ОПЭ-2015 с результатами решения математической модели по количеству ВУ и их производительности, можно констатировать, что влияние режима рециркуляции незначительно. В то же время работа вентиляционных систем в режиме рециркуляции позволяет значительно сократить затраты энергии на охлаждение объектов до 135 Мкал/час (снижение относительно математической модели на 69,8 %). При этом потребление электроэнергии сократится до 22,86 кВт (снижение на 81 % - вариант 1 и 71,5 % - варианты 2, 3).

Проведенные исследования позволяют получить значения оптимальных параметров воздуха в окрестностях оборудования, на основании чего – рекомендовать скорости воздуха, диапазоны температур подаваемого в помещение воздуха, места подачи, и удаления вентиляционного воздуха. Оценка экономического эффекта от внедрения энергоэффективного режима вентиляции приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Затраты на эксплуатацию вентиляционной системы

Параметр	Проектный вариант	ОПЭ-2014	ОПЭ-2015
Кол-во вент. установок в работе, шт.	24	8	2,54
Тепловая нагрузка, Гкал	2 863,62	1 427,27	254,29
Потребление электроэнергии, кВт	3 202 560	293 568	52 303,68
Затраты, руб.	9 286 303	2 661 457	474 179

В главе 3 рассмотрены вопросы приведения технологического комплекса в составе турбохолодильных машин типа ХТМФ-248 в соответствие с современным уровнем экологической безопасности и эффективности.

Крупный промышленный комплекс, турбохолодильная станция, является важным объектом для разделительного производства. Эксплуатация такого энергетически насыщенного комплекса сопряжена со значительными затратами. Входящие в состав станции турбохолодильные машины типа ХТМ-248 входят в класс машин большой мощности.

Необходимость технического перевооружения парка турбохолодильных машин определялась потребностью в переводе оборудования на работу с озонобезопасными веществами.

По результатам предварительного анализа предложен вариант двухэтапного технического перевооружения. На первом этапе производится замена проточной части турбокомпрессора, мультипликатора, энергетические показатели оборудования повышаются. Вторым этапом, после использования запасов R-12, предусматривается замена мультипликатора и осуществляется заправка машины R-134a. Корпус и ротор турбокомпрессора остаются неизменным. Во всех случаях мощность турбохолодильной машины должна быть максимально достижимой.

Основной сложностью реализации такого варианта являлось определение предельной мощности турбокомпрессора и газодинамических характеристик нагнетателя при различных рабочих телах в совокупности с определением возможностей теплообменной составляющей машины.

Для определения мощности проведен расчётный анализ работы испарителя. Сформулирована модель тепло- и массообмена в многотрубном теплообменнике испарителя со смешанным движением теплоносителя с учетом особенностей теплообмена трубок в жидкой фазе, в кипящем слое и контактирующих с перегретым паром.

Полученное расчетное значение холодопроизводительности, которое существенно превысило величину существующей плотности теплового потока в испарителе соответствующей номинальной мощности. Определён предел тепловой мощности испарителя.

Разработана модель для расчёта процессов тепломассообмена в конденсаторе. Учитывается, что известный массовый расход паров фреона из испарителя распределяется на два конденсатора. К этому количеству хладона добавляется масса хладона, которая возвращается в компрессор при первом дросселировании, а также хладон, который испаряется при его подаче в испаритель от поплавковой камеры (промежуточное дросселирование). Проводится расчёт теплоотдачи при конденсации хладона на горизонтальных трубках и определяется массовая скорость конденсации. При конденсации на пучках горизонтальных трубок вводится поправка на величину коэффициента теплоотдачи, связанную с накоплением плёнки конденсата на нижних рядах труб.

Выполненные расчёты показали, что теплообменные аппараты машин ХТМФ-248-4000-1 при использовании хладона R-12 со стандартными физическими свойствами способны при нормальных параметрах ($P_{\text{испар.}} = 3,33 \times 10^5$ Па, $T_{\text{ф.}} = 275$ К) обеспечивать холодопроизводительность до 5,3 Гкал/час, что подтверждено практическими измерениями при эксплуатации.

Перспективные системы термостатирования. Одним из результатов работ

по оптимизации вентиляционных систем явилось значительное снижение нагрузки на кондиционирование. Величина требуемой мощности для работы вентиляционных систем находится в пределах, позволяющих пересмотреть порядок организации кондиционирования, что в свою очередь повлечёт необходимость пересмотра всей системы термостатирования. В этом случае исчезает необходимость в централизованных системах охлаждения, когда минимальный температурный уровень хладоносителя необходим для решения параллельных задач кондиционирования и охлаждения электрооборудования.

Ещё одной возможностью перехода на более высокий температурный уровень для повышения КПД систем охлаждения, уменьшения энергозатрат на выработку единицы искусственного холода является исключение промежуточного контура охлаждения «холодильная машина – теплообменная установка». В этом случае охлаждение, возможно, организовать по схеме «холодильная машина – непосредственно оборудование». Повышение температуры кипения рабочего тела в холодильной машине на 4 К приводит к снижению энергопотребления $\approx 8\%$.

Децентрализация систем термостатирования производства по разделению изотопов урана подразумевает разделение нагрузки на охлаждение и кондиционирование. Затраты энергии на охлаждение газовых центрифуг – величина постоянная и неизменная круглосуточно и круглогодично. В таких условиях тщательный подбор оборудования требуемой мощности, обеспечивающего охлаждение в условиях работы с минимальным регулированием мощности и загрузкой, близкой к 100 %, обеспечит эксплуатацию холодильного оборудования с максимальным КПД. Для выбора оборудования важнейшим условием является точное определение нагрузки потребителей.

С использованием гидравлического подхода разработана методика расчёта параметров хладоносителя в контуре циркуляции объектов с тепловой нагрузкой более 25 Гкал/час. Методика позволяет прогнозировать оптимальные значения давлений для регулировок в гидравлической сети, обеспечивающей термостатирование объектов в стационарном режиме.

Для уточнения необходимых требований к модернизации вентсистем произведён анализ оборудования систем кондиционирования. Изменение расхода от 0,2 до 10 м³/ч значительно влияет на величину тепловых потоков и температуру хладоносителя на сливе. Понижение влагосодержания, подаваемого на калорифер воздуха, в случае реализации рекомендаций, представленных в главе 2, снизит тепловую нагрузку на них. Существенное повышение эффективности кондиционирования возможно только при использовании хладоносителя с температурой 275 К ÷ 278 К.

Сформулированы предложения по децентрализации системы охлаждения оборудования разделительного производства. Предложена перспективная система термостатирования технологической единицы, имеющая преимущества по сравнению с существующими аналогами. Схема включает технические решения по исключению промежуточных контуров охлаждения.

На рис. 9 представлена принципиальная схема перспективной холодильной

установки.

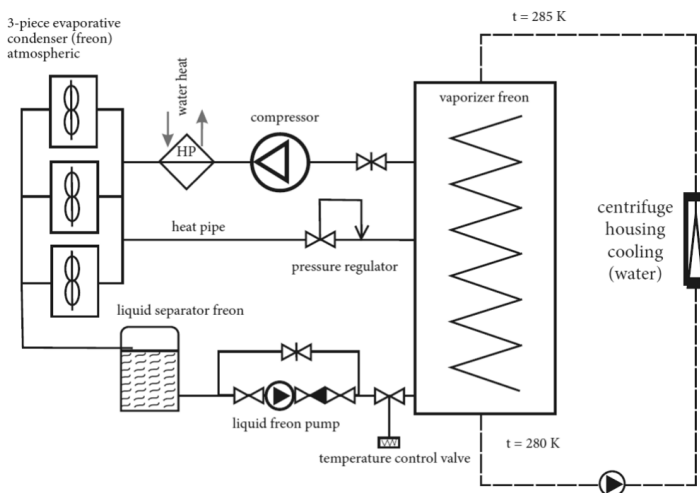


Рисунок 9 – Перспективная холодильная установка

Как показано на рис. 9 тепловая нагрузка отводится комбинированной турбохолодильной машиной мощностью до 6,5 МВт. Испарители холодильных машин включены в контур охлаждения газовых центрифуг. Конденсаторы холодильных машин испарительного типа размещаются вне помещения. Тепловая труба обеспечит перенос тепла с фреоном от испарителя в конденсатор с минимальными затратами энергии в период года с низкими температурами наружного воздуха. Турбохолодильная машина имеет функцию теплового насоса. В зимний период года обеспечивает подогрев воздуха для системы вентиляции здания, летом для систем горячего теплоснабжения.

