

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию Худеева Иллариона Игоревича  
«Энерго- и ресурсосбережение в процессе сверхкритической сушки»,  
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты  
химических технологий» (технические науки)

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию производственных технологий и разработке новых материалов с уникальными свойствами. Одним из таких материалов является аэрогель, обладающий большой пористостью, высокой удельной поверхностью и низкой плотностью. Области применения аэрогелей довольно обширны – теплоизоляционные материалы, сорбенты, накопители энергии. Для получения аэрогелей используется сушка в сверхкритических условиях, процесс технологически сложный и энергоемкий, в связи с этим достаточно остро стоит вопрос разработки методов интенсификации процесса.

Данная работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям энерго- и ресурсосбережения, интенсификации процесса сушки аэрогелей в среде сверхкритических флюидов. Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания, что дополнительно подтверждает актуальность темы диссертации.

### **Основное содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 151 наименование. Общий объем составляет 175 страниц печатного текста, включая 25 таблиц и 98 рисунков.

*Во введении* отражена и обоснована актуальность представленной работы, показана ее новизна и практическая значимость. Сформулированы цель и задачи исследования, отмечен личный вклад автора, указаны сведения об апробации работы.

*В первой главе* проведен анализ научно-технической литературы. Рассмотрены основные способы, используемые для получения аэрогелей на основе оксидов металлов, а также области и направления их применения. Приведены основные этапы процесса сверхкритической сушки, рассмотрены установки сверхкритической сушки, используемые на лабораторном и промышленном уровнях, и их технологические схемы. Проведен анализ различных способов интенсификации массообменных процессов, протекающих в среде сверхкритических флюидов. Представлены некоторые режимно-технологические и аппаратно-конструктивные методы интенсификации сверхкритических процессов. Особое внимание уделено оборудованию с использованием ультразвукового воздействия. Рассмотрены методы математического моделирования массообменных процессов, протекающих в среде сверхкритических флюидов. На основании литературного обзора сформулированы задачи диссертационной работы и представлена стратегия решения поставленных задач.

*Во второй главе* представлены экспериментальные исследования процессов получения аэрогелей на основе оксида алюминия. При получении аэрогелей выделены следующие этапы: получение гелей, подготовка к сушке, сверхкритическая сушка. Автором подробно изучен этап получения гелей. В работе была построена фазовая диаграмма трехкомпонентной системы «эпихлоргидрин – этанол – вода», которая образуется при получении гелей. Установлено влияние состава трехкомпонентной системы на процесс гелеобразования и структурные характеристики конечного материала. Полученные аэрогели на основе оксида алюминия обладают развитой поверхностью, большим объемом пор, высокой пористостью и низкой плотностью.

*В третьей главе* рассмотрена интенсификация процесса сверхкритической сушки. Автором предложена общая схема методов интенсификации процесса сверхкритической сушки, которая представляет две области: режимно-технологические и аппаратно-конструктивные методы. К режимно-технологическим методам повышения показателей энерго- и ресурсосбережения относятся: оптимизация режимно-технологических параметров, импульсное изменение параметров процесса, наложение полей, рецикл диоксида углерода, оптимизация с учетом свойств системы «диоксид углерода – изопропанол», совмещение технологических процессов. К аппаратно-конструктивным методам относятся: конструктивная оптимизация гидродинамического режима, оптимизация конструктивных параметров, совмещение аппаратов, использование внешних источников энергии. В главе представлены результаты экспериментальных исследований интенсификации процесса с использованием предложенных методов на установках лабораторного уровня.

На основе анализа проведенных исследований сушки в среде сверхкритического флюида даны рекомендации по интенсификации процесса.

*В четвертой главе* рассматриваются вопросы математического моделирования массообменных процессов, которые протекают в среде сверхкритического флюида, а также оптимизации процесса сверхкритической сушки.

Разработана математическая модель кинетики процесса сверхкритической сушки. Рассматриваются этапы вытеснения растворителя из свободного объема аппарата и диффузионного замещения растворителя в порах геля. В модели кинетики учитывается массоперенос внутри геля, в пограничном слое геля и свободном объеме аппарата. На основе модели была создана программа для расчета кинетики процесса сверхкритической сушки на языке Python, которая позволяет рассчитать влияние различных параметров на процесс сверхкритической сушки. Достоинством работы

является возможность использования математической модели и компьютерной программы для проектирования и исследования процесса сверхкритической сушки различного масштаба.

