

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 определяется необходимостью сокращения затрат производства, а также соображениями снижения нагрузки радиационных материалов на окружающую среду.

Диссертация С. М. Губанова посвящена решению проблем повышения энергоэффективности термодинамических и тепломассообменных процессов, используемых в технологии обогащения урана газоцентрифужным способом, определению границ эффективных десублимационных процессов при выделении UF_6 , HF из газовой среды, созданию источников получения перестраиваемых экстремально низких и криогенных температур.

В диссертации исследуются процессы, происходящие в наиболее энергетически напряжённых технологических комплексах разделительного производства таких как: системы охлаждения и кондиционирования для которых определяются параметры эффективных способов организации термостатирования производства. Проводится теоретическое сопровождение работ при решении проблемы перевода парка турбохолодильного оборудования на работу с озонобезопасными веществами.

Обоснование способа фракционного разделения газовых смесей путём селективной десублимации фтористого водорода и гексафторида урана без использования жидкого азота является примером системного подхода к изучаемой проблеме. Решаются проблемы острой народно-хозяйственной задачи по исключению из оборота химических связующих радиоактивных веществ и прекращением загрязнения окружающей среды от этого источника. Значительно снижается энергоёмкость комплекса, исключаются вредные и опасные факторы, связанные с применением жидкого азота. Получены значительные экономические эффекты.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация изложена на 306 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, списка условных обозначений и сокращений. Список литературы содержит 289 наименований. Детальные выводы приведены в конце каждой главы.

Во **введении** диссертации сформулирована актуальность выбранной темы исследований, цель работы, ее практическая ценность, научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной и содержит сведения об объектах исследований, формулируются проблемы, описывается общая проблематика поиска комплексных решений. Проведен литературный обзор и анализ подходов к математическому моделированию процессов тепло-массообмена.

Представлена блок-схема газоцентрифужного производства; описаны основные

элементы технологии, порядок протекания процессов, детально разобраны участки технологии, где происходят затраты энергии. Констатируется необходимость обоснования перспективных процессов теоретическими исследованиями и опытно-экспериментальными работами. Приводится описание методов моделирования, используемых в работе.

Во **второй главе** с помощью различных моделей описывается естественно-конвективное и вынужденное течение вязкого теплопроводного воздуха в окрестностях объектов подобных существующим производствам по разделению изотопов урана. Приводятся результаты опытно-промышленных испытаний, подтверждающие адекватность математической модели и доказательства предварительно рассчитанных эффектов.

В **третьей главе** описывается методика определения достижимых границ мощности турбохолодильных машин. Методика является совокупностью расчётов элементов машины (испарителя, конденсаторов, турбокомпрессора, промежуточных аппаратов) и является индивидуальной для каждой машины поскольку учитывает сведения, полученные экспериментальным путём.

Острота исследуемой проблемы усугубляется запрещением и прекращением производства озоноразрушающего рабочего тела фреона R-12. Изменение проточной части турбокомпрессора под озонобезопасный хладагент произведено на основании расчётных данных о пределах тепломассообменных процессов с учётом данной конфигурации холодильной машины. Показана необходимость проведения индивидуальных расчётов допустимой мощности для каждой единицы оборудования. Приводятся результаты технических характеристик нескольких вариантов технического перевооружения, достигнутые энергетические и расчётные экономические эффекты.

В **четвёртой главе** анализируются прогнозируемые изменения энергетических характеристик, составляющих системы термостатирования разделительного производства, которые были рассмотрены в предыдущих главах. Показывается необходимость перестройки системы термостатирования в целом. Рассчитываются энергетические преимущества. Методика расчёта движения холодоносителя в гидравлической основанная на гидравлическом подходе позволяет рассчитывать сети с тепловой нагрузкой до 25 МВт. Описываются результаты работ по созданию и внедрению в производство крупных теплонасосных установок, срок окупаемости, коэффициент трансформации. Формулируются предложения по созданию перспективных систем термостатирования разделительного производства.

В **пятой главе** представлены физико-математические модели течения холодного воздуха в сети секционных трубопроводов блока ёмкостей и в теплообменниках с учётом теплообмена потока холодного воздуха со стенками, теплообмена аппаратов с окружающей средой и потоков тепла при десублимации технологических потоков, содержащих UF_6 , HF . Представлены результаты экспериментальных и опытно-промышленных испытаний новой воздушно-холодильной машины, сконструированной на основании предварительных расчётов. Приводится описание работ по внедрению обновлённой технологии в действующем производстве.