В *выводах по главе* констатируются: достигнутые результаты технического перевооружения турбохолодильного оборудования с экономическим эффектом; результаты применения математической модели расчёта параметров холодоносителя в контуре циркуляции, результаты применения методики расчета гидравлических режимов при регулировках расходов теплоносителя. Приводится экономическая оценка преимуществ перспективной децентрализованной системы термостатирования.

В четвертой главе представлены результаты исследования очистки технологических потоков от легких примесей, основную часть которых составляет фтористый водород. Удаляемые газы подвергаются очистке от вредных и химически активных веществ, и сбрасываются в атмосферу. Сбрасываемые в атмосферу газы не должны превышать ПДК, например для $\text{HF} \leq 0,0005$ мг/литр.

Очистка технологических потоков проводится путем десублимации HF при температуре кипения азота (77 K) в охлаждаемые емкости - ОС. Не сконденсировавшиеся компоненты газовой смеси фильтруются через

специальные химические поглотители, нейтрализуются до санитарных норм перед сбросом в атмосферу. Повышение температурного уровня процесса десублимации позволит отказаться от азота. Точные сведения о давлении насыщенных паров HF над твердым телом позволяют выстраивать эффективный процесс очистки.

Известные эмпирические формулы расчета давления насыщенных паров фтороводорода, известные в научной литературе получены прямыми измерениями при температуре выше точки плавления и не могут являться подтверждением количества вещества при температуре ниже состояния твёрдого тела.

Формулы авторов: [Simons J. The preparation, freezing point, and vapor pressure of hydrogen fluoride // J. Am. Chem. Soc., 1924, V. 46, No.10, P. 2179-2183]

$$\log(P) = 7.37 - 1315/T \quad (16)$$

[Jarry R.L. and Davis W. Jr. The Vapor Pressure, Association and Heat of Vaporization of Hydrogen Fluoride // J. Phys. Chem. 1953, V. 57, No.6, P. 600– 604]

$$\log(P) = 8.38036 - 1952.55/(62.37 + T) \quad (17)$$

[Wilson L.C., Wilding W.V. and Wilson G.M. Vapor PVT and Vapor Pressure of Hydrogen Fluoride // J. Chem. Eng. Data, 2014, V. 59, No. 4, P. 983–990]

$$\log(P/1000) = 25.5266 - 3267.53/T - 1.82355 \cdot \ln(T) + 7.07191 \cdot 10^{-6} T^2 \quad (18)$$

Применение формул (16) - (18) для определения давления насыщенного пара фтористого водорода при температуре ниже 190 К (температура затвердевания HF) ограничивается тремя факторами: 1) не учитывается влияние ассоциированных молекул фтористого водорода. С понижением температуры фтористого водорода может создать максимальное значение ассоциации молекул равное 6; 2) получены для давления насыщенного пара над жидкой поверхностью; 3) экстраполяция формул на значения температуры, вне интервала измерений не корректна. При сублимации и десублимации теплота фазового перехода отличается от теплоты фазового перехода испарения и конденсации.

Для измерения давления насыщенного пара фтористого водорода при температуре ниже 253 К создан экспериментальный стенд с применением в качестве хладагента холодного воздуха (получен патент). Экспериментальный стенд состоит из ёмкости осадителя $V = 24$ л, помещённой в отсек охлаждения. Перевернутая ориентация осадительной ёмкости в пространстве применена для упрощения удаления из объёма анализируемых веществ по окончании эксперимента. Принципиальная схема экспериментального стенда по измерению давления насыщенного пара безводного HF представлена на рис. 10.

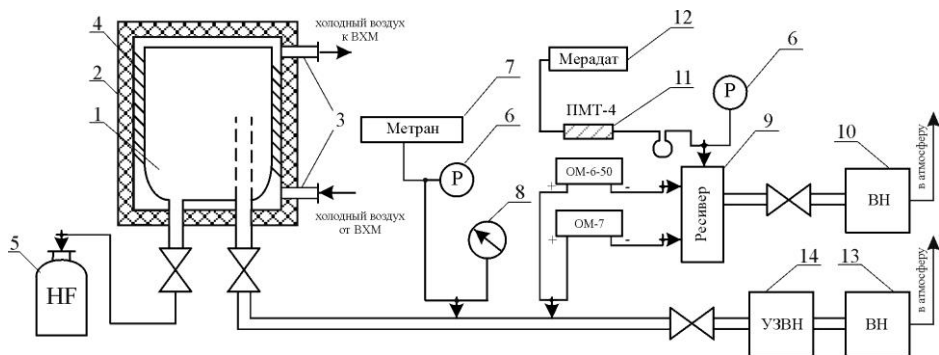


Рисунок 10 – Схема экспериментальной установки для измерения давления HF

Осадитель (1), помещённый в отсек охлаждения, покрытый слоем теплоизоляции (2). Отсек охлаждения имеет два патрубка (3): нижний – для подачи охлаждённого воздуха от воздушно-холодильной машины и верхний – для отбора отеплённого воздуха из отсека.

Для организации равномерного течения холодного воздуха вдоль стенок осадителя на стенке отсека охлаждения изготовлена напайка (4) из стальной ленты в виде серпантина. Осадитель имеет два патрубка. К одному из патрубков подсоединяется ёмкость $V = 0,5$ л с безводным фтористым водородом (5), ко второму патрубку подключены приборы измерения абсолютного и относительного давления в стенде, система вакуумирования.

По результатам экспериментальных работ получена зависимость натурального логарифма давления $\ln(P)$ от величины $1/T$ Для выбранной области методом наименьших квадратов определялось уравнение Клазиуса–Клайперона в виде:

$$\ln(P) = A - B/T, \quad (19)$$

где численные значения констант равны следующим величинам: $A = 25,7 \pm 1,7$, $B = 3911,2 \pm 292,2$. Давление насыщенного пара безводного фтористого водорода определяется выражением:

$$P = 1.4879 \cdot 10^{11} e^{-3911,2/T}, \quad [P] = \text{Па}, \quad 140 \leq T \leq 190 \text{ K} \quad (20)$$

На рис. 11 представлены результаты расчета давления насыщенных паров HF по формулам (16)–(18) и (20) в интервале температуры, где они были получены. Обращает на себя внимание то, что наклон линий 1, 2, 3 практически одинаков, а наклон линии 4 отличается. Это указывает на то, что в формуле (20) величина теплоты фазового перехода отличается от величины, определяемой по формулам (16)–(18).

На рис. 12 результаты расчета давления насыщенных паров HF выполненные по формулам (16)–(18) в интервале температуры от 140 К до 160 К. Из рис. 12 видно, что давление насыщенных паров, вычисленное по формулам (16)–(18), существенно завышают значения, полученные из экспериментов, и аппроксимированные формулой (20).

