

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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 диссертационной работы. Решение проблемы выбора рациональных параметров рабочих тел, их физических, химических и прочих свойств, особенно в сложных технологических процессах термостатирования, на сегодняшнем этапе особенно востребовано в связи с широкими запросами современного производства по разделению изотопов урана. Математические модели и численные алгоритмы решения задач газодинамики и тепломассообмена в сложных технических объектах и системах разделительного производства, являются эффективным инструментом при выборе, обосновании и контроле технологических условий для формирования требуемых фазовых состояний и комплекса физических свойств целевого вещества. Поскольку диссертация посвящена развитию физических и математических моделей процесса термостатирования применительно к исследованию теплофизических параметров рабочих тел и режимов отведения тепловой энергии системами охлаждения, то актуальность выбранной соискателем темы несомненна.

Структура, объем и основное содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, списка использованной литературы, списка условных обозначений и сокращений; содержание работы изложено на 306 страницах. В ней содержится 92 рисунка и 12 таблиц. Список литературы состоит из 289 источников.

Во введении сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, обоснованы актуальность проблемы, степень разработанности темы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, методология и методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Описана структура диссертации, приведены результаты апробации работы.

Первая глава содержит оригинальный обзор работ, на основании которого конкретизировано современное состояние проблемы исследования и определены перспективные направления ее развития. Проведен анализ эффективности процесса термостатирования в разделительном производстве изотопов урана и сформулированы основные направления исследований параметров систем и оборудования, используемого для организации рассматриваемого процесса.

Во второй главе приводятся теоретические и экспериментальные результаты, позволяющие получить закономерности распределения температуры и влажности воздуха в производственном здании с учетом теплообмена воздуха с ограждающими конструкциями и технологическим оборудованием. Следует отметить, что в данной главе автор приводит ряд модельных решений, отражающих различные варианты подачи вентиляционного потока воздуха в здание. На основе трехмерного описания стационарного течения несжимаемого вязкого теплопроводного воздуха с использованием k - ϵ модели турбулентности проведены параметрические модельные исследования теплообмена с поверхностями условного оборудования. Показано, что использование естественно-конвективных потоков воздуха позволяет организовать термостатирование объектов с параметрами, требуемыми для производства. Адекватность приведенных модельных решений подтверждена результатами практических исследований и опытно-промышленной эксплуатацией расчётных режимов в действующем производстве.

Третья глава посвящена теоретическому анализу процессов тепломассообмена и определению теплофизических характеристик элементов турбохолодильной машины (испарителя, конденсаторов, турбокомпрессора, промежуточных аппаратов). На основе

аналитических зависимостей и экспериментальных данных приведен анализ распределения тепловой энергии в коммуникациях турбохолодильной машины, произведена оценка теплофизических параметров, влияющих на общую картину процесса термостатирования. Следует отметить, что все приведенные расчеты параметров получены для реальных режимов работы оборудования, а исходные данные для расчетов приводятся исходя из опыта эксплуатации. Полученные результаты учтены в мероприятиях, направленных на повышение энергетических показателей холодильных машин в действующем производстве.

В четвертой главе для систем холодоснабжения потребителей приведены расчеты гидравлических и тепломассовых параметров. В частности, получены аналитические зависимости по расчету расхода хладоносителя и изменения его температуры для трёх объектов потребления в зависимости от перепада давления и коэффициентов сопротивления и тепловой нагрузки. Полученные результаты использовались для обоснования перспективной децентрализованной системы термостатирования производства.

В пятой главе изложены научные положения, обосновывающие теплофизические параметры процесса десублимации гексафторида урана. Разработана математическая модель нестационарного течения холодного воздуха в трубопроводной сети, в блоках ёмкостей и теплообменниках, учитывающая теплообмен в объемах сопряжений трубопроводов со стенками и окружающей средой. В результате численного моделирования получены распределения температуры газа, стенок трубопроводов и емкостей для варианта наиболее близкого к условиям протекания технологического процесса и типовых временных интервалов. Приведен анализ термодинамических показателей предлагаемой воздушной холодильной машины при десублимации гексафторида урана, позволяющий обосновать снижение энергетических затрат на процесс термостатирования.

