

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

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

№ \_\_\_\_\_  
за № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по научной работе и  
инновациям НИ ТПУ, д.х.н.  
М.С. Юсубов  
«17» января 2020 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации, на диссертацию Губанова Сергея Михайловича «Физическое и математическое моделирование процессов термостатирования в производстве по разделению изотопов урана», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа С.М. Губанова посвящена повышению экологической безопасности, энерго- и ресурсоэффективности производств по обогащению урана. Ее актуальность заключается в необходимости повышения эффективности производства по обогащению урана, снижения удельных затрат потребления энергии на единицу продукции, обеспечения безопасности для окружающей среды, населения и производственного персонала. Совершенствование технологий термостатирования, вентиляции, кондиционирования производственных помещений, модернизация турбохолодильного оборудования, оптимизация гидравлики сетей,

децентрализация систем охлаждения, переход на обратное водоснабжение, возвращение части тепловой энергии для повторного использования, сублимации и десублимации гексафторида урана и  $\text{HF}$  достигается автором путем математического моделирования, численных и экспериментальных исследований данных процессов с использованием новой холодильной техники без озоноразрушающих веществ, а так же воздуха в качестве хладагента вместо жидкого азота.

Целью диссертации является теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена, гидро-газодинамики, фазовых переходов при десублимации и сублимации гексафторида урана и его примесей для выработки обоснованных решений и рекомендаций по повышению их эффективности, снижению удельных энергозатрат, совершенствованию технологии и техники, использованию нового высокоэффективного оборудования и безопасных и экономичных хладагентов.

### **Общая характеристика диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы из 289 наименований. Она изложена на 306 страницах машинописного текста, содержит 92 рисунка и 16 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной темы, сформулированы цель и задачи исследований, описана новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, приведена апробация результатов и число публикаций автора по теме диссертации, а также ее краткое содержание.

**В первой главе** приведен обзор литературных данных по проблемам технологии, связанным с термостатированием, вентиляцией, кондиционированием, сублимацией, десублимацией использованием новой холодильной техники без озоноразрушающих веществ, а так же воздуха в качестве хладагента.

Намечены направления исследований, направленные на решение данных проблем. Объяснена необходимость и определен порядок проведения исследований. Рассмотрены условия, которые необходимо принимать во внимание при решении поставленных задач.

**Во второй главе** представлен обзор составных частей технологии обогащения урана. Показана возможность значительной экономии ресурсов, задействованных в обеспечении объектов, использующих для термостатирования хладагенты.

Анализ работы имеющихся технологических участков позволил наметить пути их оптимизации, связанные с максимально возможным снижением потребления ресурсов, а также значительным уменьшением затрат на реализацию технологии обогащения урана в целом.

Описан, предложенный автором, способ достоверного определения параметров процесса теплообмена вентиляционного воздуха на больших массивах поверхностей технологического оборудования. Приведены результаты исследования естественно-конвективного и принудительного течения вязкого воздуха, проводящего тепло, в моделируемом производственном помещении. Сделана оценка распределения полей влагосодержания, воздушных потоков, формирующих стационарное поле температур поверхностей. Представлены результаты численного моделирования процесса вентиляции машинного зала.

Хорошая сходимость проведенных теоретических расчетов и экспериментальных работ подтвердила адекватность созданной математической модели.

Полученные результаты показали возможность принципиального изменения и оптимизации режимов работы вентиляционных систем действующего производства.

В заключение главы приведено обобщение результатов и выводы.

**Третья глава** посвящена исследованиям, связанным с переводом оборудования на озонобезопасный хладагент хладон-12. Для определения

достижимой мощности холодильных машин произведены теоретические и параметрические исследования их элементов: испарителя и конденсатора. Приведена оценка прихода паров хладона-12 и его расход в испарителе в зависимости от давления. Определена массовая скорость конденсации хладона-12. Представлены результаты исследований влияние угла наклона лопаток направляющего аппарата турбокомпрессора на работу теплообменников. В результате модернизации теплообменных аппаратов, гидравлических режимов сетей охлаждающей воды и хладагента холодильной машины ХТМФ-248 получено увеличение ее производительности на 27,86%, снижение энергопотребления на 13,63%. Холодильный коэффициент этой машины составил 0,23 кВт/кВт, что сопоставимо с лучшими образцами используемого холодильного турбокомпрессорного оборудования.