В **шестой главе** рассматриваются процессы выделения из газовых смесей гексафторида урана и безводного фтористого водорода путём десублимации и последующей

сублимации веществ при различных характерных для веществ низких температурах фазовых переходов. Исследование является обоснованием эффективного способа разгонки газовой смеси, позволяющего производить выделение веществ физическими способами. Приводятся результаты экспериментальных работ, в том числе в присутствии неконденсируемых газов, подтверждающих исходные предпосылки. Расчётным и экспериментальным путём определяются границы эффективного способа фракционной разгонки смеси газов UF_6 , HF .

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Достоверность и обоснованность результатов работы вытекает из внутренней непротиворечивости авторских выкладок при построения физических и математических моделей для решения поставленных задач, применением классических методов и приёмов математического моделирования, использованием научно обоснованных методик экспериментов, результатами экспериментальных работ и внедрением технологий в производство. В работе применялось аттестованное экспериментальное оборудование. Средства измерений включены в Государственный реестр средств измерений, периодичность поверки подтверждена аттестованными метрологическими службами.

Новизна результатов: Автором проведено систематическое исследование закономерностей движения стационарного естественно-конвективного и вынужденного турбулентного режимов течения вязкого теплопроводного воздуха в помещении с учётом процессов стратификации воздуха по ярусам размещения оборудования. Разработаны модели и методики, позволяющие использовать естественные эффекты подъёмных и опускных течений воздуха для получения выгодного энергетического баланса системы.

На основании расчётно-экспериментальных исследований тепломассообменных и термодинамических возможностей элементов холодильной машины разработана методика определения предельных значений физических параметров рабочего тела при форсировании турбокомпрессора при переходе на озонобезопасное рабочее тело.

Теоретически обоснован, разработан и внедрён в производство универсальный источник криогенных температур для осуществления процессов десублимации веществ.

Всесторонне изучена проблема использования энергии адиабатически расширившегося сжатого воздуха в тубодетандерном агрегате предварительно осушенного от влаги и углекислоты для отвода тепловой энергии при десублимации газовых смесей при низких и криогенных температурах. Внедрён в производство способ охлаждения газовой смеси и десублимации гексафторида урана захлажденным воздухом.

Впервые проведены теоретические исследования, представлены доказательства возможности использования холодного воздуха вместо жидкого азота для осуществления процессов сублимации и десублимации HF . Создана воздушно-холодильная машина. Создан опытно-экспериментальный стенд по определению парциальных давлений веществ в диапазоне температуры от 93 К до 193 К. Получено новое уравнение зависимости парциального давления от температуры, справедливое в диапазоне температуры от 140 К до 190 К.

Научно обоснован способ десублимации фтористого водорода.

Значимость результатов для науки и практики.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в том, что полученные закономерности дополняют знания о механизмах естественно-конвективного и вынужденного движения газа в окрестности условных объектов, физико-математическими моделями описаны процессы отвода тепловой энергии при десублимации веществ при критически низких температурах.

Экспериментальные данные могут быть использованы для верификации и валидации теоретических моделей. Методики экспериментальных работ по определению порога десублимации UF_6 , HF должны быть использованы для решения подобных народно-хозяйственных проблем.

Практическая значимость: исследования автора расширяет представление о режимах течения стационарного турбулентного естественно-конвективного и вынужденного течения вязкого теплопроводного воздуха в окрестностях объектов, методах расчёта пределов повышения мощности турбохолодильного оборудования при замене рабочего тела, процессах теплообмена, протекающих при десублимации и сублимации газообразных веществ при экстремально низких температурах. Внедрение в производство результатов теоретических и экспериментальных исследований позволило получить значительные экономические эффекты от разработок.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, выносимых на защиту.

Обоснованность результатов диссертационного исследования, положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием классических методов термодинамических расчетов и статистической обработки экспериментальных данных, верификацией используемых математических моделей, хорошей сходимостью полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, научно обоснованными методиками экспериментальных работ. Внедрением разработок в промышленность.

