



«УТВЕРЖДАЮ»

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

» декабрь 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Процессы и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения» 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 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Абрамов Андрей Александрович, «18» марта 1998 года рождения, был аспирантом кафедры химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева». Является аспирантом кафедры химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» с 01.09.2022 и по настоящий момент. Работает в РХТУ имени Д. И. Менделеева с 2020 года, в настоящее время – на должности ассистента кафедры химического и фармацевтического инжиниринга и младшего научного сотрудника структурного подразделения кафедры химического и фармацевтического инжиниринга «Лаборатория разработки инновационных назальных и ингаляторных препаратов для лечения социальнозначимых заболеваний».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в РХТУ им. Д. И. Менделеева в 2023 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 и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения» принято следующее заключение.

Диссертационная работа Абрамова Андрея Александровича посвящена разработке, экспериментальному и теоретическому исследованию процессов получения изделий медицинского назначения с заданной геометрией с использованием технологий 3D-печати, различных процессов сушки и стерилизации в среде сверхкритического диоксида углерода.

Актуальность темы исследования.

Процессы трехмерной печати являются перспективным подходом к формированию изделий со сложной геометрией путем послойного нанесения материалов. На данный момент разработано и внедрено большое количество технологий аддитивного производства в различные отрасли, включая медицину, фармацевтику и химическую промышленности. Однако наблюдается потребность в разработке новых технологий и устройств аддитивных процессов, которые будут способствовать формированию персонифицированных изделий со строго заданными свойствами. Среди широкого разнообразия технологий трехмерной печати, технологии, основанные на экструзии материалов, являются наиболее востребованными. На данный момент развитие новых устройств и процессов аддитивных технологий является крайне актуальной задачей, что отражено в распоряжении правительства Российской Федерации о «Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».

Научная новизна заключается в следующем:

1. Исследованы различные физико-химические и реологические свойства вязких «чернил» на основе альгината натрия, частично сшитого альгината натрия, альгината натрия с внедренными наноматериалами (УНТ, графен) и гетерофазной системы на основе желатина. На основании полученных экспериментальных исследований рекомендованы оптимальные составы для реализации процесса 3D-печати.

2. Определена последовательность реализации процесса трехмерной печати с использованием вязких «чернил» различного состава при формировании персонифицированных изделий с высокопористой структурой и функциональными свойствами, которые позволили разработать конструкцию установки 3D-печати.

3. Разработана математическая модель для исследования движения неньютоновской вязкой жидкости в каналах со сложной геометрией при нестационарном потоке.

4. Исследовано влияние внедрения наноматериалов (многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), графен) на реологические особенности вязких «чернил». В ходе проведения экспериментальных исследований изделий со сложной геометрией с внедренными наноматериалами определено влияние концентрации и типа наноматериала на характеристики изделий.

5. Исследованы массообменные процессы в двухкомпонентной системе диоксид углерода – пероксид водорода при проведении процесса сверхкритической стерилизации. Разработана математическая модель с целью определения параметров проведения процесса сверхкритической флюидной стерилизации высокопористых материалов на основе биополимеров.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны лабораторные методики процесса получения вязких «чернил» различного состава и гетерофазной системы на основе желатина для реализации процесса трехмерной печати.

2. Предложена конструкция установки для реализации процесса трехмерной печати с использованием «чернил» на основе биополимеров с различной вязкостью. На конструкцию экструдера вязких «чернил» зарегистрировано НОУ-ХАУ.

3. Предложен алгоритм проектирования сложной геометрии изделий на основании результатов медицинских исследований (КТ, МРТ).

4. Разработаны процессы получения персонифицированных изделий медицинского назначения с использованием трехмерной печати, а именно: гибридный имплантат костной ткани, имплантат сосуда, персонифицированные токопроводящие элементы.

5. Предложен метод сверхкритической флюидной стерилизации высокопористых материалов на основе биополимеров.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российским Научным Фондом № 23-13-00368 и программы развития университета «Приоритет 2030».

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 5 в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, и 2 в журнале из перечня ВАК. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Зарегистрировано 1 НОУ-ХАУ.

