

**ОТЗЫВ**  
официального оппонента  
на диссертационную работу Лебедева Артема Евгеньевича  
«Моделирование и масштабирование процессов получения аэрогелей и  
функциональных материалов на их основе»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии

**1. Актуальность темы диссертационной работы**

Развитие промышленности Российской Федерации предполагает создание новых функциональных материалов, разработку технологий их получения. Аэрогели и материалы на их основе перспективны для применения в разнообразных областях деятельности человека. В первую очередь это связано с особенностями свойствами данного материала – низкая плотность, развитая внутренняя структура, высокая удельная поверхность. Аэрогели можно использовать как изоляционные материалы, а также как основу для лекарственных и биологически активных композиций.

Основной этап получения аэрогелей – сверхкритическая сушка. Данный процесс требует использования дорогостоящего оборудования высокого давления, он является сложным и имеет значительное количество входных параметров. Свойства систем в сверхкритическом состоянии существенным образом зависят от термодинамических условий – температуры и давления. Подбор наиболее точных уравнений для расчета свойств таких систем, выбор значимых входных параметров, и скорость лимитирующих процессов – это задачи, которые необходимо решить для точного описания процесса. Наиболее эффективный способ их решения – использование надежных экспериментальных методов и методов математического моделирования. Применение математических моделей, а также современных методов расчета вычислительной гидродинамики и

тепломассообмена, позволяет всесторонне рассмотреть процесс любой сложности, определить его эффективность, провести оптимизацию.

Таким образом, тема диссертационной работы Лебедева Артема Евгеньевича, посвященная получению аэрогелей и функциональных материалов на их основе, моделированию процессов их получения, и масштабированию процесса сверхкритической сушки, является актуальной.

Целью диссертационной работы, сформулированной автором, является экспериментальное исследование, моделирование и масштабирование процессов получения аэрогелей и композитов на их основе.

Для достижения поставленной цели автором были проведены экспериментальные и аналитические исследования, включающие в себя изучение процесса получения аэрогелей различной природы, экспериментальные исследования кинетики сверхкритической сушки и адсорбции, получение новых функциональных материалов на основе аэрогелей для их применения в фармацевтике. Автором предложено математическое описание массообменных процессов в среде сверхкритического флюида с применением положений гидродинамики и массообмена, для чего предварительно проведены теоретические исследования свойств систем в сверхкритическом состоянии. Адекватность математических моделей процессов сверхкритической сушки и адсорбции подтверждена сравнением с результатами собственных экспериментов. В работе проведено важное для практики масштабирование процесса сверхкритической сушки, предложен критерий эффективности процесса сверхкритической сушки.

## **2. Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивалась логичным выбором направлений работы в рамках поставленной цели. Экспериментальное исследование процессов получения аэрогелей и функциональных материалов на их основе позволило определить кинетику сверхкритической сушки и адсорбции, которые необходимы для

расчета коэффициентов математических моделей и проверки их адекватности. Исследование биодоступности активных лекарственных веществ в составе композиции на основе аэрогеля наглядно продемонстрировало преимущества аэрогеля при его использовании как носителя активных веществ. Для изучения свойств полученных аэрогелей и материалов на их основе использовались следующие современные аналитические методы: сканирующая электронная микроскопия, азотная порометрия, высокоэффективная жидкостная хроматография.

Математические модели, предложенные автором, были проверены на адекватность. Программное обеспечение, использованное для расчетов уравнений моделей, является широко известным и часто применяется при решении проблем гидро- и газодинамики, тепло- и массопереноса. Результаты расчетов представлены в виде профилей изменения концентрации компонентов в условиях сложной гидродинамической обстановки в рамках нескольких видов геометрии вычислительной области. Для количественной оценки результатов построены расчетные кривые кинетики процессов. Все данные наглядно отражают ход исследуемых процессов и согласуются с экспериментальными данными.

В ходе масштабирования автором предложен критерий эффективности процесса сверхкритической сушки, а также определены параметры ведения процесса, которые соответствуют максимуму эффективности. Выбор параметров, оказывающих влияние на эффективность процесса, представляется обоснованным и логичным.

По результатам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ к публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

### **3. Научная новизна**

Экспериментально исследована кинетика процесса сверхкритической адсорбции при различных температуре и давлении; получены

функциональные материалы на основе аэрогеля – новые лекарственные композиции.

В работе приводится теоретическое изучение систем в сверхкритическом состоянии, показаны особенности таких систем, которые влияют на ход процессов, проводимых под высоким давлением.

Математические модели процессов сверхкритической сушки и сверхкритической адсорбции, предложенные в работе, позволяют определять гидродинамическую обстановку, рассчитывать явления тепло- и массопереноса в среде сверхкритического флюида. Результатами каждого расчета уравнений моделей являются: поля физико-химических свойств, скорости движения среды, давления, состава. Использование подобных математических моделей дает возможность учесть особенности геометрии реактора, локальные изменения свойств изучаемой системы, наличие застойных зон и байпасирования, что упрощает оптимизацию и масштабирование.

#### **4. Практическая значимость**

В работе проведены экспериментальные исследования получения аэрогелей на основе диоксида кремния, крахмала и альгината. В рамках работы создана экспериментальная установка высокого давления для проведения процесса сверхкритической адсорбции. На основе аэрогелей с использованием созданной установки был получен ряд композиций «аэрогель – активное вещество». Была исследована биодоступность активных веществ в составе композиций. Путем сравнения этих данных с биодоступностью чистых активных веществ подтверждена эффективность аэрогеля как носителя активных лекарственных веществ.