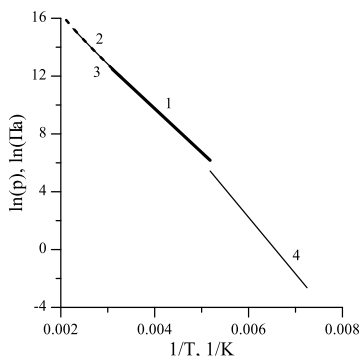


Рисунок 11 – Давление насыщенных паров HF, рассчитанное по формулам:
1 – (16), 2 – (17), 3 – (18), 4 – (20)

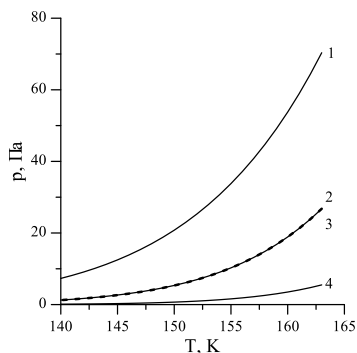


Рисунок 12 – Давление насыщенных паров HF, рассчитанное по формулам:
1 – (16), 2 – (17), 3 – (18), 4 – (20)

В случае расхода HF через ОС совместно с неконденсируемыми веществами концентрации фтористого водорода на выходе могут отличаться от случая, когда конденсируется чистое вещество.

С целью определения величин проскоков HF в существующих ОС на специально созданном стенд (отдельная конструкция) проведено изучение процессов десублимации при температуре до 113 К. Методика проведения опытных работ заключалась в имитации технологического процесса десублимации HF. В напускной патрубок через коллектор подавалась газовая смесь HF и воздуха (в соотношении 90 % HF и 10 % воздуха) с расходом, близким к величине при существующем технологическом процессе. Расход HF поддерживался с помощью критической шайбы, а расход воздуха ($G = 0,1$ кг/сутки) с помощью напускного устройства. Для проведения опыта использовали безводный фтористый водород марки «А» - содержание основного вещества 99,9 % массовых, и воздух, с точкой росы 203 К.

Анализ результатов экспериментальных работ показывает, что наличие неконденсируемых газов не оказывает влияния на процесс десублимации HF. Величина несоответствия количества испарённого HF из емкости и десублимируемого HF в ОС составляет менее 1 %, что может быть объяснено погрешностью средств измерений.

Для предварительных оценок возможности использования воздуха в существующей установке приводится физико-математическая модель десублимации фтористого водорода в присутствии компонентов воздуха. Целью исследования является сравнение величин количества HF в заданном объёме при охлаждении стенок десублиматора жидким азотом при температуре 77 К и при охлаждении воздухом с температурой 113 К.

Определены крайние значения распределения десятичного логарифма отношения концентраций HF и воздуха по высоте ёмкости при охлаждении жидким азотом с учётом наличия комплекса HF, содержащего 4 и 6 молекул HF

при различных температурах. На рис. 13а, б приведена зависимость десятичного логарифма отношения концентраций фтористого водорода и воздуха по высоте ёмкости при температуре стенки $T_x = 77\text{ K}$ (а) и $T_x = 113\text{ K}$ (б).

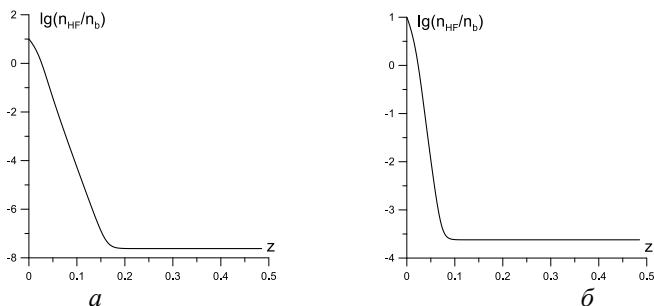


Рисунок 13 – Зависимость десятичного логарифма отношения концентраций фтористого водорода и воздуха по высоте ёмкости при температуре стенки $T_x = 77\text{ K}$ (а) и $T_x = 113\text{ K}$ (б)

Из рис. 13а видно, что на участке $z < 0,18\text{ м}$ концентрация фтористого водорода вследствие осаждения в твердом виде быстро уменьшается до величины $n_{\text{HF}0}$, соответствующей давлению насыщенного пара HF при температуре жидкого азота. Из рис. 13б следует, что при охлаждении воздухом осаждение газообразного HF происходит быстрее, чем процесс при охлаждении азотом. Этот факт объясняется увеличением коэффициента диффузии с ростом температуры, которая при охлаждении воздухом, согласно рис. 13б, выше, чем при охлаждении азотом. Остаточная концентрация паров HF при охлаждении воздухом также выше, чем при охлаждении азотом.

При низких температурах вблизи давления насыщенных паров молекулы фтористого водорода образуют ассоциации, содержащие до 6 молекул HF в одном комплексе. Эти ассоциации обладают большим молекулярным весом и большими диффузионными объёмами. Это приводит к уменьшению коэффициента диффузии и, следовательно, к уменьшению диффузионного потока на охлаждаемые стенки десублиматора. Видно, что вследствие уменьшения потока на стенки концентрация в объёме уменьшается значительно медленнее, чем у неассоциированного HF. С увеличением степени ассоциации скорость очистки газовой смеси от HF уменьшается.

Представлено теоретическое исследование течения холодного воздуха в системе «десублиматор – отсек охлаждения». Проведён расчёт остывания осадительных ёмкостей. Принято, что поток холодного воздуха вначале проходит воздушный теплообменник второй ёмкости (по потоку смеси газов, подлежащих десублимации), затем по теплоизолированному трубопроводу подаётся в воздушный теплообменник первой ёмкости и возвращается в теплообменник ВХМ, после чего сбрасывается в атмосферу.

Приводятся результаты расчётов при наличии теплообмена ёмкостей с окружающей средой (рис. 14).

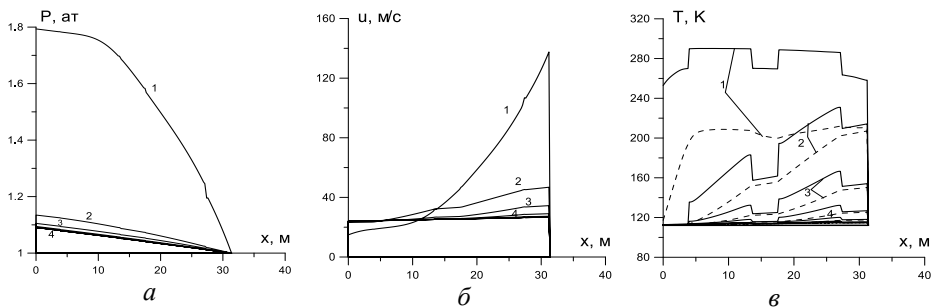


Рисунок 14 – Распределение давления (а), скорости течения (б), температура воздуха (пунктирная линия) и температура стенок трубопровода и ёмкости (в) по пути течения воздуха при охлаждении двух ёмкостей, 1–10 секунд, 2–5 минут, 3–10 минут, 4–15 минут после начала охлаждения

Из рисунков видно, что после короткого периода установления газодинамического течения распределение давления и скорости течения воздуха по длине трубопровода и тракта воздушного теплообменника меняется во времени слабо (кривые 2–4 на рис. 14а). При этом скорость течения короткое время, по мере продвижения к выходу из трубопровода, увеличивается за счёт разогрева воздуха при теплообмене с тёплыми стенками. После охлаждения скорость практически не меняется по длине трубопровода и во времени (кривые 2–4 на рис. 14б).

Приводятся аналитические оценки количества энергии при тепломассообмене потока смеси газов в ёмкости и теплообмена холодного воздуха со стенками ёмкости. Разработана физико-математическая модель десублимации фтористого водорода в присутствии компонентов воздуха. Приводятся доказательства возможности применения воздуха для охлаждения блока ёмкостей в необходимом интервале температуры даже в самых теплонатяженных режимах работы, когда происходят интенсивные перестройки полей температуры стенок ёмкостей и трубопроводной сети.

В выводах к главе констатируется, что теоретическое и экспериментальное исследование десублимации и тепломассообмена, результаты экспериментальных работ явились доказательством возможности изменения существующей технологии. Точный диапазон энергетически выгодных температур охлаждения ОС, отличный от используемого, является более эффективным температурным уровнем ведения процесса десублимации НФ. Выполненные опытные работы создают предпосылки для применения воздушного способа охлаждения ОС и внесения изменений в существующий технологический процесс.