Основные результаты диссертационной работы были представлены на XV, XVI и XVII, XVIII Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2019 г, 2020 г, 2021 г, 2022 г.); Международном онлайн семинаре Aerogels (Гамбург, Германия, 2020 г); XI Научно-практической конференции с международным участием "Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации" (Новосибирск, 2021 г); Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Фундаментальные науки – специалисту нового времени» (Иваново, 2021 г); XVIII и XIV Международных научно-практических конференциях «Новые полимерные и композиционные материалы» (Нальчик, 2022 г, 2023 г.); Международных научно-практических конференциях «Перспективные технологии и материалы» (Севастополь, 2022 г, 2023 г). Автор является победителем программы Молодежного научно-инновационного конкурса «УМНИК» (2021-2023 гг).

Публикации по теме диссертации:

1. Investigation of the 3D Printing Process Utilizing a Heterophase System / N. Menshutina, Abramov A., Okisheva M, Tsygankov P. // GELS. – 2023. – Vol. 9, № 7. P.1-15. **(Q1, Web of Science, Scopus)**

2. Mathematical and Computer Modeling as a Novel Approach for the Accelerated Development of New Inhalation and Intranasal Drug Delivery Systems /

Mensutina N., Abramov A., Mokhova E // *Computation*. – 2023. – Vol. 11, № 7 – P. 136. (**Q2, Web of Science, Scopus**)

3. Аддитивные технологии для медицины, фармацевтики и химической промышленности / Абрамов А.А., Меньшутина Н.В. // *Теоретические основы химической технологии*. – 2023. – Т. 57, № 5. – С. 533–544. (**Q3, Web of Science, Scopus**)

4. Разработка «чернил» для реализации экструзионных методов 3D-печати вязкими материалами / Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Окишева М.К., Меньшутина Н. В. // *Российский химический журнал*. – 2023. – Т. 67, № 2 – С. 74–82. (**Q3, Web of Science, Scopus**)

5. Extrusion-based 3D printing for highly porous alginate materials production / N. Menshutina, Abramov A., Okisheva M, Tsygankov P. // *GELS*. – 2021. – Vol. 7, № 3. P.1-15. (**Q1, Web of Science, Scopus**)

6. Получение, сушка и стерилизация в среде сверхкритического флюида высокопористых материалов медицинского назначения (на примере композиции альгинат натрия - желатин) / Абрамов А.А., Окишева М.К., Серeda О.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. // *Химическая промышленность сегодня*. – 2024. – № 1 – С. 10-16. (**ВАК**)

7. 3D-печать гелевыми материалами с целью получения аэрогелей на основе альгината натрия / Цыганков П.Ю., Абрамов А.А., Меньшутина Н.В. // *Химическая промышленность сегодня*. – 2020. – № 6 – С. 52-57. (**ВАК**)

8. Исследование структуры и свойств гетерофазной системы для релаизации процесса экструзионной 3D-печати вязкими «чернилами» / Абрамов А.А., Окишева М.К., Цыганков П.Ю. // XIX Международная научно-практическая конференция «Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения», Нальчик, Эльбрус, Россия 3-8 июля 2023. – «Принт Центр», Нальчик, 2023. – С. 5.

9. Исследование влияния метода сушки на свойства материалов на основе альгината натрия и желатина // Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2023. – Т. 37, № 11 – С.95-98.

10. Получение пресс формы микроигл с использованием полимеризационного метода 3D-печати // Аторин Н.В., Абрамов А.А., Гордиенко М. Г. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2023. – Т. 37, № 11 – С. 54-56

11. Разработка конструкции установки для реализации процесса 3D-печати с использованием гетерофазной системы / Сулханов Я.Д., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2023. – Т. 37, № 4 – С. 70-73.

12. Разработка цифровой модели верхних дыхательных путей / Чельшева Е.К., Окишева М.К., Абрамов А.А. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2023. – Т. 37, № 4 – С. 70-73.

13. Исследование методов формирования иерархически пористой структуры материалов / Пилоян А.Р., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2023. – Т. 37, № 4 – С. 70-73.

14. Исследование реологических особенностей материалов для реализации процесса 3D-печати / Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.

В. // Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. – Севастополь: Севастополь, 2022. – С. 203 – 206.

15. Разработка программного комплекса для описания кривых течения растворов биополимеров / Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 11 – С. 91-94.

16. Моделирование растворения твердой лекарственной формы с использованием клеточно-автоматного подхода / Амельченко А.И., Кузовлев С.А., Абрамов А.А., Лебедев И.В. // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 13 – С. 43-45.

17. Разработка гетерофазной системы для реализации процесса 3D-печати вязкими материалами / Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 2 – С. 88-90.