Автором разработана математическая модель ультразвуковых колебаний в среде сверхкритических флюидов. С помощью разработанной модели рассматривается массоперенос в смеси «диоксид углерода – изопропанол» на этапе набора давления процесса сверхкритической сушки при ультразвуковом воздействии. Ультразвуковое воздействие может быть использовано для интенсификации массопереноса на этапе набора давления процесса сверхкритической сушки.

В работе проведена оценка экономической эффективности процесса сверхкритической сушки. На основании разработанных методов расчета кинетики процесса разработана компьютерная программа для оценки себестоимости аэрогелей. Разработанная программа, экспериментальные и теоретические исследования интенсификации позволили провести оптимизацию процесса сверхкритической сушки на пилотной установке объемом 70 л.

*Заключение* содержит основные результаты диссертационной работы.

### **Научная новизна диссертации**

Исследована трехкомпонентная система «эпихлоргидрин – этанол – вода», которая образуется в ходе получения гелей на основе оксида алюминия. Исследован процесс гелеобразования при получении аэрогелей на основе оксида алюминия. Установлены зависимости свойств аэрогелей от параметров синтеза.

Исследованы следующие методы улучшения характеристик энерго- и ресурсосбережения процесса сверхкритической сушки: оптимизация режимно-технологических параметров, импульсное изменение параметров процесса, наложение ультразвуковых полей, оптимизация процесса с учетом свойств системы «диоксид углерода – изопропанол». Проанализировано

влияние методов интенсификации на следующие этапы процесса сверхкритической сушки: набор давления, вытеснение растворителя из свободного объема аппарата, диффузионное замещение растворителя в порах гелей, что позволило дать рекомендации по интенсификации процесса сверхкритической сушки.

Разработана математическая модель ультразвуковых колебаний в среде сверхкритических флюидов. Математическая модель основана на положениях механики сплошных сред. Она позволяет получить распределение скоростей и концентраций в каждой точке аппарата.

Разработана математическая модель кинетики процесса сверхкритической сушки в одномерной постановке (с радиальной диффузией). Математическое описание применимо для гелей, изготовленных в форме цилиндров. На основании математической модели кинетики разработан метод расчета экономической эффективности процесса сверхкритической сушки.

### **Практическая значимость полученных автором результатов**

Проведен комплекс экспериментальных исследований по получению аэрогелей на основе оксида алюминия. Полученные аэрогели представляют интерес для практического использования в качестве высокотемпературной теплоизоляции и носителей люминофорных материалов.

Проведен комплекс экспериментальных исследований по интенсификации процесса сверхкритической сушки аэрогелей. Полученные результаты интерфиксации могут быть использованы на предприятиях, выпускающих материалы на основе аэрогелей.

Впервые была разработана установка для проведения процесса сверхкритической сушки при ультразвуковом воздействии.

Разработана компьютерная программа для описания кинетики процесса сверхкритической сушки. Данная программа может быть использована для исследования влияния различных параметров на процесс сверхкритической

сушки. На основании программы расчета кинетики была разработана программа для оценки экономической эффективности процесса. Программа была использована для оптимизации процесса сверхкритической сушки на пилотной установке объемом 70 л.

### **Замечания и рекомендации**

1. В главе 1 следовало бы привести современные формулировки понятий «энерго- и ресурсосбережение» и «интенсификация процессов», приведенные в работах Станкевича и Мулейна, Станкевича и Ван Гервена, а также сформулировать количественные критерии (1) энерго- и ресурсосбережения и (2) интенсификации.

2. Сочетание терминов «интенсификация» и «оптимизация» в тексте автореферата и диссертации не вполне удачно выбрано, поскольку интенсификация (в формулировках Рамшоу, Харвей, Станкевича и Мулейна, Ван Гервена) предполагает способы воздействия на систему, а также оборудование для их реализации (похожая формулировка дана и автором на с. 46 диссертации), а оптимизация – поиск наилучших значений параметров. Так, название параграфа 3.3.1 «Интенсификация процесса сверхкритической сушки с применением метода оптимизации режимно-технологических параметров» звучало бы лучше, например, в формулировке «Оптимизация режимно-технологических параметров с целью улучшения характеристик энерго- и ресурсосбережения», что, к тому же, более точно соответствует названию диссертационной работы.