Полнота опубликования результатов исследований.

Все основные результаты диссертации представлены в научной печати.. По теме диссертации опубликовано 42 работы, в том числе в 9 статьях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций, 7 патентов, 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Содержание **автореферата** соответствует содержанию и основным положениям диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

В основном, замечания и вопросы связаны со 2-й главой.

1) Если в разделе 2.2 главы 2 при описании естественно-конвективного течения вязкого теплопроводного воздуха автор общепринято использовал трёхмерные уравнения Навье–Стокса с привлечением k-ε модели турбулентности, то в разделе 2.1 приведена физико-математическая постановка задачи динамики невязкого газа без учета турбулентных особенностей течения. Но указанные расчетные параметры задачи по размерам, расходам воздуха говорят об очень больших числах Рейнольдса и Грасгофа. Автор не приводит

никаких разъяснений. Из каких справочников эти формулы (2.10) – (2.12)? И почему их можно использовать в данной задаче? Коэффициент теплоотдачи от технологического оборудования (2.12) учитывает возможность существования и ламинарного и турбулентного режимов, а коэффициенты теплоотдачи при теплообмене воздуха с ограждающими конструкциями (2.10) - (2.11) определялись по формулам только ламинарного вынужденного и свободно-конвективного теплообмена. Почему? Кстати, в (2.13) Nu_N должен быть пропорционален числу Прандтля в степени 0,43, а не 1.

2) В таблице 2.5 (стр.93) энергопотребление в варианте 2.3 и варианте ОПЭ-2015 отличаются примерно в три с лишним раза. Причины различия не анализируются.

3) На странице 101 написано, что «...Точность расчёта, которая контролировалась балансом тепловых потоков и потоков массы составляет 0,04 Вт.», но не указано, как конкретно рассчитывалась точность.

4) На странице 143 величина давления в конденсаторе, по всей видимости, указана с ошибкой по тексту « $\sim 9,6 \cdot 10^5$ Па».

5) В главе 5 при расчете разветвленной системы трубопровода не указано, каким образом учитывались повороты, углы и так далее и как задавались характеристики на границах смыкания участков трубопровода

6) В главе 6 имеются ссылки на отсутствующую в списке литературу [291, 292] (стр. 254) и на [290] (стр. 258).

7) В работе автор вынужденно использует очень много различных обозначений, и, к сожалению, не всегда удачно. Например k – это и показатель адиабаты газовой смеси; и параметр k - ϵ модели, и коэффициент воздухопроницаемости конструкций (стр. 43). В формуле (2.10) пара индексов F и N при числе Нуссельта обозначают вынужденное и свободно-конвективное течение, а в (2.12) – ламинарное и турбулентное.

8) Рисунок 1.6 – Зависимости давления насыщенных паров UF_6 , HF , ClF_3 от температуры на стр 62 (Рис. 3 на стр. 13 автореферата) неудобен для анализа, поскольку ось давления при низких температурах желательно представлять в логарифмическом формате

Замечания не снижают научной и практической значимости результатов и общей положительной оценки работы. Замечания продиктованы интересом к полученным результатам, а также дальнейшему развитию работы.

Общая характеристика диссертационной работы.

Считаю, что диссертационное исследование вносит существенный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований свойств веществ в жидком, твердом и газообразном состоянии при наличии всех видов тепло- и массообмена исследований, теоретическую и техническую термодинамику, теорию фазовых переходов, численное и натурное моделирование теплофизических процессов в технике и эксперименте, расчет и проектирование нового теплотехнического оборудования и соответствует формуле специальности для физико-математических наук, п.1 паспорта специальности «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.» (из области исследований для физико-математических наук) - 01.04.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника.

На основании изложенного считаю, что диссертация Губанова С. М. «Физическое и математическое моделирование процессов термостатирования в производстве по разделению изотопов урана» является законченным научным исследованием и соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.). Автор диссертации Губанов Сергей Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории проблем тепломассопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника), профессор

«_06_» __02__ 2020 г.

Лежнин Сергей Иванович

Подпись С.И. Лежнина заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

<http://www.itp.nsc.ru>, эл. почта: director@itp.nsc.ru,

тел. организации: 8 (383) 330–90–40.



М.С. Макаров