На основании расчета энергетических характеристик турбокомпрессора и анализа процессов теплообмена в холодильной машине автором разработана методика определения допустимых пределов повышения мощности холодильной машины.

В результате проведенной модернизации холодильных машин срок их службы продлен на 14 лет. Экономический эффект от внедрения модернизированных холодильных машин за 2011 год составил примерно 13 млн. рублей.

В заключение главы приведены выводы.

**В четвёртой главе** показано, что изменение порядка организации кондиционирования машинного зала потребует пересмотреть систему термостатирования производства обогащенного урана.

Приведена многофакторная методика расчета движения хладагента в гидравлической сети с тепловой нагрузкой до 25 МВт, основанная на гидравлическом подходе. Описаны результаты работ по созданию и внедрению в производство крупных теплонасосных установок.

Сделана оценка энергетических и экономических преимуществ при

изменении режимов охлаждения и кондиционирования производства по обогащению урана. На основе полученных результатов предложена перспективная система термостатирования разделительного производства, обеспечивающая необходимую влажность в машинном зале, из которой исключены промежуточные контуры проточного охлаждения конденсаторов машин и теплообменных установок, комплекс промежуточных теплообменных установок. Показано, что ожидаемый экономический эффект от реализации мероприятий по реконструкции систем термостатирования и перехода на оборотные системы водоснабжения может составить примерно 177 млн. руб. в год

В пятой главе описана математическая модель течения холодного воздуха в сети секционных трубопроводов коллектора емкостей, а также в теплообменниках с учетом теплообмена потока холодного воздуха со стенками емкостей, теплообмена емкостей с окружающей средой и потоков тепла при десублимации  $UF_6$  в емкостях.

Предложена оригинальная методика определения требуемой мощности охлаждения.

Приведены результаты исследования процесса теплообмена потока холодного воздуха со стенками емкостей при десублимации потоков  $UF_6$  в различных режимах работы коллектора емкостей. Оценены характерные времена происходящих в емкости процессов: время распространения волны давления, время переноса потока газа, время установления вязкого течения, время установления диффузии, время установления теплопроводности в газовой фазе, время прогрева металлических конструкций, время прогрева десублимированного  $UF_6$ . Определены величины тепловых потоков, возникающих в процессе десублимации  $UF_6$ .

Представлен термодинамический расчет требуемой мощности холодильной установки, энергозатрат на охлаждение воздуха и полезной тепловой нагрузки в системе охлаждения емкостей для десублимации.

По результатам анализа термодинамических процессов охлаждения рекомендована генерация холода с максимальной эффективностью, путем адиабатического расширения воздуха с отводом внешней работы. При этом воздух является одновременно рабочим телом и приводом.

Приведены результаты исследования теплообмена при десублимации газов в емкости и оценка величины теплового потока на одну емкость, работающую в режиме десублимации  $UF_6$ .

Представлены результаты теоретического исследования газодинамических и тепломассообменных процессов в трубопроводных системах, емкостях при конденсации  $UF_6$ .

Описана математическая модель газодинамических процессов течения хладагента в трубопроводной системе коллектора емкостей, процессов теплообмена воздуха со стенками емкости.

Представлены результаты экспериментальных и опытно-промышленных испытаний воздушно-холодильной машины.

Технологическая установка на базе ВХМ–0,54/0,6 внедрена в действующее производство. Годовой экономический эффект составил 29 млн. рублей в ценах на энергоносители 2013 г.

**В шестой главе** приведены результаты исследования, направленного на замену жидкого азота при проведении десублимации  $UF_6$  и  $HF$  холодным воздухом.

Определены величины теплообмена между холодным воздухом и стенками осадительной емкости при различных режимах их работы.

Представлены результаты исследования процесса десублимации  $HF$  на стенках осадительной емкости с учетом ассоциативных связей молекул фтористого водорода в присутствии неконденсируемых газов.

Приведены результаты теоретического исследования течения холодного воздуха в системе «десублиматор – отсек охлаждения» с учетом теплообмена со стенками емкостей, окружающей средой и потоков тепла от газовой смеси.