Шестая глава содержит результаты аналитических оценок процессов тепломассопереноса при выделении компонентов газовой смеси с низкой температурой фазового перехода из технологического потока газа. Проведены исследования температурных режимов работы осадительной ёмкости с учетом теплового баланса трубопроводной сети транспортировки холодного воздуха, вырабатываемого воздушной холодильной машиной. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что использование холодного воздуха взамен жидкого азота удовлетворяет требованиям технологии выделения компонентов газовой смеси в исследуемом интервале температур.

В заключении сформулированы научные выводы по проделанной работе.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- получены закономерности распределения температуры и влажности воздуха в производственном здании с учетом теплообмена воздуха с ограждающими конструкциями и технологическим оборудованием, позволяющие оценивать составляющую нагрузку, приходящую на кондиционирование при термостатировании объектов производства;

- теоретически и практически обоснованы теплофизические характеристики элементов турбохолодильной машины, позволяющие произвести перевод системы охлаждения на озонобезопасное рабочее тело;

- разработана методика расчёта параметров течения хладоносителя в контуре циркуляции объектов с тепловой нагрузкой более 25 Гкал/час, позволяющая прогнозировать значения давлений в гидравлической сети для регулировок, обеспечивающих термостатирование объектов;

- разработана математическая модель нестационарного течения холодного воздуха в трубопроводной сети, в блоках ёмкостей и теплообменниках, учитывающая теплообмен в объемах сопряжений трубопроводов, со стенками и окружающей средой, описывающая распределения температуры газа и стенок трубопроводов и емкостей для варианта наиболее близкого к условиям протекания технологического процесса и типовых временных интервалов процесс термостатирования;

- получены расчетные и экспериментальные теплофизические параметры, обоснованы тепловые и газодинамические режимы, доказывающие, что использование холодного воздуха взамен жидкого азота удовлетворяет требованиям технологии выделения компонентов газовой смеси в исследуемом интервале температур.

- впервые получена зависимость давления HF в режиме конденсации и десублимации в диапазоне температуры от 93 К до 193 К. Новое уравнение определяет зависимость парциального давления HF от температуры, справедливо в диапазоне температуры от 140 К до 190 К. 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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений, поскольку основываются на использовании базирующихся на фундаментальных законах сохранения методов термодинамики, газодинамики и механики многофазных сред, хорошо математически обоснованных способах решения систем дифференциальных уравнений, позволивших получить результаты, согласующиеся с известными результатами аналитических, численных расчетов и натуральных экспериментов, нормативными расчетными и производственными экспериментальными данными.

Практическая значимость полученных автором результатов подтверждается приведенными отчетами об использовании результатов работы по расчету параметров теплотехнического оборудования, используемого в процессе термостатирования на действующем производстве. Применение разработанных автором расчетных методик позволило повысить энергоэффективность производства, разработать рекомендации по модернизации оборудования охлаждающих систем для требуемых условий технологического процесса получения целевого продукта с заданными свойствами.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом. Оценка содержания диссертации, ее завершенности. Диссертация Губанова Сергея Михайловича «Физическое и математическое моделирование процессов термостатирования в производстве по разделению изотопов урана», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является завершенной научной работой.

Содержание работы изложено на высоком научном уровне, последовательно и методически правильно. Текст написан грамотно, использован стиль изложения и язык, отвечающий требованиям, предъявляемым к работам такого рода, в научном и физико-математических аспектах.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. Основные результаты работы достаточно полно представлены в публикациях автора.

По диссертационной работе имеются **замечания:**

1. При проведении численного моделирования во второй, и последующих главах диссертации по разработанным расчетным моделям использовались величины теплофизических параметров веществ. Непонятно были ли произведен учет изменения этих величин от температуры и давления.

