

ПРОТОКОЛ

совместного заседания кафедры химического и фармацевтического инжиниринга
и кафедры кибернетики химико-технологических процессов федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Российский химико-технологический университет имени
Д. И. Менделеева» (РХТУ им. Д. И. Менделеева)

от «12» ноября 2021 г. № 1

Присутствовали:

Сотрудники кафедры химического и фармацевтического инжиниринга:

д.т.н., проф., заведующий кафедрой, Меньшутина Н. В.;
к.т.н., с.н.с., старший преподаватель, Лебедев А. Е.;
к.т.н., с.н.с., старший преподаватель, Ловская Д. Д.;
к.т.н., н.с., старший преподаватель, Цыганков П. Ю.;
к.т.н., н.с., старший преподаватель, Лебедев И. В.;
ассистент, Кислинская А. Ю.;
заведующий лабораторией, Суслова Е. Н.;
ведущий инженер, Артемьев А. И.;
старший лаборант, Абрамов А. А.;
старший лаборант, Мохова Е. К.;
инженер, Мочалова М. С.

Сотрудники кафедры кибернетики химико-технологических процессов:

д.т.н., проф., заведующий кафедрой, Глебов М. Б.;
д.т.н., проф. Дорохов И. Н.;
д.т.н., проф. Егоров А. Ф.;
д.т.н., проф. Писаренко Е. В.;
д.т.н., проф. Гордиенко М. Г.;
к.т.н., доц. Гусева Е. В.;
к.т.н., доц. Михайлова П. Г.;
к.т.н., доц. Сбоева Ю. В.;
асс. Сверчков А. М.;
доц. Дудоров А. А.

Всего присутствовало: 21 человек.

ПОВЕСТКА ДНЯ

Предварительное рассмотрение диссертационной работы Худеева
Иллариона Игоревича, м.н.с., ассистента кафедры химического и



«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева,
доктор технических наук

Воротынцев

» ноябрь 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Энерго- и ресурсосбережение в процессе сверхкритической сушки» по научной специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий выполнена на кафедре химического и фармацевтического инжиниринга и кафедре кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» (РХТУ им. Д. И. Менделеева).

В процессе подготовки диссертации Худеев Илларион Игоревич, «23» февраля 1995 года рождения, был аспирантом кафедры кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 01.09.2018 г. по 12.08.2021 г., аспирантом кафедры химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 12.08.2021 г. В настоящее время работает в РХТУ им. Д. И. Менделеева на должности младшего научного сотрудника и ассистента кафедры химического и фармацевтического инжиниринга.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов (справка об обучении (сроках обучения)) выдано РХТУ им. Д. И. Менделеева в 2021 году.

Научный руководитель – д.т.н. по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий, профессор, заведующий кафедрой химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Меньшутин Н.В.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Энерго- и ресурсосбережение в процессе сверхкритической сушки» принято следующее заключение.

Диссертационная работа Худеева И. И. посвящена актуальной теме развития и совершенствования сверхкритических технологий. В соответствии с указом президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» одним из важнейших целевых показателей ВВП является рост производства продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей экономики. К таким материалам можно отнести аэрогель – высокопористый твердый материал, обладающий развитой площадью удельной

поверхности и низкой плотностью. Аэрогели находят широкое применение в различных областях, их можно использовать в качестве материалов для звуко- и теплоизоляции, накопителей энергии, чувствительных материалов в газовых датчиках, сорбентов газов, сорбентов для ликвидации разливов нефти. Данный материал получают в некоторых странах в промышленном масштабе в качестве высокоэффективного теплоизоляционного материала. Следует отметить, подобное производство существует на территории Российской Федерации. Сотрудники РХТУ им. Д. И. Менделеева занимались разработкой технологии производства теплоизоляционного материала на основе аэрогеля и передали технологию компании ООО «Ниагара», которая выпускает данный продукт. Для получения аэрогелей необходимо проведение процесса сверхкритической сушки. Данный процесс является технологически сложным, наукоемким, энерго- и ресурсозатратным. Одной из наиболее важных задач является интенсификация процесса сверхкритической сушки с целью сокращения как капитальных, так и эксплуатационных расходов при производстве аэрогелей.

