

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

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.

В настоящее время в России проблема конкурентоспособности отечественных производств, особенно в свете экономических проблем, выходит на первый план. Одним из наиболее эффективных путей повышения конкурентоспособности на мировых рынках является снижение себестоимости продукции за счет снижения издержек на различные энергоносители. Государственная корпорация «Росатом» одной из своих стратегических целей ставит снижение себестоимости и времени протекания процессов.

В процессе обогащения изотопов урана газоцентрифужным методом образуется большое количество газовых смесей, состоящих из гексафторида урана, фтористого водорода, компонентов воздуха и других фторидов различных элементов в незначительных количествах. Данные газовые смеси разделяются на компоненты с помощью фракционной разгонки за счет десублимации отдельных компонентов в термостатированных емкостях, охлаждаемых до температуры  $T = 253 \text{ K}$ ,  $T = 193 \text{ K}$ ,  $T = 77 \text{ K}$ . В последней, третьей ступени, происходит десублимация фтористого водорода в присутствии неконденсируемых примесей. Емкости данной ступени охлаждаются жидким азотом.

В настоящее время существует возможность генерации холодного воздуха с температурой около  $100 \text{ K}$ . В этой связи в диссертации М.И. Дурновцева прорабатывается возможность использования холодного воздуха с температурой около  $100 \text{ K}$  для охлаждения емкостей, предназначенных для улавливания фтористого водорода. Изменение способа охлаждения осадительных емкостей с жидкого азота на холодный воздух может принести существенный экономический эффект. В этой связи задача по изменению способа охлаждения осадителей становится **актуальной**.

Целью диссертации Дурновцева М.И. является обоснование применения воздушно-холодильной машины в технологической системе для охлаждения емкостей осадителей, предназначенных для улавливания фтористого водорода из газовых смесей.

В представленной диссертации Дурновцева Максима Ивановича ставятся задачи: разработать физико-математическую модель десублимации фтористого водорода на стенках осадителей в присутствии компонентов воздуха; провести расчетно-теоретический анализ процессов тепло- и массообмена при десублимации фтористого водорода на стенки осадительной емкости; провести измерения давления насыщенного пара фтористого водорода в

диапазоне температуры от  $T = 113 \text{ K}$  до  $T = 197 \text{ K}$  при охлаждении осадительной емкости холодным воздухом, генерируемым ВХМ-0,54/0,6, в опытном отсеке охлаждения.

Во введении диссертации формулируется актуальность темы, цель работы, ее практическая ценность, научная новизна, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведено описание работы технологических установок, применяемых для фракционной разгонки газовой смеси. На основе весовых измерений осадительных емкостей проведен анализ работы установки фракционной разгонки в различных режимах работы. По результатам весового анализа определен режим работы установки с номинальным расходом фтористого водорода и неконденсируемых примесей, поступающих в емкости, охлаждаемые жидким азотом.

На основе литературных источников определены основные подходы при моделировании процессов тепло- массообмена в десублимационных аппаратах. Также приведен обзор конструкций десублимационных аппаратов, применяемых в различных областях промышленности для улавливания различных веществ, в том числе гексафторида урана из газовых смесей на предприятиях разделительно-сублиматного комплекса.

Во **второй главе** диссертации проведены оценки тепловых потоков на стенки охлаждаемой емкости от поступающей в емкость газовой смеси, а также со стороны внешней среды. Проведена оценка теплообмена стенок емкости с воздушным теплообменником и холодным воздухом, проведены оценки времени остывания емкости при подаче холодного воздуха, определено время релаксации газовой смеси в емкости.

Автором сформулирована математическая модель десублимации фтористого водорода в присутствии неконденсируемых примесей. По сформулированной математической модели проведены расчеты процесса десублимации фтористого водорода в емкостях-осадителях. Рассмотрены варианты охлаждения емкостей-осадителей жидким азотом и воздухом. На основе математической модели автором рассчитан процесс десублимации фтористого водорода в емкостях-осадителях для одной и двух расположенных последовательно емкостей. Рассмотрены варианты для различной степени ассоциации фтористого водорода как в случае номинального, так и в случае повышенного на 30 % расхода газовой смеси.

В **третьей главе** приведены результаты численного моделирования движения холодного воздуха в трубопроводах и воздушном теплообменнике системы охлаждения емкостей-осадителей с использованием одномерной нестационарной модели газовой динамики. В работе представлены расчеты остывания ёмкости до рабочей температуры при отсутствии теплового потока из окружающей среды и при тепловом потоке, оценки которого приведены во второй главе диссертации, для одной и двух последовательно установленных емкостей.

На основе проведенных в главе 3 расчетов и оценок автором сформулированы исходные данные на разработку конструкции сосуда охлаждения емкости-осадителя с использованием в качестве холодоносителя воздуха от воздушно-холодильной машины.

В **четвёртой главе** приведено описание конструкции экспериментального стенда для измерения давления насыщенных паров безводного фтористого водорода. В конструкции стенда использовался отсек охлаждения емкости-осадителя, разработанный в соответствии с исходными данными, сформулированными в главе 3 диссертации. Приведена методика проведения эксперимента и методика статистической обработки экспериментальных данных.

