

«УТВЕРЖДАЮ»



И. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева,  
д.т.н., проф. И. В. Воротынцев

» \_\_\_\_\_ 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Процессы получения аэрогелей с люминофорами в сверхкритических условиях и их интенсификация» по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнена на кафедре химического и фармацевтического инжиниринга и на кафедре кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Сулова Екатерина Николаевна, «19» октября 1996 года рождения, была аспирантом кафедры кибернетики химико-технологических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 01.09.2020 г. по 12.08.2021 г. Является 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. Работает в РХТУ имени Д. И. Менделеева с 2018 года, в настоящее время – на должности заведующего лабораторией кафедры химического и фармацевтического инжиниринга.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в РХТУ им. Д. И. Менделеева в 2022 году.

Научный руководитель – Меньшутина Наталья Васильевна, 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».

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Процессы получения аэрогелей с люминофорами в сверхкритических условиях и их интенсификация» принято следующее заключение.

Диссертационная работа Суловой Екатерины Николаевны посвящена процессам получения аэрогелей с люминофорами и их интенсификации. Согласно постановлению правительства Российской Федерации об утверждении

государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», разработка технологий получения новых гибридных и функциональных наноматериалов являются приоритетными направлениями развития мировой научно-технологической и инновационной сферы. К таким материалам можно отнести аэрогели с люминофорами.

Люминофоры – это соединения, способные поглощать энергию и преобразовывать ее в световое излучение. Благодаря этому данные соединения применяются при производстве энергосберегающих источников света, панелей OLED-дисплеев, биосенсоров и маркеров для диагностики различных заболеваний. Но главной проблемой использования люминофоров является их деградация в среде воздуха при длительном хранении, использовании и транспортировке. Одним из способов сохранения качества и чистоты люминофоров является их помещение в высокопористые матрицы-носители. В данной работе предлагается использовать в качестве матриц-носителей аэрогели, так как они обладают развитой внутренней поверхностью и низкой плотностью, сопоставимой с плотностью воздуха. Создание на основе аэрогелей новых люминофорных материалов с функциональными оптическими свойствами существенно расширит традиционный список гибридных материалов. В таком случае, неорганические аэрогели с люминофорами могут быть использованы в оптоэлектронике, фотонике и оптическом приборостроении как отдельный элемент конструкции. Кроме того, на основе органических аэрогелей с люминофорами могут быть произведены биосовместимые и нетоксичные для человека материалы медицинского назначения.

Процессы получения аэрогелей с люминофорами являются сложными и многоэтапными, занимающие значительное время. Среди всех этапов получения указанного материала можно выделить процессы гелеобразования, замены растворителя и сверхкритической сушки. Их фундаментальное изучение позволит углубить понимание массообменных процессов, предложить новые, более эффективные, способы их проведения, провести их интенсификацию и оптимизацию.

**Научная новизна заключается в следующем:**

1. Впервые были проведен синтез люминофорного соединения в объеме аэрогелевой матрицы с применением сверхкритических технологий. При проведении комплекса экспериментальных исследований процессов получения аэрогелей с люминофорами различной природы оценены факторы, влияющие на физико-химические, структурные и люминесцентные свойства.

2. Экспериментально исследована кинетика фазовых переходов в двух- и трехкомпонентных системах под давлением. Изучено влияние высокопористого геля на скорость массообменных процессов.

3. Проведены экспериментальные исследования процесса гелеобразования и замены растворителя в гелях под давлением. Изучено влияние фазового равновесия системы на ход процесса замены растворителя под давлением при получении аэрогелей.

4. Исследована возможность интенсификации процессов получения аэрогелей с люминофорами за счет проведения этапов гелеобразования, замены растворителя и сверхкритической сушки в одном аппарате.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработаны процессы получения аэрогелей различной природы с люминофорами тремя способами: внедрение люминофора на этапе замены растворителя, синтез люминофора на этапе сверхкритической сушки и с применением сверхкритической адсорбции.

2. Получены органические аэрогели с люминофорами, которые могут быть использованы в качестве медицинских изделий для диагностики и терапии социально значимых заболеваний.

3. Установлено влияние параметров проведения процесса на коэффициенты массопередачи. Полученные данные позволяют сократить время и ресурсы, необходимые для проведения массообменных процессов, протекающих при получении аэрогелей различной природы с люминофорами.