Научная новизна заключается в следующем:

Исследована трехкомпонентная система «эпихлоргидрин – этанол – вода», которая образуется в ходе получения гелей на основе оксида алюминия, при температуре 298 К и атмосферном давлении. Исследован процесс гелеобразования при получении аэрогелей на основе оксида алюминия и предложены механизмы их структурообразования. Проведено всестороннее исследование физико-химических свойств полученных аэрогелей. Установлены закономерности, влияющие на свойства гелей и аэрогелей на основе оксида алюминия.

Исследованы следующие методы интенсификации процесса сверхкритической сушки: оптимизация режимно-технологических параметров (расход диоксида углерода, температура, давление), импульсное изменение параметров процесса (давление), наложение полей (ультразвуковые колебания), интенсификация в соответствии с фазовыми диаграммами. 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 описания кинетики процесса сверхкритической сушки. В модели рассматривается массоперенос внутри геля, в пограничном слое геля и свободном объеме аппарата. Математическое описание применимо для гелей различных типов в форме цилиндров, сфер и плоскопараллельных тел.

Разработана математическая модель для описания гидродинамики, процессов тепло- и массопереноса в среде сверхкритических флюидов при ультразвуковом воздействии. Математическая модель основана на положениях механики сплошных сред. Она позволяет получить эпюры скоростей, распределения концентраций в каждой точке аппарата.

Разработан метод расчета экономической эффективности процесса сверхкритической сушки, который включает математическую модель описания кинетики процесса сверхкритической сушки.

Практическая значимость работы:

Проведен комплекс экспериментальных исследований по получению аэрогелей на основе оксида алюминия. Структурные характеристики аэрогелей могут быть изменены в зависимости от параметров синтеза, что дает возможность применять данный материал в различных приложениях.

Проведен комплекс экспериментальных исследований по интенсификации процесса сверхкритической сушки аэрогелей на установках объемом 22 и 250 мл. Полученные результаты могут быть использованы для установок сверхкритической сушки различного масштаба.

Разработана установка для проведения процесса сверхкритической сушки при ультразвуковом воздействии, что было осуществлено впервые для сушки аэрогелей.

Разработана компьютерная программа для описания кинетики процесса сверхкритической сушки. Данная программа может быть использована для исследования влияния как характеристик высушиваемого материала, так и параметров процесса на процесс сверхкритической сушки.

Разработана компьютерная программа для оценки экономической эффективности процесса. Компьютерная программа была использована для оптимизации процесса сверхкритической сушки на пилотной установке объемом 70 л.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2020-232/3 (FSSM-2020-0003).

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 27 печатных работах, из них 9 в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Получен 1 патент.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на IX, X, XI Научно-практических конференциях с международным участием «Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации» (Сочи, 2017 г; Ростов-на-Дону, 2019 г; Новосибирск, 2021 г); Международном онлайн семинаре Aerogels (Гамбург, Германия, 2020 г); XX Международной золь-гель конференции (Санкт-Петербург, 2019 г); 21 Конференции по совмещению процессов, моделированию и оптимизации для энергосбережения и сокращения загрязнений PRES (Прага, Чехия 2018 г); IX, XI Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2015 г, 2017 г); Международной конференции со школой и мастер-классами для молодых ученых «Химическая технология функциональных наноматериалов» (Москва, 2017 г), VII Всероссийской школе-конференции молодых учёных «Сверхкритические флюидные технологии в решении экологических проблем: создание перспективных материалов»

(Архангельск, 2016 г). Работа является победителем программы Молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (2019-2021 гг).