По разработанным математическим моделям проведен вычислительный эксперимент. Результаты лабораторных экспериментов были использованы для проверки адекватности моделей. Также результаты позволили оценить эффективность процесса и влияние на нее таких

параметров как величина входного потока сверхкритического диоксида углерода, загрузка реактора, форма гелей и их расположение.

## **5. Общая характеристика работы**

Поставленная цель и задачи диссертационной работы решены полностью. Выполнен и представлен необходимый объем экспериментальных исследований, создана экспериментальная установка собственной конструкции.

Теоретические исследования и предложенные математические модели позволяют изучать и рассчитывать разнообразные системы в сверхкритическом состоянии. Актуально их применение при проектировании новых реакторов высокого давления, как лабораторного, так и промышленного масштаба. Промышленное оборудование высокого давления является металлоемким и дорогостоящим, поэтому стоимость расчета множества вариантов конструкции значительно меньше стоимости создания пилотных установок.

Научная новизна, практическая значимость и выводы являются результатами анализа экспериментальных данных, теоретических исследований, результатов расчета уравнений моделей, обобщения результатов с помощью предложенного критерия эффективности.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание, выводы, научную новизну и практическую значимость.

## **6. Замечания**

По работе имеется ряд замечаний:

1) Цель диссертации сформулирована недостаточно корректно, а по своей сути скорее отражает решаемые автором задачи. Целью, как следует из содержания диссертации, по-видимому, являлась разработка научных основ получения аэрогелей различной природы и функциональных материалов на их основе с использованием сверхкритических флюидов.

2) В некоторых формулах, большей частью позаимствованных из других работ, встречаются опечатки, к счастью, не повлиявшие на

результаты работы: в формуле (1.1) для капиллярного давления утрачен коэффициент «2»; в формуле (3.9), по-видимому, давление в знаменателе должно быть в 4 степени, в формуле (3.13) минус перед потенциальной энергией указан ошибочно; в формуле (3.27) в правой части следует поставить знак «набла».

3) В работе было бы уместно привести отдельный раздел со списком обозначений, поскольку не все формулы сопровождаются расшифровкой. Кроме того, в списке литературы диссертации по недосмотру не указано ни одной работы автора, хотя в автореферате они приведены.

4) Корректная фраза на с. 28 «коэффициент диффузии веществ в СКФ по величине на 1–2 порядка превосходит аналогичный показатель для жидкостей» не соответствует данным, приведенным в таблице 1.1 на с. 27, где эти коэффициенты имеют один порядок величины.

5) На с. 48 (при описании процесса получения сферических микрочастиц аэрогелей) следовало бы указать геометрию мешалки, ее размеры, частоту вращения.

6) Рисунки 2.4-2.13 следовало бы предварить словесной и математической формулировками понятия «Загрузка», использованным автором в необычном смысле.

7) При определении биодоступности (с. 66) следовало бы указать методы расчета интегралов по экспериментальным кривым и точность результатов.

8) При построении математической модели сверхкритической сушки (уравнения (3.1)–(3.6)) перенос через поверхность образцов аэрогеля диоксида углерода и спирта учтен дважды: посредством источников/стоков  $J_1$ ,  $J_2$  и в граничных условиях (второй способ более корректный). То же относится и к модели сверхкритической адсорбции (3.16)–(3.22).

9) Данные, приведенные в табл. 5.1, на первый взгляд противоречат графику на рис. 5.5: с ростом толщины гелей общее время сушки сокращается. В действительности этот эффект связан с увеличением числа

циклов N для наработки определенной массы продукта, о чем следовало бы явно указать в диссертации.

10) В работе встречаются опечатки, неточные формулировки и мелкие погрешности оформления (с. 13, 39, 46, 48, 53, 69, 71, 73, 75, 76, 84, 92, 101, 103, 121), однако их характер не носит драматический характер, а количество не столь велико. Рис. 2.1 на с. 50 приведен в слишком мелком масштабе, на рис. 2.17 пропущен п. «д». На с. 92 ссылка на несуществующий раздел 4.3.3.

Следует заметить, что сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинств научно-квалификационной работы.

## 7. Заключение

Диссертационная работа Лебедева Артема Евгеньевича «Моделирование и масштабирование процессов получения аэрогелей и функциональных материалов на их основе» изложена грамотным техническим языком, является научно-квалификационной работой, в которой предложены новые функциональные материалы на основе аэрогелей, новые математические модели, основанные на положениях механики сплошных сред, которые позволяют с высокой точностью рассчитывать локальные изменения параметров изучаемой системы, скорости ее движения, состава. Предложенные модели перспективны для оптимизации существующих реакторов высокого давления и разработки новых. Применение данных моделей позволит упростить масштабный переход и создание реакторов высокой производительности.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, количество публикаций соответствует критериям п. 13 Положения (см. раздел 2 отзыва).

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки) по пунктам области исследования: «... исследования массообменных процессов...», «... создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов...», «Теория подобия и масштабирования химико-

технологических процессов и аппаратов...», и отвечает требованиям п. 9 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, как научно-квалификационная работа, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические исследования эффективных процессов в среде сверхкритических флюидов и разработано оборудование для производства арогелей и функциональных материалов на их основе, имеющие существенное значение для развития страны, а ее автор, Лебедев Артем Евгеньевич, 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 Санкт-Петербургского  
государственного технологического  
института (технического университета),  
доктор технических наук  
по специальности 05.17.08,  
профессор

25

Абиев Руфат Шовкетович

25.8.2015

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)»  
Кафедра оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры

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

Телефон: +7 (812) 494-92-76

E-mail: rufat.abiev@gmail.com