Автором представлены результаты экспериментальных работ по измерению давления насыщенного пара безводного фтористого водорода в интервале температуры от  $T = 88$  К до  $T = 218$  К, проведенных на экспериментальном стенде. По результатам экспериментов получено уравнение зависимости давления насыщенных паров безводного фтористого водорода в области температур от  $T = 140$  К до  $T = 190$  К.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

#### **Новизна результатов проведённых исследований.**

В диссертационной работе Дурновцева М.И. получены следующие новые результаты:

1. Разработана физико-математическая модель десублимации безводного фтористого водорода в емкости-осадителе в присутствии неконденсируемых компонентов воздуха.
2. На основе расчетов, приведенных в диссертации, спроектирован и изготовлен стенд для измерения давления насыщенного пара безводного фтористого водорода с применением в качестве хладагента холодного воздуха.
3. Экспериментально получены значения давления насыщенного пара безводного фтористого водорода в диапазоне температуры от  $T = 120$  К до  $T = 197$  К. Получена эмпирическая зависимость давления насыщенного пара безводного фтористого водорода в интервале температуры от  $T = 140$  К до  $T = 198$  К.

#### **Обоснованность и достоверность**

обеспечивается обоснованностью исходных предпосылок и использованием классических методов математического моделирования нестационарных аэродинамических процессов и теплопереноса, а также сходимостью вычислительных методик расчета процессов течения холодного воздуха в трубопроводной сети при уменьшении шагов разностной схемы, выполнимостью законов сохранения массы и полной энергии в численном решении. При проведении измерений использовалось аттестованное метрологическими службами измерительное оборудование.

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

Предложенная и обоснованная автором система охлаждения осадителей холодным воздухом, генерируемым ВХМ-0,54/0,6 вместо жидкого азота может быть применена как на

Заводе разделения изотопов АО «СХК», так и на аналогичных производствах по разделению изотопов урана после предварительного расчетно-теоретического обоснования по методикам, разработанным в диссертации.

Представленные в диссертации физико-математические модели могут быть использованы при проектировании теплообменного оборудования в химической технологии, применяемого для десублимации фтористого водорода. Экспериментальные данные о давлении насыщенного пара фтористого водорода, полученные автором, могут быть использованы при проектировании технологических процессов, где используется фтористый водород.

Теоретическая значимость 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.

Представленные в диссертации результаты исследования хорошо опубликованы в 12 работах, в том числе 2 в статьях журналов, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, 6 публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций, 3 отчетах о НИР, автором получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

**Автореферат** соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

По представленным в диссертации материалам и результатам, имеется ряд замечаний:

1. В п.1.6 диссертации представлен обзор подходов к теоретическому моделированию процессов тепло- и массообмена при десублимации целевого продукта из газовой смеси. Однако этот обзор ограничился лишь рассмотрением подходов, основанных на термодинамическом подходе, нестационарных балансных соотношениях.

2. При оценке потери энергии через теплоизоляцию емкости автор использовал величину коэффициента теплоотдачи как термическое сопротивление теплоизоляции. Однако не учел термическое сопротивление конвективного теплообмена воздуха с внешней поверхностью изолятора.

3. В расчетах десублимации автор проводит параметрический анализ влияния степени ассоциации HF на скорость десублимации. Очевидно, что степень ассоциации фтористого водорода более единицы, однако в тексте диссертации не приводится информация какова степень ассоциации в технологии.


4. Известно, что теплофизические характеристики газов (и фтористого водорода) зависят от температуры. Каким образом эти зависимости учитывались при проведении численного моделирования.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку, научную и практическую значимость диссертационной работы М.И. Дурновцева. Исследования проведены на высоком научном уровне, выводы обоснованы.

Оформление диссертационной работы М.И. Дурновцева в целом отвечает требованиям, установленным ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Диссертация является научно - квалификационной работой, в которой решена задача численного и натурного моделирования теплофизических процессов в технике и эксперименте, расчету и проектированию нового теплотехнического оборудования, применяемого в технологии разделения изотопов, соответствует специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника по физико-математическим наукам. Внедрение разработанных диссертантом научно обоснованных решений вносит существенный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

На основании изложенного считаю, что диссертация Дурновцева Максима Ивановича «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 – Главный научный сотрудник, лаборатория проблем теплопереноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)

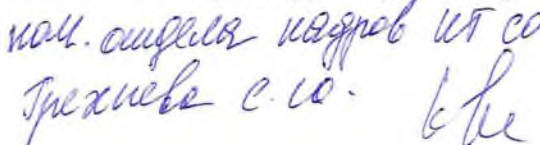
  
Прибатурин Николай Алексеевич  
16.09.16

Служебный адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

e-mail: [aleks@itp.nsc.ru](mailto:aleks@itp.nsc.ru)

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

Подпись Н.А. Прибатурина удостоверяю

  
нач. отдела кадров ИТ СО РАН  
Трехмеев С.С. 6/16