Описана конструкция разработанного опытного стенда по изучению парциальных давлений компонентов газовых смесей и приведены результаты экспериментальных исследований по определению давления насыщенного пара HF в диапазоне температур 77...197 К. Получено выражение для зависимости давления насыщенного пара безводного фтористого водорода от температуры для интервала температур 140...190 К. Представлена эмпирическая зависимость давления насыщенного пара безводного фтористого водорода в интервале температур 140...198 К.

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса десублимации HF в опытном отсеке охлаждения в динамическом режиме совместно с неконденсируемыми примесями. Показано, что наличие неконденсируемых газов не оказывает влияния на процесс десублимации HF.

Приведена сравнительная оценка не улавливаемого количества вещества при очистке потоков UF<sub>6</sub> с использованием азота и холодного воздуха.

Описана схема разработанного экспериментального стенда для измерения давления насыщенного пара безводного фтористого водорода с использованием аппарата для десублимации компонентов газовой смеси.

На основе полученных расчетных и экспериментальных данных обоснована возможность использования воздушно-холодильных машин для охлаждения осадительных емкостей, десублимации фтористого водорода из технологического потока газовой смеси.

В заключение главы приведены выводы.

**В заключение** диссертации представлены основные результаты исследования процессов, задействованных при термостатировании производств по обогащению урана и основные положения работы.

Сделана оценка достигнутых результатов. Показаны научные достижения, экономические эффекты по результатам внедрения разработок в АО «СХК».

Показаны перспективы дальнейшей разработки темы, а также использования результатов проведенных исследований.

**Новизна результатов проведенных исследований.** В диссертационной работе Губанова С.М. получены следующие новые результаты:

1. Создана оригинальная математическая модель стационарных естественно-конвективных и принудительных турбулентных режимов течения вязкого воздуха, проводящего тепло, в машинном зале с учетом процессов стратификации воздуха по оборудованию, размещенному в несколько ярусов.
2. Разработана методика определения предельных значений физических параметров турбокомпрессора при переходе на хладон-12.
3. Разработан алгоритм, позволяющий производить численные расчеты параметров течения хладагента в контуре циркуляции технологического оборудования с тепловой нагрузкой до 25 Гкал/час и прогнозировать значения давления.
4. Создана оригинальная математическая модель процесса охлаждения коллектора емкостей для десублимации газа с использованием в качестве хладагента воздуха.
5. Впервые теоретически и экспериментально исследованы процессы охлаждения газовой смеси и десублимации гексафторида урана, фтористого водорода захлажденным воздухом.
6. Разработана и внедрена в производство воздушно-холодильная машина для осуществления процессов десублимации веществ.
7. На основании теоретических и экспериментальных исследований показана возможность использования холодного воздуха вместо жидкого азота для осуществления процессов сублимации и десублимации.
8. Впервые получено уравнение для парциального давления фтористого водорода при температурах 140...190 К.

9. Получены ранее неизвестные сведения о параметрах конденсации HF в динамическом режиме совместно с неконденсируемыми примесями.

10. По результатам разработок получено 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и 7 патентов.

**Теоретическая значимость** определяется новым теоретическим описанием естественно-конвективных потоков газа, физико-математическими моделями гидродинамического движения и теплообмена газа с объектами для десублимации веществ, новыми сведениями о свойствах HF и UF<sub>6</sub> при десублимации в присутствии неконденсируемых газов.

**Практическая значимость результатов диссертации.**

Результаты исследований автора расширяют представление о процессах тепло- и массообмена, протекающих на производствах по обогащению урана и вносят вклад в развитие теории разделения. Предложенные методики и созданные экспериментальные стенды можно использовать для проведения исследований физических свойств газообразных веществ при криогенных температурах.

Теоретически и экспериментально обоснована возможность замещения жидкого азота, используемого на Заводе разделения изотопов АО «СХК» для охлаждения емкостей, холодным воздухом, генерируемым воздушно-холодильной машиной ВХМ-0,54/0,6, которую можно использовать при решении комплекса задач, необходимых для внедрения на разделительных предприятиях отрасли нового оборудования.