Диссертационная работа выполнялась в рамках соглашения № 075-15-2020-792 (уникальный идентификатор: RF-190220X0031) в рамках государственного задания вузу по теме «Нанобиотехнологии в диагностике и терапии социально значимых заболеваний».

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

Основные положения диссертации получили полное отражение в 19 печатных работах, из них 3 в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus. Получен 1 патент.

Основные результаты диссертационной работы были продемонстрированы на XV, XVI и XVII Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2019 г, 2020 г, 2021 г); X и XI Научно-практической конференции с международным участием "Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации" (Ростов-на-Дону, 2019 г; Новосибирск, 2021 г); Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Фундаментальные науки – специалисту нового времени» (Иваново, 2021 г); 2-ой Европейской конференции по кремнию и материалам на основе кремния EC-SILICONF2 (Мишкольц-Лиллафюред, Венгрия, 2021 г); Международной молодежной летней школе «Аэрогели: от лаборатории к промышленности» (Москва, 2019 г); X Национальной научно-практической конференции с международным участием "Моделирование энергоинформационных процессов" (Воронеж, 2021 г); Конгрессе «Биотехнология: состояние и перспективы развития 2019» (Москва, 2019 г); работа является победителем Всероссийского инженерного конкурса в 2021/2022 году.

**Публикации по теме диссертации:**

1. Investigation of Aerogel Production Processes: Solvent Exchange under High Pressure Combined with Supercritical Drying in One Apparatus / A. Lebedev, E. Suslova, A. Troyankin, D. Lovskaya // GELS. – 2021. – Vol. 7, № 1. P.4. (Q1, Web of Science, Scopus).

2. New efficient lighting device. part 1. hybrid materials based on inorganic aerogel and metal-organic phosphor / A. Lebedev, E. Suslova, K. Runina, A. Khomyakov, M. Zykova, O. Petrova, R. Avetisov, D. Shepel, A. Astafiev, N. Menshutina, I. Avetissov // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2021. – no. 302. – P. 122358. (Q1, Web of Science, Scopus).

3. Люминесцентные аэрогели на основе диоксида кремния и координационного соединения бора с 8-оксихинолином / Е.Н. Сусллова, К.В. Казьмина, К.И. Рунина, Д.А. Кунаев, А.Е. Лебедев, О.Б. Петрова, Н.В. Меньшутина, И.Х. Аветисов // *Стекло и керамика*. – 2022. – Т. 95, № 5. – С. 45–52. (Q3, Web of Science).

4. Разработка подхода для теоретического расчета кинетики фазовых переходов системы изопропиловый спирт – диоксид углерода / Сусллова Е. Н., Лебедев А. Е., Меньшутина Н. В. // *Моделирование энергоинформационных процессов X национальная Научно-практическая конференция с международным участием*. – Воронеж: Воронеж, 2022. – С. 181–190.

5. Hybrid materials based on inorganic aerogel and organic luminophor / A. Lebedev, E. Suslova, K. Runina et al. // *Book of Abstracts 2nd European Conference on Silicon and Silica Based Materials 6th International Conference on Competitive Materials and Technology Processes Miskolc-Lillafüred, Hungary October 4-8, 2021* Edited by: Prof. Dr. László A. GÖMZE. – Igrex Ltd. Igrici, Hungary, 2021. – P. 39.

6. Исследование влияния параметров золь-гель процесса на структурные свойства аэрогелей / Сусллова Е. Н., Цыганков П. Ю., Лебедев А. Е. // *Всероссийская школа-конференция молодых ученых Фундаментальные науки – специалисту нового времени*. – Ивановский государственный химико-технологический университет, 2021. – С. 302–303.

7. Изучение люминесцентных материалов на основе неорганических аэрогелей / А. Е. Лебедев, Е. Н. Сусллова, Н. В. Меньшутина и др. // *XI Научно-практическая конференция с международным участием Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации*. – 2021. – С. 424–427.

8. Разработка технологии получения аэрогелей на основе совмещения процессов гелеобразования, замены растворителя и сушки в одном аппарате в среде сверхкритического диоксида углерода / Сусллова Е. Н., Лебедев А. Е. // *XI Научно-практическая конференция с международным участием Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации*. – 2021. – С. 240–243.

9. Процессы получения новых функциональных люминофорных материалов на основе аэрогелей из диоксида кремния / Сусллова Е. Н., Лебедев А. Е. // *Вызовы времени: инновационные технологии и оборудование для фармацевтической промышленности и медицины*. – Москва: Москва, 2020. – С. 39–41.

