

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Дурновцева Максима Ивановича  
**«Математическое и физическое моделирование процессов тепло- и массообмена  
в устройствах для десублимации фтористого водорода»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация Дурновцева М.И. посвящена моделированию технологических процессов в устройствах для сублимации фтористого водорода и расчетно-теоретическому обоснованию применения воздушной холодильной машины ВХМ-0,54/0,6 на технологическом участке, предназначенном для улавливания паров фтористого водорода из газовых смесей, а также экспериментальному определению параметров технологического процесса очистки технологического потока от фтористого водорода.

**Актуальность** диссертации М.И. Дурновцева определяется тем, что она направлена на выполнение Программы по энергосбережению и повышению энергоэффективности на предприятиях АО «ТВЭЛ», принятой в 2011 году, и на решение задачи повышения энергоэффективности производств по разделению изотопов урана АО «ТВЭЛ» корпорации «Росатом», а также подтверждается тем, что ее основные разделы выполнялись в рамках НИР НИ ТГУ с заводом разделения изотопов АО «Сибирский химический комбинат», гранта РФФИ №16-48-700732 р\_ и Гранта Президента МК-5959.2016.8.

Кроме того, тема диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ (8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика). В работе разрабатываются критические технологии РФ (9. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом). Таким образом, тематику представленной диссертации можно признать **актуальной**.

**Научная новизна работы** заключается прежде всего в том, что в ней получены следующие новые результаты:

- Разработана физико-математическая модель десублимации безводного фтористого водорода в осадительной емкости в присутствии неконденсируемых компонентов газовой смеси;
- По результатам численного исследования проведен анализ процесса десублимации безводного фтористого водорода из газовой смеси на стенках осадительных емкостей при охлаждении их жидким азотом и холодным воздухом и показано, что как в случае охлаждения пары осадителей жидким азотом, так и холодным воздухом концентрация фтористого водорода на выходе из пары осадителей не превышает концентрации, соответствующей давлению насыщенного пара фтористого водорода при температуре охлаждения стенки емкости;

- На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований обоснована возможность использования воздушной холодильной машины ВХМ-0,54/0,6 при охлаждении осадительных емкостей для десублимации фтористого водорода из технологического потока газовой смеси;

- Спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд для измерения давления насыщенного пара безводного фтористого водорода с применением в качестве хладагента холодного воздуха, генерируемого ВХМ-0,54/0,6;

- Получены эмпирические зависимости давления насыщенного пара безводного фтористого водорода от температуры в диапазоне от  $T = 140$  К до  $T = 190$  К.

#### **Практическая значимость диссертации и использование полученных результатов.**

Разработанные автором диссертации физико-математические модели могут быть использованы при проектировании теплообменного оборудования, применяемого в химической технологии при разделении газовой смеси методом фракционной разгонки, а полученные экспериментальные данные о давлении насыщенного пара фтористого водорода могут быть использованы при расчетах технологических процессов, протекающих в устройствах, использующих фтористый водород.

Диссертантом предложена и обоснована система охлаждения осадителей холодным воздухом, генерируемым ВХМ-0,54/0,6 вместо жидкого азота. Также автором проведена оценка увеличения «проскока» безводного фтористого водорода в узел защиты вакуумных насосов, применяемых на заводе разделения изотопов АО «СХК». Следует отметить, что предложенная автором система охлаждения осадителей с помощью холодного воздуха может быть применена не только на этом заводе, но и на аналогичных производствах по разделению изотопов урана АО «ТВЭЛ» после предварительного расчетно-теоретического обоснования по методикам, разработанным в диссертации.

Практическая значимость теоретических результатов работы, заключается в том, что разработанная математическая модель и методика численного решения может быть использована для моделирования процессов десублимации различных веществ в осадительных емкостях.

**Достоверность результатов** диссертационной работы Дурновцева М.И. обеспечивается обоснованностью допущений при формулировке математических моделей, использованием проверенных на практике классических методов математического моделирования нестационарных аэродинамических и тепловых процессов, сходимостью вычислительных процессов расчета течения холодного воздуха в трубопроводной сети при уменьшении шагов разностной сетки, выполнением законов сохранения массы и полной энергии в численном решении.

При проведении экспериментальных измерений использовалось аттестованное метрологическими службами измерительное оборудование.

Также достоверность научных разработок автора подтверждается их апробацией на 6 международных и всероссийских научных конференциях, свидетельством на программу для ЭВМ и 3-мя отчетами НИР с заводом разделения изотопов АО «СХК» г. Северск в

рамках выполнения которых и проводились основные исследования диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и изложена на 137 страницах.