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

В результате исследования процессов кондиционирования и осушки воздуха в машинном зале и режимов стационарного турбулентного естественно-конвективного и принудительного течения вязкого теплопроводного воздуха

предложен эффективный режим вентиляции действующего производства, который может применяться на других предприятиях отрасли.

Исследование элементов турбохолодильных машин позволило организовать форсирование турбокомпрессоров, достигнуть повышения холодопроизводительности единицы оборудования на 20,98 % при одновременном снижении потребления электроэнергии на 17 %.

Проведена комплексная оптимизация систем термостатирования, кондиционирования и вентиляции, гидравлических режимов сетей, оборудования системы «источник холодоснабжения – потребитель», показавшая возможность существенного повышения эффективности существующей технологии обогащения урана. Совокупный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы на Заводе разделения изотопов АО «СХК» 66 млн. руб. в год.

Теоретически обоснована и внедрена в АО «СХК» децентрализованная система термостатирования установки десублимации.

Разработанные математические модели, результаты численных и экспериментальных исследований тепло- и массообменных процессов, полученные данные о давлении насыщенных паров фтористого водорода могут быть использованы при проектировании оборудования и создания технологий в химической отрасли. Предложенный способ охлаждения с помощью холодного воздуха может быть рекомендован для применения на других производствах, использующих в своей технологии сублимацию и десублимацию.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается использованием при разработке математических моделей классических положений механики, представленных в виде систем дифференциальных уравнений, отражающих основные законы сохранения, реализации алгоритмов расчетов с применением апробированных методов решения систем дифференциальных уравнений, использованием при

проведении экспериментальных исследований аттестованных приборов и сертифицированного оборудования, согласием расчетных и экспериментальных данных.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты диссертационной работы С.М. Губанова могут быть использованы в Акционерном обществе «Уральский электрохимический комбинат» (г. Новоуральск Свердловской области), в Акционерном обществе «Производственное объединение Электрохимический завод» (г. Зеленогорск Красноярского края), в Акционерном обществе «Сибирский химический комбинат» (г. Северск Томской области), в Акционерном обществе «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск Иркутской области) для повышения энерго- и ресурсоэффективности работы этих предприятий за счет использования хладона-12, замены жидкого азота на воздух, внедрения в производство эффективных технологий и техники термостатирования, кондиционирования, сублимации и десублимации в совокупности с изменениями и оптимизацией технологических процессов. Кроме того, они могут быть использованы в Национальном исследовательском ядерном университете «Московский инженерно-физический институт» (г. Москва), в Уральском федеральном университете (г. Екатеринбург), в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (г. Томск) и Томском государственном университете (г. Томск) при подготовке специалистов в области разделения изотопов, очистки веществ и математического моделирования данных процессов.

Основные результаты диссертации **опубликованы** в 42 работах, в том числе в 9, статьях в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертаций, 19 публикациях в материалах

конференций различного уровня, 7 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ и 7 патентах.

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

**Основные замечания** по работе.

1. В диссертации и автореферате не отражен личный вклад автора.

2. В диссертации и автореферате автор ошибочно называет разработанные им модели физико-математическими, тогда как модели бывают математическими (использующими известные законы, уравнения или эмпирические зависимости) либо физическими (уменьшенный вариант физического объекта, на котором проводятся экспериментальные исследования при условии соблюдения принципа подобия).

3. В цели диссертации говорится о разработке «... предложений по совершенствованию технологии разделения изотопов урана», тогда как результаты работы непосредственно не касаются изменения самой технологии обогащения урана, а касаются лишь процессов термостатирования на данном производстве.

4. По ссылке [225], приведенной на стр. 84 диссертации невозможно установить какая именно методика использовалась для расчета переноса примесей, т.к. в ней указано общее количество страниц. В тексте диссертации не сказано в чем заключается эта методика.

5. В п. 2.1 диссертации приведено 3 варианта расчета вентиляции машинного зала, однако, анализируя полученные результаты, автор не дает рекомендаций какой из этих вариантов следует использовать на производстве.

6. В п. 3.5 диссертации на стр. 143 сказано «Исследования показывают, что увеличение давления в конденсаторе машины с  $8 \times 10^5$  Па до  $11 \times 10^5$  Па приводит к увеличению тока на электродвигателе компрессора с  $\sim 80$  А до  $\sim 100$  А (на 20 %).», однако результаты из которых это следует в данном параграфе не приводятся.