С применением разработанных стендов появляется возможность моделировать тепломассообменные процессы с опасными веществами (фтористый водород, газообразный фтор). Возможно также проводить исследования с использованием безопасных имитаторов, например, этилового спирта, фреонов и др.

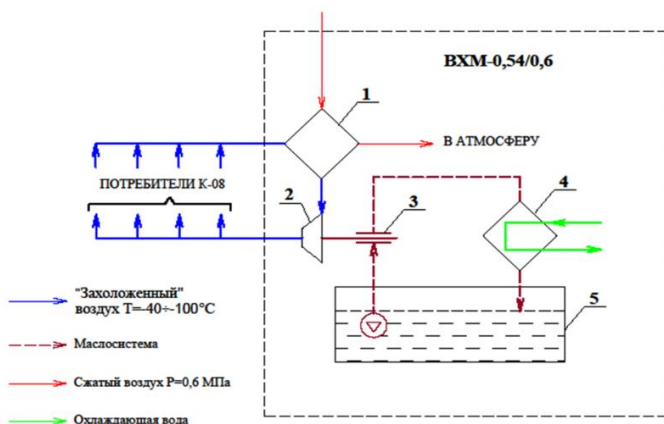
Пятая глава посвящена вопросам интенсификации тепло- и массообмена в установках конденсации и очистки технологических потоков производства по разделению изотопов урана от примесей.

Отсутствие источника холодного воздуха, устойчиво поддерживающего требуемые температуры и обеспечивающего перестройку температур по заданному алгоритму является препятствием для создания перспективных способов десублимации веществ при криогенных температурах.

Первым этапом создания воздушно-холодильной машины являлось точное определение мощности охлаждения на заданном температурном уровне. Проведены аналитические расчеты действующих схем охлаждения. Исследованы процессы теплообмена от потока холодного воздуха к стенкам ёмкостей при десублимации потоков ГФУ в различных режимах работы блока ёмкостей, согласно циклу процессов «десублимация–сублимация–охлаждение после сублимации», происходящих одновременно и асинхронно в блоке ёмкостей.

Для оценки возможных вариантов по созданию новой воздушной холодильной машины с требуемыми свойствами проведено изучение физических процессов, происходящих при охлаждении воздуха. Представлены результаты расчёта идеального и оптимального холодильного цикла применительно к заданным условиям. Показано, что при адиабатическом расширении всего рабочего тела в турбодетандере можно получить максимальный холодильный коэффициент. Анализ возможного процесса генерации холода ориентирует на применение холодильной машины, использующей в качестве рабочего тела сжатого воздуха. Из расчетов получено, что в технологии рационально применение оборудования, реализованного на базе турбодетандерного агрегата мощностью от 4,5 до 5,5 кВт с рабочим давлением на входе до 0,7 МПа.

По результатам анализа произведенных расчетов и оценок сформулировано техническое задание на создание воздушно-холодильной машины с требуемыми параметрами. В итоге разработана и создана не имеющая аналогов новая воздушно-холодильная машина. Принципиальная технологическая схема воздушно-холодильной машины ВХМ–0,54/0,6 [24, 26] (далее по тексту ВХМ) на рис. 15.



1 – рекуперативный теплообменник; 2 – турбодетандер;
3 – масляный тормоз; 4 – теплообменник; 5 – маслосистема

Рисунок 15 – Принципиальная технологическая схема воздушно-холодильной машины ВХМ–0,54/0,6

Сжатый воздух, осушенный до точки росы 203 К с температурой $T = 293$ К, поступает в рекуперативный теплообменник 1, в котором за счёт теплообмена с отходящим от потребителя воздухом охлаждается до температуры $T = 233$ К и поступает в турбодетандер 2. В турбодетандере 2 сжатый воздух расширяется и охлаждается до температуры $T = 173$ К с отдачей работы, после чего поступает на охлаждение потребителей и далее – на охлаждение прямого потока в теплообменник 1. Работа расширения отводится в масляном тормозе 3, где масло нагревается. Нагретое масло охлаждается в теплообменнике 4 и возвращается в маслосистему 5.

Применимость нового оборудования сопряжена с изменением существующего распределения газодинамических потоков в пределах участка десублимации. В связи с этим проведены расчёты, обосновывающие применение новой воздушной холодильной машины.

Разработана математическая модель газодинамических процессов течения холодоносителя в трубопроводной системе типового блока ёмкостей, процессов теплообмена воздуха со стенками ёмкости. Математическая модель основана на нестационарных уравнениях газовой динамики. Система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2 + p}{\partial x} = -\Pi \tau_w / s, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E + p u}{\partial x} = -\Pi \alpha (T - T_w) / s, \quad (23)$$

$$p = \rho R T, \quad (24)$$

Повороты, разветвления и сопряжения трубопроводов представляются объёмом заданной величины, к которому присоединены трубопроводы различного диаметра. Схема сопряжений представлена на рис. 16.

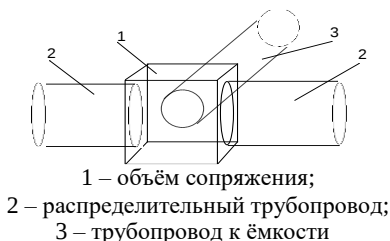


Рисунок 16 – Схема сопряжений трубопроводов

Предполагая давление одинаковым по объёму, смешение потоков с разными температурами из примыкающих трубопроводов происходит мгновенно. Записываются законы сохранения массы и энергии для объёма сопряжения:

$$V \frac{d\rho_v}{dt} = \sum_k G_k, \quad (25)$$

$$V \frac{dE_v}{dt} = \sum_k G_k H_k, \quad (26)$$

$$p = \rho RT, \quad (27)$$

В нестационарных условиях газодинамики и теплообмена температура стенок трубопроводов и ёмкостей меняется во времени и влияет на динамику движения холодного воздуха в трубопроводной сети. Моделирование распространения тепла в стенках трубопровода производится на основе одномерного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \chi_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right), \quad (27)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T_m(x, r, 0) = T_{m,0}, \quad \lambda_m \frac{\partial T_m(x, R_{in}, t)}{\partial r} = -\alpha (T(x, t) - T_m(x, R_{in}, t)), \quad \lambda_m \frac{\partial T_m(x, R_{ou}, t)}{\partial r} = q_m.$$

Стенки ёмкости находятся в теплообмене с протекающим по теплообменным каналам воздухом. Воздух по мере продвижения по теплообменному каналу нагревается. В стенках ёмкостей формируются градиенты температуры и в направлении, перпендикулярном стенке, и в вертикальном направлении.

Предполагая однородность температуры стенок по угловой координате, для описания переноса тепла в стенках ёмкости запишем уравнение теплопроводности в стенках в двумерном приближении. Пренебрегая кривизной стенок, уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \chi_n \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right), \quad (28)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T_n(y, z, 0) = T_{n,0}, \quad \lambda_n \frac{\partial T_n(0, z, t)}{\partial y} = -\alpha (T_g - T_n(0, z, t)),$$

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(\Delta D, z, t)}{\partial y} = q_n, \quad \frac{\partial T_n(y, 0, t)}{\partial z} = \frac{\partial T_n(y, H, t)}{\partial z} = 0. \quad (29)$$

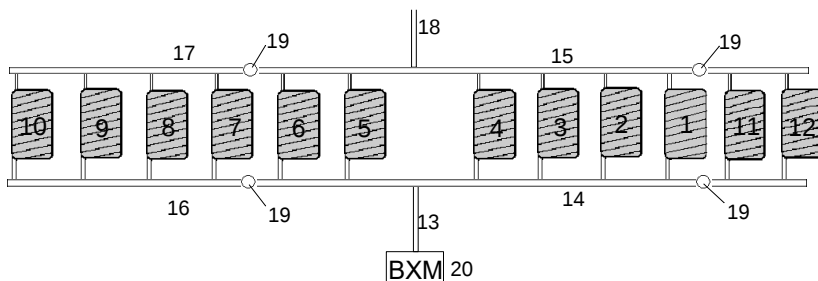
Анализ тепловых процессов в ёмкости при десублимации ГФУ показал, что процессы в ней подстраиваются под величину теплоотдачи в стенки ёмкости. Для учёта их в модели газодинамических процессов течения холодоносителя в трубопроводной системе блока ёмкостей достаточно определить и задать величину скорости выделения тепла в ёмкости при десублимации в ней ГФУ.