**Введение** (14 стр.) посвящено формулировке актуальности темы исследования, цели работы, ее практической значимости, научной новизне, положениям, выносимым на защиту, и содержит краткое изложение содержания диссертации.

**В первой главе** (31 стр.) приведен анализ работы установки очистки технологического потока от фтористого водорода при различных режимах работы. Определены расходы фтористого водорода и неконденсируемых примесей, поступающих в номинальном режиме в емкости, охлаждаемые жидким азотом. Отмечены точки в технологии очистки в которых происходят проскоки технологических потоков, обусловленные пиковыми величинами расходов смеси газов из установок очистки гексафторида урана.

Проведен обзор конструкций десублимационных аппаратов, применяемых для улавливания различных веществ (в том числе гексафторида урана) из газовых смесей. Рассмотрены основные подходы при моделировании процессов тепло- массообмена в десублимационных аппаратах.

**Во второй главе** диссертации (32 стр.) проведены оценки величин массовых секундных потоков смеси газов, величин тепловых потоков на стенки емкости-десублиматора со стороны внешней среды, при остывании и десублимации фтористого водорода из газовой смеси. Проведены термодинамические расчеты времени остывания емкости от начальной температуры при подаче холодного воздуха, определено время тепловой релаксации газовой смеси в емкости.

Для формулировки математической модели десублимации фтористого водорода из газовой смеси автором сформулированы обоснованные допущения и записана система уравнений математической модели десублимации фтористого водорода в присутствии неконденсируемых примесей. Модель наиболее полно учитывает основные процессы конвекции и диффузии фтористого водорода вблизи стенок емкости-десублиматора. Разработан алгоритм и программа для решения системы уравнений математической модели, проведены расчеты процесса десублимации фтористого водорода в емкостях как в случае охлаждения их жидким азотом, так и в случае охлаждения холодным воздухом. Расчеты проводились для одной и двух расположенных последовательно емкостей, для различной степени ассоциации фтористого водорода как в случае номинального, так и в случае повышенного на 30 % расхода газовой смеси. Проведены расчеты комбинированной системы охлаждения, когда первая по направлению течения смеси газов емкость охлаждается холодным воздухом, вторая охлаждается жидким азотом. Последний вариант имеет преимущество в том, что можно реализовать уменьшение расхода жидкого азота минимум в 2 раза при неизменной величине проскока остатков фтористого водорода.

**В третьей главе** (25 стр.) представлены результаты численного моделирования течения холодного воздуха в системе охлаждения емкостей, состоящей из трубопровода и

воздушного теплообменника с использованием одномерной нестационарной модели газовой динамики. С помощью программы ЭВМ, реализующей метод и алгоритм решения системы уравнений математической модели, проведены расчеты процесса остывания одной и двух последовательно расположенных емкостей, снабженных воздушным теплообменником. В работе проведен расчет остывания ёмкости в двух вариантах: остывание ёмкости до рабочей температуры в идеальном режиме, когда нет теплового потока из окружающей среды, и когда есть тепловой поток заданной величины, определенной из оценок, представленных во второй главе.

На основе проведенных расчетов и оценок определены исходные данные на разработку конструкции отсека охлаждения с использованием в качестве холодоносителя воздуха от ВХМ-0,54/0,6-Н.

**Четвёртая глава** диссертационной работы (21 стр.) посвящена обсуждению результатов экспериментальных исследований по измерению давления насыщенного пара безводного фтористого водорода проведенных на лабораторном стенде. В конструкции стенда использовался отсек охлаждения емкости, разработанный в соответствии с исходными данными, сформулированными по результатам расчетов, изложенных в третьей главе диссертации.

Проведена серия экспериментов по измерению давления насыщенных паров безводного фтористого водорода в интервале температуры от  $T = 88$  К до  $T = 197$  К. По результатам обработки экспериментальных данных получено уравнение зависимости давления насыщенных паров безводного фтористого водорода от температуры в интервале  $T = 140 \div 190$  К.

На основе полученной зависимости проведены расчеты, которые показали, что при температуре  $T = 120$  К предельный суточный расход фтористого водорода на выходе из емкости составляет 1,19 мг/сутки, что является допустимой величиной.

**В заключении** (2 стр.) приведены основные результаты и выводы по работе, сформулированные в 6 пунктах, из которых следует, что цель работы, заключавшейся в расчетно-теоретическом обосновании применения воздушной холодильной машины ВХМ-0,54/0,6 на технологическом участке, предназначенном для улавливания паров фтористого водорода из газовых смесей и экспериментальном определении параметров технологического процесса очистки технологического потока от фтористого водорода достигнута.