3. Аналогичное замечание касается формулировки «Интенсификация в соответствии с фазовыми диаграммами» (п. 3.4.3). Предлагается вариант «Оптимизация процесса с учетом свойств системы «диоксид углерода – изопропанол».

4. На с. 29 диссертации приведены уравнения движения идеальной несжимаемой жидкости, при этом уравнение (1.2) записано для несжимаемой жидкости, а уравнение (1.3) – для сжимаемой (без учета дивергенции

скорости). То же касается уравнений (1.8) и (1.9). Уравнения (1.3) и (1.9) фактически становятся тождествами. В уравнениях (1.7) и (1.10) для кинематической вязкости и для скорости используется одна и та же буква «ипсилон».

5. В диссертации не представлен список использованных обозначений.

6. П. 3.3.3. При применении ультразвуковых колебаний между аппаратом и излучателем находился слой воды, а внутри аппарата – слой спирта. На рис. 3.12 следовало бы указать толщину слоя воды и оценить толщину слоя спирта, а также рассчитать акустический импеданс системы с целью определения затухания волн на пути к цилиндрам геля.

7. П. 4.1.1: «массоперенос от пограничного слоя геля в свободный объем аппарата учитывается с помощью коэффициента массопередачи». Видимо, имеется в виду коэффициент массоотдачи? Не приведены ссылки на источники уравнений (4.6)-(4.9).

8. С. 126. Для расчета числа Рейнольдса использована « $U_1$  – скорость потока на поверхности гелей». Для неподвижных цилиндров геля эта скорость равна нулю.

9. П. 4.1.3. Использование явной разностной схемы Эйлера для решения параболического уравнения массопереноса (4.1) не имеет серьезных оснований, поскольку данная схема дает существенную ошибку, связанную с различным видом характеристических уравнений для исходного дифференциального уравнения и аппроксимирующей системы уравнений.

10. В работе встречаются опечатки и стилистические неточности. Так, фразу «математическая модель описания кинетики...» следовало бы заменить на «математическая модель кинетики». На с. 15 и далее «акво-» следует заменить на «аква-», на с. 53 – «в следствие», с. 54 «разряжение». Неудачны формулировки «количество гелей», «радиус геля» и т.п., поскольку гель – это название структурированной системы, а не геометрического тела.

## Соответствие диссертации предъявляемым требованиям

Диссертация Худеева И.И. соответствует паспорту специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий» в части областей исследований «фундаментальные разработки в изучении явлений переноса энергии и массы в технологических аппаратах», «методы изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод», «принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов». Соискателем представлено необходимое количество публикаций, содержание которых достаточно полно отражает содержание диссертационной работы, результаты исследований представлены на 10 международных и российских конференциях, оформление диссертации и автореферата выполнено в соответствии с требованиями, изложение диссертации выстроено логично. Содержание автореферата в полной мере отражает содержание диссертации. Диссертация Худеева И.И. соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней в РХТУ им. Д.И. Менделеева и положением о диссертационном совете РХТУ им. Д.И. Менделеева.

## Заключение

Диссертационная работа Худеева Иллариона Игоревича на тему «Энерго- и ресурсосбережение в процессе сверхкритической сушки» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача интенсификации процесса сверхкритической сушки аэрогелей. Автором проведена большая работа, включающая экспериментальные и теоретические исследования. Худеев Илларион Игоревич **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических



наук по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий».

**Официальный оппонент**

заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»,

д.т.н., профессор

*Р. Абиев*

Абиев Руфат Шовкетович

11.01.2022

Адрес: Российская Федерация, 190013,  
г. Санкт-Петербург, Московский  
проспект, д. 26

Телефон: +7 (812) 494-92-76

E-mail: abiev.rufat@gmail.com

Подпись *Абиев Руфат Шовкетович* Удостоверяю  
Начальник отдела кадров



*В. Прохорова*