Публикации по теме диссертации:

1. Intensification methods of supercritical drying for aerogels production / N. V. Menshutina, P. Y. Tsygankov, I. I. Khudeev, A. E. Lebedev // Drying Technology. – 2020. – P. 1–14. **(Q1, Web of Science, Scopus).**
2. Investigation of alumina aerogel structural characteristics at different «precursor-water-ethanol» ratio / A. E. Lebedev, N. V. Menshutina, I. I. Khudeev, R. A. Kamyshinsky // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 553. – 120475. **(Q1, Web of Science, Scopus).**
3. Menshutina N. V. The Effect of the Water–Precursor Ratio on the Structural Characteristics of Alumina Aerogels / N. V. Menshutina, A. E. Lebedev, I. I. Khudeev // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 14. – P. 1229–1235. **(Q4, Web of Science, Scopus).**
4. Lab Scale High-Pressure Equipment for Supercritical Drying / P. Y. Tsygankov, I. I. Khudeev, A. E. Lebedev [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – P. 877–882. **(Q3, Scopus).**
5. Synthesis and characterization of composite materials «aerogel-MWCNT» / N. V. Menshutina, S. I. Ivanov, P. Y. Tsygankov, I. I. Khudeev // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2017. – Vol. 84, № 3. – P. 382–390. **(Q2, Web of Science, Scopus).**
6. Application of supercritical extraction for isolation of chemical compounds / N. V. Menshutina, I. V. Kazeev, A. I. Artemiev [et al.] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. – 2021. – Vol. 64, №. 6. – P. 4–19. **(Q3, Web of Science, Scopus).**
7. Silica-Resorcinol-Formaldehyde Aerogels Nanostructure Modelling / I. V. Lebedev, I. I. Khudeev, A. V. Kolnoochenko [et al.] // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – P. 1765–1770. **(Q3, Scopus).**
8. Supercritical drying process modeling and equipment design / N. V. Menshutina, A. E. Lebedev, I. I. Khudeev, D. D. Lovskaya // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2017. – Vol. 17. – P. 337–344. **(Scopus).**
9. Creation of new functional materials: «Aerogel-CNTs» for the use as supercapacitors / P. Y. Tsygankov, I. I. Khudeev, A. Y. Tyrtysnikov [et al.] // 22nd International Congress of Chemical and Process Engineering and 19th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction. – 2016. – Vol. 1. – P. 709. **(Scopus).**
10. Исследование кинетики фазовых переходов многокомпонентных систем в субкритическом состоянии / Е. Н. Суслова, А. Е. Лебедев, Д. Д. Ловская, И. И. Худеев // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33, № 11. – С. 86–88.

11. Интенсификация процесса сверхкритической сушки / И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, О. А. Смирнова, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 11. – С. 90–93.
12. Влияние условий получения на структурные характеристики кремниевого аэрогеля / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, А. А. Уварова [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 6. – С. 121–123.
13. Исследование электрических свойств композиционного материала «Аэрогель на основе SiO₂-многослойные углеродные нанотрубки» / И. И. Худеев, П. Ю. Цыганков, О. А. Смирнова [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 6. – С. 118–120.
14. Создание функционального материала «диоксид кремния-углеродные нанотрубки» / С. И. Иванов, П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29, № 4. – С. 83–85.
15. Получение гидрофобных аэрогелей / С. И. Иванов, П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Т. 29, № 4. – С. 112–114.
16. Структура и свойства аэрогелей с внедрёнными УНТ / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации. – 2019. – С. 249–250.
17. Совмещение и интенсификация процессов под высоким давлением при получении аэрогелей / И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, Е. Н. Суслова [и др.] // Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации. – 2019. – С. 246–247.
18. Процесс получения аэрогелей на основе биополимеров с использованием замены растворителя под давлением / А. Е. Лебедев, Е. Н. Суслова, И. И. Худеев, Д. Д. Ловская // Биотехнология: состояние и перспективы развития. – 2019. – С. 273–274.
19. Khudeev I. I. Synthesis of high porosity alumina aerogels / I. I. Khudeev, A. E. Lebedev, N. V. Menshutina // Conference proceedings of the Second International Youth Summer School «Aerogels: from laboratory to industry». – 2019. – P. 28–29.
20. Modeling and intensification of aerogel particles production processes / I. I. Khudeev, D. D. Lovskaya, A. E. Lebedev, N. V. Menshutina // Book of Abstracts of the XX International Sol-Gel Conference. – 2019. – P. 107.
21. Menshutina N. V. Modeling and scale up of supercritical drying process / N. V. Menshutina, A. E. Lebedev, I. I. Khudeev // International Society for the Advancement of Supercritical Fluids. (I.S.A.S.F.) 4th International seminar on aerogels. – 2018. – P. 75.
22. Кремниевый аэрогель с внедрёнными МУНТ как материал для газовых датчиков / И. И. Худеев, П. Ю. Цыганков, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // Сборник материалов международной конференции «Химическая технология функциональных наноматериалов». – 2017. – С. 281–283.