18. Разработка алгоритма подбора геометрии внутреннего заполнения имплантатов для лечения и устранения дефектов костной ткани / Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 2 – С. 91 – 95.

19. Определение состава материалов на основе альгината натрия для реализации процесса 3D-печати / Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 2 – С. 65 – 69.

20. Разработка способа получения аэрогелей на основе альгината натрия с использованием аддитивных технологий / Цыганков П.Ю., Абрамов А.А., Меньшутина Н.В. // XI Научно-практическая конференция с международным участием Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации. – 2021. – С. 374-377.

21. Исследование реологических особенностей материалов для реализации процесса 3D-печати / Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н. В. // Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. – Севастополь: Севастополь, 2021. – С. 220 – 224.

22. Прогнозирование рисков развития аневризмы на участке сонной артерии с помощью математического моделирования / Пилюян А.Р., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35, № 10 – С. 104 – 106.

23. Изучение процессов получения матриц со сложной геометрией с использованием аддитивных технологий / Серeda О.А., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35, № 10 – С. 122 – 124.

24. Исследование реологических свойств частично сшитого альгината натрия для реализации процесса экструзионной 3D-печати / Окишева М.К., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35, № 10 – С. 98-100.

25. Исследование изменения геометрических размеров гелевых структур, полученных с использованием 3D-печати / Пилюян А.Р., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 6 – С. 37-39.

26. Изучение методов и технологий трехмерной печати для получения высокопористых материалов / Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В. // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34, № 6 – С.85-87.

27. Изучения процесса трехмерной печати для получения композиционных материалов/ Абрамов А.А., Цыганков П.Ю. // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33, № 11 – С. 9-11.

28. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023662238 / Программный модуль для описания результатов реологических исследований / А.А. Абрамов, Н.В. Меньшутина, М.К. Окишева, П.Ю. Цыганков.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий в части:

Создания новых процессов и аппаратов химической технологии, позволяющих получать изделия заданного состава и формы на основе различных материалов.

Фундаментальных исследования явлений переноса энергии, массы и импульса в химико-технологических процессах и аппаратах.

Развития теории и практики создания процессов, аппаратов, технологий, обеспечивающих создание автоматизированных цифровых производств.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Абрамова Андрея Александровича 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 Абрамову Андрею Александровичу; 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 и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», состоявшемся «14» сентября 2024 года, протокол № 2.

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., к.т.н., доц. кафедры ХФИ Цыганков П. Ю.,
к.т.н., преподаватель кафедры ХФИ Артемьев А. И..

Принимало участие в голосовании человек 14 человек. Результаты
голосования: «За» – 14 человек, «Против» – 0 человек, воздержались – 0 человек,
протокол № 2 от «17» января 2024 г.

Председатель заседания

заместитель заведующего кафедрой ХФИ,
профессор кафедры ХФИ,
д.т.н., доцент

М. Г. Гордиенко

Секретарь заседания

к.т.н., доцент кафедры ХФИ

П. Ю. Цыганков

ПРОТОКОЛ

заседания кафедры химического и фармацевтического инжиниринга
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева»

от «17» января 2024 г. № 2

Присутствовали:

Сотрудники кафедры химического и фармацевтического
инжиниринга:

д.т.н., проф., заведующий кафедрой Меньшутина Н. В.;

д.т.н., проф. кафедры Гордиенко М. Г.;

к.т.н., с.н.с. Лебедев Е. А.;

к.т.н., доц. кафедры Гусева Е.В.;

к.т.н., доц. кафедры Цыганков П. Ю.;

к.т.н., доц. кафедры Лебедев И.В.;

к.т.н., преподаватель Артемьев А. И.;

к.т.н., с.н.с. Ловская Д.Д.;

к.т.н., с.н.с. Троянkin А. Ю.;

м.н.с. Мочалова М. С.;

м.н.с. Федотова О. В.;

ассистент Кислинская А. Ю.;

ассистент Мохова Е.К.;

ассистент Уварова А. А.;

зав. лаб. Демкин К. М.;

инженер Деркач В. С.

Всего присутствовало: 16 человек.

ПОВЕСТКА ДНЯ

Предварительное рассмотрение диссертационной работы аспиранта и ассистента кафедры химического и фармацевтического инжиниринга РХТУ им. Д. И. Менделеева Абрамова Андрея Александровича на тему: «Процессы и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения».