Разработанная математическая модель и численная методика позволяют проводить численное моделирование теплообмена для нескольких ёмкостей, к которым подаётся охлаждённый воздух по трубопроводной сети.

Представлены результаты численного моделирования и анализ процессов тепло- и массообмена схемы охлаждения типового блока из 16 ёмкостей.

Одновременно в работе находится 6 ёмкостей, 4 ёмкости находятся в резерве, остальные 6 – в технологическом резерве. Для проведения численного моделирования процессов теплообмена в блоках ёмкостей были выбраны различные комбинации фазы цикла работы ёмкостей в составе блока.

Трубопроводная сеть (рис. 17) состоит из прямолнейных участков 13–18. Примем, что резервные ёмкости №№ 7–12 охлаждены. Для того чтобы они не отеплялись за счёт тепловых потоков из окружающей среды, предполагается, что в трубопроводах 16 и 17 между ёмкостями № 6 и № 7 и в трубопроводах 14 и 15 между ёмкостями № 1 и № 11 установлены регуляторы расхода.



1–12 – ёмкости; 13–18 – трубопроводы; 19 – регуляторы расхода;
20 – воздушно-холодильная машина

Рисунок 17 – Схема трубопроводной сети и расположение ёмкостей в блоке

На рис. 18а, б, в показано изменение температуры, скорости потока воздуха и давления вдоль трубопроводов по участку 13, по участку 14 распределительного трубопровода до примыкания ёмкости № 1 к нему, далее по каналу теплообменника ёмкости № 1 до его сопряжения с трубопроводом 15, по участку трубопровода 15 и по трубопроводу 18 (рис. 17).

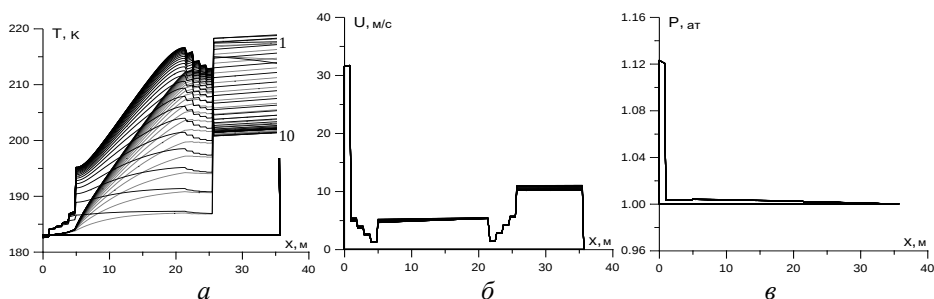


Рисунок 18 – Распределения температуры (а) газа (пунктирная линия) и стенок трубопровода (сплошная линия), скорости воздуха (б) и давления (в) для ёмкости № 1.
Линии 1–10 построены с интервалом 10 минут с начала процесса

Кривые построены в последовательные моменты времени с периодом 10 минут с момента начала охлаждения ёмкостей или начала конденсации

в ёмкости. Из рис. 18 видно, что под влиянием потока тепла из окружающей среды участки трубопроводной сети 13–18 нагреваются и нагревают воздух, поступающий в каналы ёмкости. В связи с этим температура стенок ёмкостей незначительно отличается друг от друга. Однако отличие максимальной температуры стенок ёмкостей № 1 и № 4 составляет не более 3 К, отличие максимальной температуры стенок ёмкостей № 5 и № 6 – не более 0,5 К, отличие максимальной температуры стенок ёмкостей №№ 7–12 – не более 4 К. Температура воздуха на выходе из трубопроводной сети 201 К.

Расчётами установлено, что рабочие характеристики холодильной машины ВХМ-0,54/0,6 обеспечивают работу блока из 16 ёмкостей в необходимом интервале температур даже в самых теплонапряжённых режимах работы ёмкостей.

В 2015г. проведено техническое перевооружение участка десублимации завода разделения изотопов АО «СХК». Окупаемость проекта составила 6 месяцев. На рис. 19 представлена топология участка десублимации UF₆.

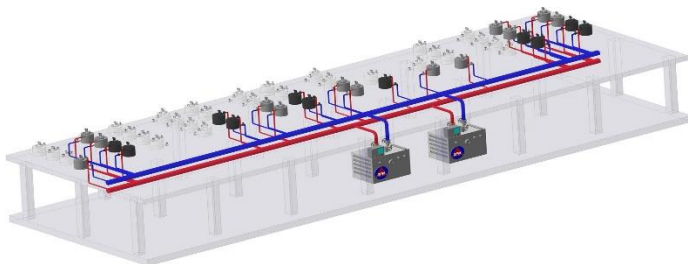


Рисунок 19 – Топология участка десублимации ГФУ

Приведены оценки энергетического и экономического эффектов. Энергетика системы охлаждения прототипа (ХГУТ) и новой системы с использованием ВХМ представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение энергетических характеристик схем охлаждения

Наименование величины	ХГУТ	ВХМ
Мощность установки, ккал/час	24412,5	6091
Нагрузка, ккал/час	2551	1600,2
Потери в секционных коммуникациях, ккал/час	7882,15	3991
Потери в установке, ккал/час	2513,55	501
Энергетические затраты установки, кВт	1231,8	158,1

Исследования газодинамических процессов течения охлаждённого воздуха в трубопроводной системе, теплообмена со стенками ёмкости явились доказательством возможности изменения технологии фракционной разгонки компонентов газовой смеси гексафторида урана и примесей.

Результаты исследований, приведенные в главе 4, положительные результаты внедрения способа охлаждения газовой смеси на базе ВХМ создали возможность для разработки нового технологического способа фракционной разгонки газовой смеси с использованием холодного воздуха.

Известно, что ПДК HF равно 0,0005 мг/литр. Для сброса газа в окружающую среду определено давление насыщенного пара HF, допустимое в емкости для устойчивой и долговременной работы сорбционных установок. Такому давлению соответствует температура в емкости, равная 137,2 К.

На основании проведенных исследований был предложен способ фракционной разгонки газовых смесей, содержащих ГФУ, HF, воздух и неконденсируемые газы. В схеме охлаждения ОС в качестве холодоносителя применяется холодный воздух с температурой от $T = 133\text{ К}$ до $T = 137,2\text{ К}$, генерируемый воздушной холодильной машиной.

Способ фракционной разгонки на примере ОС, представлен на рис. 20.