23. Исследование процесса получения аэрогелей на основе оксидов металлов / О. А. Смирнова, И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, Н. В. Меньшутина // Сборник материалов международной конференции «Химическая технология функциональных наноматериалов». – 2017. – С. 251–252.

24. Композит «Аэрогель на основе SiO_2 -УНТ» как датчик для детектирования отравляющих газов / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации. – 2017. – С. 235–238.

25. Использование композита аэрогель на основе SiO_2 – УНТ в качестве материала для газовых датчиков / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // VII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Сверхкритические флюидные технологии в решении экологических проблем: создание перспективных материалов». – 2016. – С. 32–35.

26. Изучение адсорбции газов на композиционном материале: «Аэрогель на основе альгината кальция – многослойные углеродные нанотрубки» / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // Сборник материалов Российско-Швейцарского семинара «От фундаментальных исследований к коммерциализации научных идей». – 2016. – С. 13–14.

27. Внедрение углеродных нанотрубок в неорганические аэрогели разными способами / П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, С. И. Иванов, Н. В. Меньшутина // Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации. – 2015. – С. 93–95.

28. Пат. 2725031 Российская Федерация, МПК G01N 27/12. Нанопористый материал для чувствительных элементов газовых датчиков и способ его получения / Н. В. Меньшутина, П. Ю. Цыганков, И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, С. И. Иванов; заявл. 23.07.2019; опубл. 29.06.2020.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям **диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий в части:**

Фундаментальные разработки в изучении явлений переноса энергии и массы в технологических аппаратах.

Способы, приемы и методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, исследование тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов.

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.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Худеева И. И. является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Худееву И. И.; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Энерго- и ресурсосбережение в процессе сверхкритической сушки» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Диссертация рассмотрена на совместном заседании кафедры химического и фармацевтического инжиниринга и кафедры кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» состоявшемся «12» ноября 2021 года, протокол № 1.

В обсуждении приняли участие: д.т.н., проф., заведующий кафедрой ХФИ, Меньшутин Н. В., к.т.н., с.н.с., старший преподаватель кафедры ХФИ, Лебедев А. Е., к.т.н., с.н.с., старший преподаватель кафедры ХФИ, Ловская Д. Д., к.т.н., н.с., старший преподаватель кафедры ХФИ, Цыганков П. Ю., к.т.н., н.с., старший преподаватель кафедры ХФИ, Лебедев И. В., д.т.н., проф., заведующий кафедрой КХТП, Глебов М. Б., д.т.н., проф. кафедры КХТП, Дорохов И. Н., д.т.н., проф. кафедры КХТП, Егоров А. Ф., д.т.н., проф. кафедры КХТП, Писаренко Е. В., д.т.н., доц. кафедры КХТП, Гордиенко М. Г., к.т.н., доц. кафедры КХТП, Гусева Е. В., к.т.н., доц. кафедры КХТП, Михайлова П. Г., к.т.н., доц. кафедры КХТП, Сбоева Ю. В., асс. кафедры КХТП, Сверчков А. М., доц. кафедры КХТП, Дудоров А. А.

Принимало участие в голосовании 15 человек. Результаты голосования: «За» - 15 человек, «Против» - 0 человек, воздержались - 0 человек, протокол № 1 от «12» ноября 2021 г.

Председатель заседания
заведующий кафедрой КХТП,
д.т.н., профессор



М. Б. Глебов

Секретарь заседания
к.т.н., старший преподаватель кафедры ХФИ



П. Ю. Цыганков