**Апробация работы** представляется вполне приемлемой, основные результаты, представленные в диссертации, в достаточной степени **опубликованы** в 12 работах: 2-х статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, 6 публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций, 3-х отчетах по НИР.

Диссертация четко структурирована, написана грамотно и изложена доступным для широкого круга специалистов литературным языком. Текст содержит необходимые формулы, понятные графики и рисунки.

В работе даны ссылки на авторов и источники, из которых соискатель заимствовал материалы и отдельные результаты, а при использовании публикаций выполненных с соавторами, отмечал это в диссертации.

Подводя итог рассмотрению содержания диссертации можно считать, что она является законченной научно-квалификационной работой.

**Автореферат** диссертации полностью соответствует ее содержанию и позволяет составить достаточно полное представление о ней, разослан в соответствии с установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» сроками.

По материалам и результатам, представленным в диссертации, имеются **замечания**:

1. В данных, представленных автором о технологии очистки от фтористого водорода имеется большой разброс: некоторые емкости за время 6 суток заполняются десублиматом до 60 кг, другие за 25 суток на 1÷7 кг и меньше. В расчетах десублимации технологического потока был принят массовый поток технологических газов равный величине 1 кг/с. Из анализа технологии следует разброс 0,1÷10 кг/с. Автор не уделил внимания численному анализу изменения потока в этом интервале значений, а ограничился его вариацией на +30% от выбранного номинального значения.

2. При разработке алгоритма и программы получения численного решения системы уравнений при моделировании процесса десублимации фтористого водорода из газовой смеси автор не затронул вопрос исследования сходимости и связанного с ним выбора величины шага по пространству в численной схеме.

3. Автор принимает, что десублимация фтористого водорода происходит на стенках, однако возможно образование капель аэрозоли фтористого водорода вблизи стенок емкости осадителя в потоке газовой смеси. Соискатель не обсуждает вопрос о том, как это влияет на интенсивность десублимации.

4. Модель течения холодного воздуха в трубопроводе и в теплообменниках емкостей-осадителей не учитывает возможный перепад сечения в области стыковки трубопровода и канала теплообменника. В общем случае его нужно учитывать.

5. На рисунках 2.3-2.6, 2.15-2.21 на оси z не обозначена размерность.

6. Для определения размерности теплофизических параметров, таких как коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи, плотность теплового потока в диссертационной работе используется Дж/с вместо общепринятого Вт (стр. 50, 51, 55, 92-94, 97-98).

7. В тексте диссертации имеется много буквенных сокращений, типа ЗРИ, КИУ и др., затрудняющих чтение материала, при этом список обозначений и сокращений отсутствует.

8. Автором диссертации не намечены направления дальнейших исследований, что требуется по ГОСТ Р 7.0.11-2011.

9. Диссертантом не опубликовано ни одной статьи без соавторов.

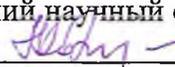
## Заключение

Основываясь на проведенном анализе представленных материалов, можно считать, что диссертация Дурновцева Максима Ивановича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача численного и натурного моделирования теплофизических процессов в новом теплотехническом оборудовании, применяемы в технологии разделения изотопов, соответствует специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника по физико-математическим наукам. Автором диссертации разработаны научно обоснованные решения, которые вносят существенный вклад для развития атомной энергетики и в ускорение научно-технического прогресса.

На основании изложенного считаю, что диссертация Дурновцева М.И. «Математическое и физическое моделирование процессов тепло- и массообмена в устройствах для десублимации фтористого водорода» является законченным научным исследованием и соответствует требованиям пункта 9 положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ, 24.09.2013). Автор диссертации Дурновцев Максим Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### Официальный оппонент:

профессор кафедры теплогазоснабжение  
ФГБОУ «Томский государственный архитектурно-  
строительный университет»,  
доктор физико-математических наук по специальности  
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы,  
старший научный сотрудник

  
\_\_\_\_\_ Козлобродов Александр Николаевич  
дата 19.09.16 г.

Почтовый адрес: 634003, г. Томск, пл. Соляная, д. 2,

ФГБОУТГАСУ

e-mail: [akozlobrodov@mail.ru](mailto:akozlobrodov@mail.ru)

Сайт организации: [www.tsuab.ru/](http://www.tsuab.ru/)

Служебный телефон: +7 (3822) 65-42-81

Подпись А.Н. Козлобродова заверяю:

Проректор по научной работе ТГАСУ

Доктор технических наук



\_\_\_\_\_ Клименов В.А.