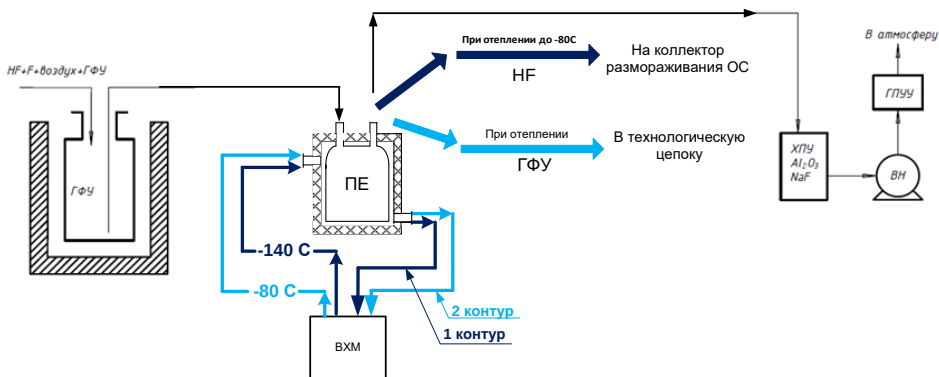


Рисунок 20 – Эффективный способ фракционной разгонки газовых смесей

Принцип новой установки фракционной разгонки заключается в десублимации компонентов газовой смеси (ГФУ и HF) в одной ёмкости при охлаждении холодным воздухом с температурой 133 К (контур 1). После заполнения ёмкости температура повышается до величины 193 К. Давление HF при этой температуре меньше давления упругости паров примесей, но больше, чем давление упругости паров ГФУ. При выдержке при температуре 193 К (контур 2) в ёмкости останется в твердом состоянии только ГФУ, давление насыщенных паров ГФУ будет составлять $\approx 0,17\text{ Па}$. Давление HF будет равно $\approx 266,6\text{ Па}$. HF откачивается из объёма вакуумным насосом и направляется на переработку. После извлечения HF из состава газовой смеси ёмкость отепляется, ГФУ сублимируется в технологическую цепочку.

Преимуществами нового способа фракционной разгонки является сокращение технологических коммуникаций по сравнению с трёхступенчатой схемой разгонки; значительное снижение энергетических и материальных затрат; исключение применения жидкого азота при фракционной разгонке, возможность полной автоматизации процесса.

Технология реализована в действующем производстве СХК в 2021 г. Результатом внедрения явилось значительное сокращение трудоемкости работ, повышение автоматизации процесса. Суммарный экономический эффект от

результатов внедрения комплекса технологий на базе ВХМ составил около 100 млн рублей.

В выводах констатируется разработка новых научных основ для создания способов и методов интенсификации процессов тепло- и массообмена технологии выделения фтористого водорода из технологических переделов производства по разделению изотопов урана, отказ от применения жидкого азота, возможности по применению результатов исследований в прочих областях народного хозяйства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В диссертации изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований термодинамических процессов переноса тепла и массы в сплошных и разреженных средах используемых в производстве по разделению изотопов урана. Уточнены феноменологические свойства HF, обоснован метод расчета термодинамических и переносных свойств в различном агрегатном состоянии фреонов R-12, R-134a, чистого HF и в смеси с UF₆, выявлены механизмы переноса массы, импульса и энергии при конвекции, сложном теплообмене при естественном и принудительном движении влажного теплопроводного воздуха. Приведены обоснования и экспериментальное подтверждение методов интенсификации тепло- и массообмена процессов, используемых при термостатировании участков производства по разделению изотопов урана, представлены результаты практического применения разработок.

Основные достижения работы:

1 Получены экспериментальные данные о зависимости давления насыщенного, безводного фтористого водорода от температуры в интервале от 77 К до 213 К, уравнение зависимости давления насыщенного пара HF от температуры, справедливое в диапазоне от 140 К до 190 К;

2 Проведены теоретические и экспериментальные исследования:

- термодинамических и переносных свойств фтористого водорода особой чистоты (99,99 % об.) при его десублимации в смеси с гексафторидом урана и неконденсируемыми газами;

- и оценено влияние на процесс десублимации степени ассоциации молекул фтористого водорода, определена критическая степень перенасыщения;

- термодинамических и переносных свойств фреонов R-12, R-134a в широкой области температур и давлений обратного цикла Карно в элементах турбохолодильной машины.

3 Выполнены аналитические и численные исследования теплофизических свойств безводного HF и UF₆ от температуры в интервале от 77 К до 213 К при изменении агрегатного состояния в процессах сублимации-десублимации.

4 Исследованы термодинамические процессы и холодильные циклы применительно к установкам трансформации энергии, результатами исследований явились:

- методика определения достижимой мощности турбохолодильной машины при переходе на работу с озонобезопасным рабочим телом;

– теоретическое обоснование и внедрение в производство универсального источника криогенных температур – воздушной холодильной машины

ВХМ 0,54/0,6. Машина является эффективным универсальным источником искусственного холода в диапазоне температуры от 113 К до 273 К. Экономический эффект от внедрения 66 млн. руб. в год;

– обоснование и внедрение в производство способа охлаждения газовой смеси и десублимации гексафторида урана холодным воздухом. Обоснование способа произведено путём анализа результатов численного решения физико-математических моделей теплообмена при десублимации и сублимации UF_6 , HF в заданных объёмах, происходящих одновременно и асинхронно, в динамическом режиме, в присутствии неконденсируемых газов. Экономический эффект – 29 млн руб. в год;

– внедрение в производство способа фракционной разгонки газовой смеси, состоящей из ГФУ, HF и примесей.

5 Проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия потоков энергии максимально достижимой интенсивности:

– фреонов R-12, R-134a в условиях фазовых переходов обратного цикла Карно в турбохолодильной машине. Результаты работы применены в производстве. Достигнуто увеличение холодопроизводительности турбохолодильного оборудования большой мощности на 27,86 %, снижение энергопотребления на 13,63 %. Экономический эффект $\approx$ 13 млн рублей в год.

– фазового перехода HF особой чистоты, и его смеси с UF_6 в десублиматоре.

6 Проведены экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции турбулентного естественно-конвективного и принудительного течения вязкого теплопроводного воздуха в широком диапазоне режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей с учётом процессов стратификации по ярусам размещения оборудования, расположенного в ограниченном объёме. Получены значения распределения полей влагосодержания, а также распределение воздушных потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей. Результаты исследований использованы в производстве (АО «СХК»). Экономический эффект – 24 млн руб. в год.

7 Представлены результаты физического и численного моделирования процессов переноса массы, импульса и энергии при десублимации и сублимации фтористого водорода, с учетом различной степени диссоциации молекул. Получено подтверждение теоретических исследований результатами экспериментальных работ.

8 Разработаны научные основы эффективной совместной десублимации HF и UF_6 . Способ фракционной разгонки газовой смеси HF и UF_6 внедрен в производство.

Дальнейшее развитие темы диссертации в части термостатирования заключается в теоретическом сопровождении и последующем практическом применении результатов исследования в производстве. Физико-математические модели, методики и результаты исследований сублимационных и десублимационных процессов HF , UF_6 , а также последующее экспериментальное

подтверждение адекватности методик позволяет использовать их для определения свойств различных фторидов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Губанов С. М.** Экспериментально-теоретическое исследование охлаждения емкостей для десублимации паров / С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, И. М. Васенин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6/3. – С. 119–121. – 0,18 / 0,08 а.л.

2. Чуканов М. В. Моделирование течения жидкости в ёмкости при испарении легких примесей / М. В. Чуканов, И. М. Васенин, П. В. Зернаев, **С. М. Губанов**, А. А. Шахтин, А. Ю. Крайнов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 6/3. – С. 173–175. – 0,18 / 0,05 а.л.

3. Васенин И. М. Физико-математическое моделирование десублимации фтористого водорода из газовой смеси на стенки конденсатора / И. М. Васенин, **С. М. Губанов**, М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, М. В. Чуканов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2014. – № 5 (31). – С. 76–82. – 0,44 / 0,11 а.л.

4. Дурновцев М. И. Измерение давления насыщенных паров фтористого водорода в области низких температур / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов**, М. В. Чуканов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 2/2. – С. 10–13. – 0,25 / 0,08 а.л.

5. Картавых А. А. Оценка влияния откачивания газовой смеси на процесс десублимации HF / А. А. Картавых, И. М. Васенин, **С. М. Губанов**, А. Ю. Крайнов, М. В. Чуканов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 2/2. – С. 95–97. – 0,25 / 0,07 а.л.