2. В математических моделях в качестве замыкающих условий для расчета процессов теплообмена используется коэффициент теплоотдачи. Так, например, во второй и пятой главах рассматриваются нестационарные постановки. В этом случае применение величины коэффициента теплоотдачи требует правильного обоснования при расчете по времени.

3. На странице 100 при описании метода решения систем уравнений указано, что расчетная область разбивалась на 960128 ячеек. Не приведен характерный размер расчетной ячейки и величина невязки.

4. На странице 108 в таблице 2.7 представлена мощность теплового потока при различных температурах воды. Наверно это опечатка? Имелось в виду воздуха?

В таблице 2.7 и таблице 2.8 на странице 110 указаны три скорости воздушного потока. Из каких соображений был выбраны именно эти значения скорости потока вентиляционного воздуха ?

5. Во второй главе при исследовании теплообмена условного оборудования расположенного по ярусам при вентиляции потоком воздуха не определена итоговая величина теплового потока по всем ярусам. Какая величина коэффициента теплоотдачи из расчетного диапазона, указанного на стр. 111 была выбрана для проведения модельных решений ?

6. В правых частях уравнений (4.29) на стр. 156 и (4.32) на стр. 157 приводится запись соотношения расходов $(G'_{\text{ТОУЗ4}}/G_{\text{ТОУЗ4}})^{0.8}$. В диссертации не указано откуда взялось это соотношение? Что является основанием для такой записи ?

7. В шестой главе были проведены эксперименты, связанные с измерением давления насыщенного пара безводного фтористого водорода в диапазоне температур от 88 К до 190 К. Результаты приведены на рис. 6.18 на стр. 252 и рис. 6.19. на стр. 253 в виде графиков $\ln(p)$ от $(1/T)$. В тексте есть пояснения, что обработка данных приведена в интервале (140 – 190) К. Чем это объясняется? Каков при этом интервал абсолютных значений давления?

Имеются замечания по оформлению текстовой части:

- в работе и автореферате не приведена информация о количестве рисунков и таблиц;
- для различных физических величин использованы одни обозначения, так для величины массового и объемного расхода обозначаются как « G », например на стр. 89 диссертации, величина имеет размерность объемного расхода, а на стр. 126, 130 имеет размерность массового расхода;

- встречаются опечатки, например на стр. 85 величина k имеет размерность м^3 , а стр. 87 та же величина измеряется как $\text{м}^3/(\text{Па}\cdot\text{с})$.

- в тексте имеются повторения нумерации, так «рисунок 1.5», повторяется на стр. 44 и стр. 58., пропущен номер рисунка 6.15. на стр. 244.

Приведенные замечания не влияют на положительную оценку работы. Основные положения и результаты диссертации научно обоснованы, не вызывают сомнений, являются оригинальными, получены лично автором и достаточно представлены в научных работах.

Соответствие диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

В целом, диссертационная работа по содержанию, научной и практической значимости, объему и оформлению соответствует установленным требованиям Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Диссертация является научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по следующим областям исследования:

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.

п.2. Исследование и разработка рекомендаций по повышению качества и улучшению теплофизических свойств веществ в жидком, твердом (кристаллическом и аморфном) состояниях для последующего использования в народном хозяйстве.

На основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований носящих фундаментальный характер, изложены новые научно обоснованные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие атомной промышленности страны, позволяет повысить эффективность производства, снизить удельные затраты энергии на единицу продукции, обеспечить безопасность производства для окружающей среды, населения и персонала.

Считаю, что диссертация Губанова Сергея Михайловича «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.), а ее автор, Губанов Сергей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент

Старший научный сотрудник лаборатории физико-химической механики Института механики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника), доцент

«28» января 2020 г.

 _____ Макаров Сергей Сергеевич

Подпись Макарова Сергея Сергеевича
подтверждаю:

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

 _____ Альес Михаил Юрьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

426067, г. Ижевск, ул. им. Т. Барамзиной, д. 34,

тел.: +7 (3412) 50-82-00

udnc@udman.ru, <http://udman.ru>