7. Данные по холодопроизводительности и энергопотреблению ХТМФ-248 на стр. 13 (Реализация результатов работы) и на стр. 144 диссертации не совпадают.

8. В пункте Предложения по децентрализации схемы охлаждения оборудования разделительного производства на стр. 168 диссертации говорится: «Анализ результатов вариантов расчётов показывает, что для уменьшения энергетических потерь и увеличения коэффициента использования систем холодоснабжения необходимо произвести децентрализацию систем охлаждения.», ... «Для целей осушки воздуха применены специальные осушительные установки, работающие в соответствии с рекомендациями расчётов.». Не ясно какие результаты расчетов и рекомендации автор имеет ввиду.

9. В п. 5.2 диссертации не описан объект численных исследований (не указано количество и толщина ребер, их расположение в емкости, диаметр входного патрубка, диаметр центрального отверстия в ребрах, диаметр емкости). Из описания модели не ясно учитывается ли в данном объекте тепло- и массообмен на горизонтальных ребрах емкости. Если учитывается, то как?

10. На стр. 204 диссертации приведены эмпирические формулы, однако не указано в каком диапазоне температур они работают.

11. На стр. 209 диссертации сказано: «Тестирование алгоритма численного решения задачи расчета охлаждения ёмкостей проводилось на решении ряда модельных задач [29].

Проведённые методические и тестовые расчёты показали, что разработанная программа расчёта обеспечивает выполнимость законов сохранения массы и энергии, даёт адекватные результаты расчётов.». Из приведенной информации не ясно какие именно модельные задачи тестировал автор и какими результатами подтверждена адекватность данной модели.

12. На стр. 229 диссертации говорится: «Десублимация HF из газовой

смеси осуществляется в цилиндрическую ёмкость объемом 24 литра, с 6 пластинами-сегментами. Ёмкость охлаждается жидким азотом. Пластины-сегменты расположены поперек проходного сечения потока газовой смеси, повернуты под углами 60 градусов друг к другу.»), при этом схема данной емкости не приводится. Сложно представить, что она из себя представляет.

### 13. Замечания, касающиеся оформления:

В тексте диссертации и автореферата используются несистемные единицы измерения давления, температуры.

Часть литературных источников, использованных в диссертации, не является общедоступной (например, источник № 228 Справка об ОПЭ системы вентиляции зд. 1001 от 25.08.2014 / АО «Сибирский химический комбинат». – Северск, 2014. – № 03/365. – 4 с.)

В автореферате и диссертации имеются досадные опечатки, грамматические ошибки, повторы некоторых предложений.

В описании структуры диссертации не указано количество таблиц и графиков.

### **Заключение**

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

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, п. 1 «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

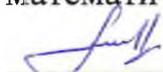
Оформление диссертации отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Анализ диссертационной работы С.М. Губанова показал, что уровень научно-технических и технологических исследований и разработок, их новизна и научно-практическая ценность позволяют сделать заключение, что совокупность полученных результатов и развитых положений по диссертационной теме можно квалифицировать как новое крупное научно-техническое достижение в решении проблем термостатирования технологических процессов для производств по обогащению урана и повышению их экологической безопасности, энерго- и ресурсоэффективности.

На основании изложенного считаем, что диссертация С.М. Губанова «Физическое и математическое моделирование процессов термостатирования в производстве по разделению изотопов урана» является законченным научным исследованием и соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ, 24.09.2013), а ее автор Сергей Михайлович Губанов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» "23" января 2020 г., протокол № 22.

Профессор Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор физико-математических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)



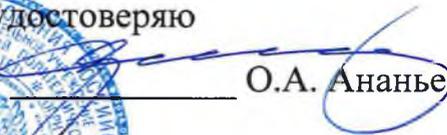
Анатолий Павлович Вергун

Профессор Отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)

 Алексей Алексеевич Орлов

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

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

Ученый секретарь Ученого совета ТПУ  О.А. Ананьева



Я, Вергун Анатолий Павлович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сергея Михайловича Губанова, и их дальнейшую обработку.

Я, Орлов Алексей Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Сергея Михайловича Губанова, и их дальнейшую обработку.