6. **Губанов С. М.** Теоретическое и экспериментальное моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров гексафторида урана / С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, Р. Л. Мазур // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50, № 5. – С. 589–598. – 0,62 / 0,4 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Gubanov S. M. Theoretical and experimental modeling of the cooling of uranium hexafluoride vapor desublimation tanks // S. M. Gubanov, A. Y. Krainov, R. L. Mazur // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 50, is. 5. – С. 766–775. – DOI: 10.1134/S0040579516050298.

7. Картавых А. А. Оценка влияния неконденсируемых газов на процесс десублимации фтористого водорода / А. А. Картавых, **С. М. Губанов**, А. Ю. Крайнов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 46. – С. 70–75. – DOI: 10.17223/19988621/46/9. – 0,38 / 0,17 а.л.

Web of Science:

Kartavykh A. A. Estimation of the effect of non-condensable gases on the process of hydrogen fluoride desublimation / A. A. Kartavykh, **S. M. Gubanov**, A. Yu. Krainov

// Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2017. – № 46. – P. 70–75.

8. **Губанов С. М.** Давление насыщенного пара фтористого водорода в области низких температур / С. М. Губанов, М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 667–669. – DOI: 10.1007/s10891-017-1609-7. – 0,19 / 0,09 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Gubanov S. M. Saturated Vapor Pressure of Hydrogen Fluoride in the Region of Low Temperatures / S. M. Gubanov, M. I. Durnovtsev, A. Yu. Krainov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90, is. 3. – P. 634–636.

9. **Губанов С. М.** Теоретическое моделирование охлаждения емкостей для десублимации паров фтористого водорода / С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, Р. Л. Мазур, М. И. Дурновцев // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т. 51, № 3. – С. 343–349. – DOI: 10.1134/S0040579517020038. – 0,44 / 0,11 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Gubanov S. M. Theoretical Modeling of Cooling of Containers for the Desublimation of Hydrogen Fluoride Vapors / S. M. Gubanov, A. Yu. Krainov, R. L. Mazur, M. I. Durnovtsev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 51, № 3. – P. 352–358.

10. **Губанов С. М.** Моделирование аэродинамики и тепломассообмена при вентиляции производственного помещения / С. М. Губанов, А. Ю. Крайнов, Р. А. Шинкевич // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131, № 3. – С. 150–155. – 0,38 / 0,13 а.л.

Публикации в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

11. **Gubanov S. M.** Properties of anhydrous hydrogen fluoride in the temperature range from 140 K to 190 K / S. M. Gubanov [Electronic resource] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2150 : 12th All Russian Conference on Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, TPEAC 2021. Sochi, Russia, October 25–27, 2021. – Article number 012023. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2150/1/012023> (access date: 16.04.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/2150/1/012023. – 0,31 а.л.

12. **Gubanov S. M.** Practical application of natural convective heat exchange of electrical equipment with air [Electronic resource] / S. M. Gubanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2150 : 12th All Russian Conference on Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, TPEAC 2021. Sochi, Russia, October 25–27, 2021. – Article number 012003. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2150/1/012003> (access date: 16.04.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/2150/1/012003. – 0,38 а.л.

13. **Gubanov S. M.** Modeling of heat transfer during the desublimation of substances into refrigerated containers [Electronic resource] / S. M. Gubanov, K. M. Moiseeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2211 : 2021 All-Russian Scientific Conference with International Participation on Thermophysical Basis of Energy Technologies, TBET 2021. Tomsk, Russia, Virtual, October 26–28,

2021. – Article number 012018. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2211/1/012018> (access date: 16.04.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/2211/1/012018. – 0,44 / 0,22 а.л.

14. **Gubanov S. M.** The method of modeling on effective modes of precision ventilation at power-stressed objects [Electronic resource] / S. M. Gubanov, K. M. Moiseeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2211 : 2021 All-Russian Scientific Conference with International Participation on Thermophysical Basis of Energy Technologies, TBET 2021. Tomsk, Russia, Virtual, October 26–28, 2021. – Article number 012016. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2211/1/012016> (access date: 16.04.2022). – DOI:10.1088/1742-6596/2211/1/012016. – 0,31 / 0,16 а.л.

15. Krainov A. Yu. Turboexpander-refrigerant to reproduce arctic weather / A. Yu. Krainov, **S. M. Gubanov** [Electronic resource] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 696 : 3rd International Scientific and Technical Conference on Materials, Technology and Equipment for the Development of the Arctic and Siberia, ARCTIC 2019. Tomsk, Russia, September 25–28, 2019. – Article number 012021. – 3 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/696/1/012021> (access date: 16.04.2022). – DOI: 10.1088/1757-899X/696/1/012021. – 0,19 / 0,09 а.л.

Патент на изобретение:

16. Патент 2357008, Российская Федерация, МПК F25B 01/011, F25J 3/00 C2. Способ защиты черных металлов от коррозии в водных солевых растворах / Бояринов О. В. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Карпенко В. И. (RU), Петруненко В. В. (RU), Сигаило А. В. (RU); патентообладатель: Акционерное общество «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК») (RU). – № 2008107418/02; заявл. 26.02.2008, опубл. 27.05.2009, Бюл. № 11. – 12 с.

17. Патент 2422689, Российская Федерация, МПК F25A 10/07, F16J 1/00 C2. Подшипник скольжения / Зюзин А. В. (RU), Коломиец Э. Д. (RU), Филин И. А. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Решетников В. В. (RU); патентообладатель: Открытое акционерное общество «Сибирский химический комбинат» (RU). – № 2009145559; заявл. 08.12.2009, опубл. 27.06.2011, Бюл. № 16. – 11 с.

18. Патент 2563564, Российская Федерация, МПК F25B 11/08, F25J 1/00 C2. Способ охлаждения газовой смеси / **Губанов С. М.** (RU), Васенин И. М. (RU), Шрагер Э. Р. (RU), Крайнов А. Ю. (RU), Зернаев П. В. (RU), Мазур Р. Л. (RU), Чуканов М. В. (RU) ; патентообладатель: Акционерное общество «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК») (RU). – № 2013159280; заявл. 30.12.2013, опубл. 25.08.2015, Бюл. № 26. – 6 с.

19. Патент 2599686, Российская Федерация, МПК F25J 3/00, F17C 3/10 C2. Аппарат для раздельного извлечения компонент газовой смеси / **Губанов С. М.** (RU), Зернаев П. В. (RU), Дурновцев М. И. (RU), Чуканов М. В. (RU), Васенин И. М. (RU), Крайнов А. Ю. (RU), Шрагер Э. Р. (RU) ; патентообладатель: Акционерное общество «Сибирский химический комбинат» (RU). – № 2014152452/06; заявл. 23.12.2014, опубл. 19.09.2016, Бюл. № 28. – 6 с.

20. Патент 2650134, Российская Федерация, МПК B01D 7/00, C01G 43/06; СПК B01D 7/00, C01G 43/063 C1. Способ фракционной разгонки газовой смеси,

состоящей из гексафторида урана, фтористого водорода и примесей / Крайнов А. Ю. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Моисеева К. М. (RU); патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ, НИ ТГУ) (RU). – № 2017121557; заявл. 20.06.2017, опубли. 09.04.2018, Бюл. № 10. – 8 с.

21. Патент 2655347, Российская Федерация, МПК B01D 7/02; СПК B01D 7/02, C01G 43/063 C1. Стенд для моделирования процесса десублимации компонентов газовой смеси / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов А. Ю. (RU), Картавых А. А.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ, НИ ТГУ) (RU). – № 2016126331, заявл. 30.06.2016, опубли. 25.05.2018, Бюл. № 15. – 2 с.

22. Патент 2707349, Российская Федерация, МПК F17C 5/06; СПК F17C 5/06 C1. Рекуперативный способ наполнением метаном баллонов высокого давления и устройство для его осуществления / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов А. Ю. (RU), Широков А. А. (RU), Миллер О. В. (RU); заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «АПА-КАНДТ СИБИРЬ» (ООО «АПА-КАНДТ СИБИРЬ») (RU). - № 2019101493, заявл. 18.01.2019, опубли. 26.11.2019, Бюл. № 33. – 14 с.