10. Процессы получения новых функциональных люминофорных материалов на основе аэрогелей из оксида алюминия / Сусллова Е. Н., Худеев И. И., Лебедев А. Е. // *Вызовы времени: инновационные технологии и оборудование для фармацевтической промышленности и медицины*. – Москва: Москва, 2020. – С. 36–39.

11. Theoretical and experimental study of the solvent exchange process under high pressure / E. N. Suslova, D. D. Lovskaya, A. E. Lebedev, N. V. Menshutina // Conference proceedings of the Second International Youth Summer School Aerogels: from laboratory to industry. – Москва, 2019. – P. 48–48.

12. Процесс получения аэрогелей на основе биополимеров с использованием замены растворителя под давлением / А. Е. Лебедев, Е. Н. Сулова, И. И. Худеев, Д. Д. Ловская // Сборник материалов конгресса Биотехнология: состояние и перспективы развития – Т. 17. – Москва, 2019. – С. 273–274.

13. Совмещение и интенсификация процессов под высоким давлением при получении аэрогелей / И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, Е. Н. Сулова и др. // X Научно-практическая конференция с международным участием Сверхкритические флюиды: теория и практика Ростов-на-Дону, 2019. – С. 246–247.

14. Исследование процесса получения би(8-оксихинолята) кальция в аэрогеле с применением сверхкритических технологий / Э. В. Голубев, Д. А. Кунаев, Е. Н. Сулова, А. Е. Лебедев // Успехи в химии и химической технологии. – Т. 35 из 10. – Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева Москва, 2021. – С. 66–68.

15. Исследование процесса получения трис(8-оксихинолята) алюминия в аэрогеле с применением сверхкритических технологий / Д. А. Кунаев, Э. В. Голубев, Е. Н. Сулова, А. Е. Лебедев // Успехи в химии и химической технологии. – Т. 35 из 10. – Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева Москва, 2021. – С. 89–91.

16. Исследование кинетических параметров фазовых переходов в двухкомпонентных системах под высоким давлением / Сулова Е. Н., Лебедев А. Е., Ловская Д. Д. // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34. – С. 171–173.

17. Исследование процесса получения новых функциональных люминофорных материалов с применением аэрогелей на основе оксида алюминия / Е. Н. Сулова, И. И. Худеев, А. Е. Лебедев, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 12. – С. 34–36.

18. Совмещение процессов замены растворителя и сверхкритической сушки в одном аппарате для получения аэрогелей / Е. Н. Сулова, Д. Д. Ловская, А. Е. Лебедев, Н. В. Меньшутина // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 12. – С. 40–42.

19. Исследование кинетики фазовых переходов многокомпонентных систем в субкритическом состоянии / Е. Н. Сулова, А. Е. Лебедев, Д. Д. Ловская, И. И. Худеев // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33, № 11. – С. 86–88.

20. Пат. 2757593 Российская Федерация, МПК С09К 11/06. Люминофорный материал на основе металлоорганических комплексов однородно распределенных в объеме аэрогеля и способ его получения / А. Е. Лебедев, Н. В. Меньшутина, Е. Н. Сулова, И. И. Худеев, И. Х. Аветисов, К. В. Казьмина, Р. И. Аветисов; заявл. 11.12.2020; опубл. 19.10.2021.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.13. 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, перемещения сыпучих материалов, исследование тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов.

Методы изучения химических процессов и аппаратов, совмещенных процессов.

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 Сусловой Екатерины Николаевны 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 Сусловой Екатерине Николаевне; 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: «Процессы получения аэрогелей с люминофорами в сверхкритических условиях и их интенсификация» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13. 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 «24» июня 2022 года, протокол № 9.

В обсуждении приняли участие: д.т.н., проф., заведующий кафедрой ХФИ Меньшутина Н. В., д.т.н., проф. кафедры ХФИ Гордиенко М. Г., к.т.н., доц. Кафедры ХФИ Гусева Е. 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 Писаренко Е. В., к.т.н., доц. кафедры КХТП Михайлова П. Г., к.т.н., доц. кафедры КХТП Налетов В.А., старший преподаватель кафедры КХТП Лукьянов В. Л.

Принимало участие в голосовании 14 человек. Результаты голосования:  
«За» – 14 человек, «Против» – 0 человек, воздержались – 0 человек,  
протокол № 9 от « 24 » июня 2022 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