Работа выполнена на кафедре химического и фармацевтического инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева».

Тема диссертационной работы Абрамова А.А. и научный руководитель д.т.н., проф., заведующий кафедрой ХФИ Меньшутина Н.В. утверждены на

заседании Ученого совета РХТУ им. Д.И. Менделеева от 28 сентября 2022 г, протокол № 2. Тема диссертационной работы изменена на заседании Совете факультета от 27 октября 2023 г, протокол № 12.

СЛУШАЛИ:

Сообщение Абрамова Андрея Александровича, в котором было изложено основное содержание диссертационной работы на тему: «Процессы и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения», представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

В своем выступлении Абрамов Андрей Александрович сформулировал цель и задачи диссертационной работы, ее актуальность, научную новизну и практическую значимость, изложил основные положения диссертации и итоги выполненного исследования.

Абрамову А.А. были заданы следующие вопросы:

д.т.н., проф. кафедры Гордиенко М.Г.:

1. Для чего представлены результаты расчета механических свойств изделий сложной геометрии? Какие уравнения были использованы при составлении математического описания?
2. Что такое степенной индекс и каков его физический смысл?
3. Происходит ли внедрение частиц гетерофазной системы в структуру изделий на основе альгината натрия? Проводилось ли проверка?
4. Как на основании расчета определить параметры проведения процесса сверхкритической флюидной стерилизации?
5. Чем отличается процесс печати с использованием термопластичных полимеров, предложенный в диссертационной работе, от существующих решений?

к.т.н., доц. кафедры Гусева Е.В.:

1. Чем обусловлен выбор концентрации глутарового альдегида для сшивки желатина?
2. Каким образом проводилось варьирование параметров процесса трехмерной печати? Был разработан алгоритм?
3. С использованием какого метода проводилась оценка стерильности материалов после завершения процесса сверхкритической стерилизации? Оценивалось ли остаточное содержание пероксида водорода во внутренней структуре материалов после завершения процесса стерилизации?
4. В чем заключается основное отличие технологий 3D-печати вязкими «чернилами», предложенных в диссертационной работе?

к.т.н., доц. кафедры Цыганков П.Ю.:

1. Чем обусловлено увеличение площади петли гистерезиса тиксотропии и ее уменьшение при увеличении концентрации сшивающего агента?
2. Как проводилась оценка наличия застойных зон в области расширения сосуда?

3. На основании чего проводится оценка точности процесса трехмерной печати с использованием гетерофазной системы?

4. Почему предполагается образование агломератов углеродных нанотрубок в структуре изделий?

5. Проводилась ли численная оценка эффективности процесса стерилизации?

к.т.н., преподаватель Артемьев А. И.:

1. На основании чего при разработке состава высокопористых материалов для формирования гибридного имплантата костной ткани рассматривалась композиция альгинат натрия – желатин?

2. В чем заключаются принципиальные различия в структуре предложенных в диссертационной работе имплантатов костной ткани и сосуда?

3. Какие допущения были сделаны при разработке математической модели для исследования гидродинамики неньютоновской вязкой жидкости?

4. Почему наблюдается широкое распределение частиц по размерам для гетерофазной системы? Как изменяется распределение при изменении параметров? Как влияет распределение частиц на качество процесса 3D-печати?

5. В процессе сверхкритической стерилизации возникает граница раздела фаз? Какова продолжительность теста на стерильность?

На заданные вопросы Абрамовы Андреем Александровичем даны аргументированные ответы.

В обсуждении приняли участие: д.т.н., проф., заведующий кафедрой ХФИ Меньшутин Н. В., д.т.н., проф. кафедры ХФИ Гордиенко М. Г., к.т.н., доц. кафедры ХФИ Гусева Е. В., к.т.н., доц. кафедры ХФИ Цыганков П. Ю., к.т.н., преподаватель кафедры ХФИ Артемьев А. И..

ПОСТАНОВИЛИ:

Заслушав и обсудив диссертационную работу Абрамова Андрея Александровича полностью принять следующее заключение организации по диссертации на тему «Процессы и аппараты 3D-печати изделий медицинского назначения».

Председатель заседания

заместитель заведующего кафедрой ХФИ,
профессор кафедры ХФИ,
д.т.н., доцент

М. Г. Гордиенко

Секретарь заседания

к.т.н., доцент кафедры ХФИ

П. Ю. Цыганков