Патенты на полезную модель:

23. Патент 148542 Российская Федерация, F25B 11/08, U1. Воздушная холодильная машина / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов А. Ю. (RU) ; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2014108524; заявл. 06.03.2014, опубли. 10.11.2014, Бюл. № 34. – 8 с.

24. Патент 152946 Российская Федерация, F25B 11/08, U1. Очиститель воздуха турбодетандерной холодильной машины / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов А. Ю. (RU) ; патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ) (RU). – № 2014108522, заявл. 06.03.2014, опубли. 01.06.2015, Бюл. № 18. – 7 с.

Патент на промышленный образец:

25. Патент 97784 Российская Федерация. Воздушная холодильная машина / **Губанов С. М.** (RU), Удуд В. Н. (RU), Стулов В. Л. (RU) ; патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Гелиймаш» (ОАО «НПО «Гелиймаш») (RU). – № 2015501203; заявл. 09.04.2015, дата государственной регистрации в Государственном реестре промышленных образцов Российской Федерации 17.03.2016.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613983. Программа управления турбодетандерным охладителем / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов Д. А. (RU) ; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2014611771, заявл. 04.03.2014, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14.04.2014.

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617678. Программа для расчета теплообмена технологического оборудования в производственном помещении путем вентиляции охлажденным воздухом / Крайнов А. Ю. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Моисеева К. М. (RU) ; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2015614454, заявл. 28.05.2015, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17.07.2015.

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

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660015. Программа для расчета естественной конвекции жидкости в цилиндрической емкости, возникающей при температурной и концентрационной неоднородности / Крайнов А. Ю. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Моисеева К. М. ; правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2015616740, заявл. 22.07.2015, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21.09.2015.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618084. Программа для расчета гидродинамических параметров хладоносителя в здании / Крайнов А. Ю. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Моисеева К. М. (RU) ; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2016615403, заявл. 27.05.2016, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20.07.2016.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618086. Программа для расчета теплообмена и расхода теплоносителя в теплообменных установках / Крайнов А. Ю. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Моисеева К. М. (RU) ; правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2016615397, заявл. 27.05.2016, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 20.07.2016.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617200. Программа расчета десублимации фтористого водорода из газовой смеси / Васенин И. М. (RU), **Губанов С. М.** (RU), Дурновцев М. И. (RU); правообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2017614144, заявл. 03.05.2017, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2017.

Свидетельство о регистрации электронных баз данных:

33. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620063. Экспресс-решения уравнений состояний газовых бустеров / **Губанов С. М.** (RU), Крайнов А. Ю. (RU), Широков А. А. (RU), Миллер О. В. (RU); правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «АПА-КАНДТ СИБИРЬ» (RU). Заявка № 2020621994, заявл. 21.10.2020, дата государственной регистрации в Реестре баз данных 15.01.2021, Бюл. № 1. – 2 с.

Публикации в прочих научных изданиях:

34. Крайнов А. Ю. Моделирование десублимации фтористого водорода из газовой смеси на стенки конденсатора / А. Ю. Крайнов, И. М. Васенин, **С. М. Губанов**, М. В. Чуканов, М. И. Дурновцев // Труды / Томский государственный университет. Серия физико-математическая. – Томск, 2014. – Т. 292 : Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы III Всероссийской молодёжной научной конференции. Томск, 27–29 ноября 2013 г. – С. 206–210. – 0,31 / 0,07 а.л.

35. Крайнов А. Ю. Численное моделирование воздушного охлаждения емкости для десублимации компонентов газовой смеси / А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов**, М. И. Дурновцев // Труды / Томский государственный университет. Серия физико-математическая. – Томск, 2014. – Т. 292 : Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы III Всероссийской молодёжной научной конференции. Томск, 27–29 ноября 2013 г. – С. 211–216. – 0,38 / 0,15 а.л.

36. Картавых А. А. Исследование и оптимизация откачных систем разделительного производства / А. А. Картавых, **С. М. Губанов**, М. В. Чуканов // Инновационные технологии атомной энергетики и промышленности : сборник статей, посвящённый 55-летию СТИ НИЯУ МИФИ. – Северск, 2014. – С 77–79. – 0,18 / 0,06 а.л.

37. Дурновцев М. И. Моделирование десублимации фтористого водорода из газовой смеси на стенки емкости-осадителя / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, И. М. Васенин, **С. М. Губанов**, М. В. Чуканов // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности : сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции. Томск, 05–07 июня 2014 г. – Томск, 2014. – С. 109. – 0,06 / 0,01 а.л.

38. Дурновцев М. И. Физико-математическая модель охлаждения емкостей для десублимации паров фтористого водорода / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов** // Физико-технические проблемы атомной науки, энергетики и промышленности : сборник тезисов докладов VI Международной научно-

практической конференции, Томск, 05–07 июня 2014 г. – Томск, 2014. – С. 110. – 0,06 / 0,01 а.л.

39. Картавых А. А. Исследование и оптимизация откачных систем разделительного производства / А. А. Картавых, **С. М. Губанов**, М. В. Чуканов // Изотопы: технологии, материалы и применение : материалы международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск, 20–24 октября 2014 г. – Томск, 2014. – С. 59–60. – 0,12 / 0,04 а.л.

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

41. Дурновцев М. И. Замещение жидкого азота холодным воздухом в системе охлаждения емкостей конденсационно испарительных установок / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов** // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. Томск, 01–03 июня 2016 г. – Томск, 2016. – С. 93–94. – 0,12 / 0,04 а.л.

42. Дурновцев М. И. Моделирование процессов теплообмена и десублимации фтористого водорода в конденсационно испарительной установке / М. И. Дурновцев, А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов** // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. Томск, 01–03 июня 2016 г. – Томск, 2016. – С. 94. – 0,12 / 0,04 а.л.

43. Филиппов М. М. Численное моделирование процесса вентиляции производственного помещения / М. М. Филиппов, **С. М. Губанов**, А. Ю. Крайнов, А. А. Картавых // Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции. Томск, 01–03 июня 2016 г. – Томск, 2016. – С. 98–99. – 0,12 / 0,04 а.л.

44. **Губанов С. М.** Перспективные системы термостатирования технологических комплексов по разделению изотопов урана / С. М. Губанов, М. В. Чуканов, М. И. Дурновцев, А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов, Э. Р. Шрагер // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 383–385. – 0,19 / 0,05 а.л.

45. **Губанов С. М.** Применение способа охлаждения с использованием воздушно-холодильной машины для десублимации гексафторида урана / С. М. Губанов, М. В. Чуканов, М. И. Дурновцев, А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов, Э. Р. Шрагер // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 386–388. – 0,19 / 0,05 а.л.

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, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 389–391. – 0,19 / 0,05 а.л.

47. Дурновцев М. И. Стенд для измерения давления насыщенных паров при низких температурах / М. И. Дурновцев, **С. М. Губанов**, А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 392. – 0,12 / 0,04 а.л.

48. Дурновцев М. И. Экспериментальное измерение давления насыщенных паров безводного фтористого водорода / М. И. Дурновцев, **С. М. Губанов**, А. А. Картавых, А. Ю. Крайнов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016) : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 393–394. – 0,06 / 0,02 а.л.

49. Моисеева К. М. Моделирование стационарного естественно-конвективного течения воздуха в помещении с тепловыделяющими цилиндрами / К. М. Моисеева, Л. Л. Миньков, А. Ю. Крайнов, **С. М. Губанов** // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2017 : материалы VII международной молодежной научной конференции. Томск, 27–29 ноября 2017 г. – Томск, 2018. – С. 306–308. – 0,19 / 0,1 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7403 от «28» июня 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. 53-15-28