

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и инновациям  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный технический  
университет имени Ю. А. Гагарина»  
д.х.н., профессор Остроумов И.Г.



2024 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный технический университет  
имени Ю.А. Гагарина» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Диссертация Ушаковой Екатерины Владимировны «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика» выполнена на кафедре «Физика» Физико-технического института СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Соискатель Ушакова Екатерина Владимировна в 2019 г. окончила СГТУ имени Гагарина Ю.А. по направлению подготовки «Техническая физика» с присвоением квалификации «магистр».

В период подготовки диссертации с 01.09.2019 по 31.08.2023 соискатель обучалась в аспирантуре СГТУ имени Гагарина Ю.А. по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность 1.3.6. «Оптика».

С 11.09.2023 по настоящее время работает в должности ассистента кафедры «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А..

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГТУ имени Гагарина Ю.А. № 66-А от 04.07.2023.

Справка об обучении в аспирантуре №226 от 27.06.2023 выдана СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Научный руководитель – Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А., утвержденный приказом ректора СГТУ имени

Гагарина Ю.А. № 1219 - С от 22.10.2019, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры «Физика» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других научных и образовательных учреждений.

**На заседании присутствовали следующие сотрудники кафедры «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А.:**

1. Зимняков Дмитрий Александрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика»;
2. Сысоев Виктор Владимирович, д.т.н., профессор кафедры «Физика»;
3. Гестрин Сергей Геннадьевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика»;
4. Горбатенко Борис Борисович, д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика»;
5. Мельников Геннадий Васильевич, д.х.н., профессор кафедры «Физика»;
6. Мельников Андрей Геннадьевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»;
7. Алонова Марина Васильевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»;
8. Павлова Мария Валентиновна, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»;
9. Беляев Илья Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Физика»;
10. Никишин Евгений Леонардович, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»;
11. Самородина Татьяна Валерьевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика».

**На заседании присутствовали сотрудники других научных и образовательных учреждений:**

1. Дербов Владимир Леонардович, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей, теоретической и компьютерной физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;
2. Скрипаль Анатолий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;
3. Романова Елена Анатольевна, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей, теоретической и компьютерной физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;
4. Аветисян Юрий Арташесович, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник лаборатории проблем лазерной диагностики технических и живых систем обособленного структурного подразделения ФИЦ СНЦ РАН «Институт проблем точной механики и управления РАН»;
5. Мельников Леонид Аркадьевич, д. ф.-м. н., заведующий кафедрой «Приборостроение» СГТУ имени Гагарина Ю.А.
6. Хлебцов Борис Николаевич, д. ф.-м.н., директор федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный



исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук»»;

7. Генина Элина Алексеевна, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптики и биофотоники ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»;

8. Лякин Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории проблем когерентно-оптических измерений в точной механике обособленного структурного подразделения ФИЦ СНЦ РАН «Институт проблем точной механики и управления РАН».

#### **Рецензенты диссертации:**

Горбатенко Борис Борисович, д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А. предоставил положительный отзыв, в котором указал, что диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям;

Никишин Евгений Леонардович, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика» СГТУ имени Гагарина Ю.А. предоставил положительный отзыв, в котором указал, что диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

По итогам обсуждения диссертации и доклада Е.В. Ушаковой по теме диссертации принято следующее заключение:

Диссертационная работа Ушаковой Екатерины Владимировны «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.6 «Оптика» посвящена разработке, теоретическому обоснованию и экспериментальной верификации новых оптических методов зондирования полимерных пен, являющихся существенно нестационарными случайно-неоднородными средами со сложной динамикой и структурой.

**Личный вклад автора.** Эксперименты по синтезу полилактидных пен с использованием метода многократного динамического рассеяния лазерного излучения для мониторинга эволюции синтезируемой пены и флуоресцентной диагностики синтезированных образцов проводились лично автором. Специальное программное обеспечение для теоретического моделирования динамического рассеяния лазерного излучения в расширяющихся пенах, процессов формирования структуры пены и синтеза пространственно-временных спекл-текстур разработано, верифицировано и

использовано в исследованиях лично автором. Постановка исследовательских задач и обсуждение результатов исследований проведены под руководством профессора Д.А. Зимнякова.

**Новизна исследований**, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Впервые разработан и верифицирован в экспериментах метод анализа динамики межфазных границ в эволюционирующих полимерных пенах на основе оценок среднего времени жизни динамических спеклов в поле многократно рассеянного лазерного излучения, отображаемого в форме пространственно-временных спекл-текстур (ПВСТ).

2. В рамках разработанной феноменологической модели многократного рассеяния лазерного излучения в объеме расширяющейся пены впервые установлена взаимосвязь между средним временем жизни динамических спеклов в поле рассеянного лазерного света и макроскопическими параметрами, характеризующими динамику расширения (текущими значениями объема пены и его первой производной по времени).

3. Впервые рассмотрен и обоснован эффект дополнительного формирования зародышей пор в полимерной матрице на стадии интенсивного квази-адиабатического расширения полимерной пены, приводящий к возрастанию кратности рассеяния лазерного излучения в объеме пены по сравнению с медленным квази-изотермическим расширением. В наблюдаемых ПВСТ появление дополнительных рассеивателей проявляется в уменьшении среднего наклона треков, соответствующих отдельным спеклам, к временной оси (доминирование режима «кипения» спеклов над трансляционным движением).

4. Впервые установлено существенное влияние квази-волноводного режима распространения лазерного излучения накачки и флуоресцентного отклика в стенках пор, приводящего к возрастанию среднего времени жизни квантов флуоресценции в объеме насыщенных флуорофором полимерных пенах, на эффективность возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции при лазерной накачке в полосе поглощения флуорофора.

**Практическая значимость** полученных результатов:

1. Разработанный и верифицированный метод анализа микроскопической динамики рассеивающих центров в нестационарных средах на основе синтеза ПВСТ и оценок выборочных значений времени жизни спеклов по синтезированным спекл-структурам применим для мониторинга процессов формирования структуры различных многофазных систем при отсутствии априорной информации о типе микроскопической динамики рассеивателей.

2. Разработанный метод анализа эффективности возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции в случайно-неоднородных



флуоресцирующих системах на основе анализа зависимостей полуширины спектра флуоресцентного отклика от интенсивности лазерной накачки может быть использован для исследования фундаментальных особенностей переноса излучения в средах со сложной структурой, приводящих к возрастанию среднего времени пребывания квантов флуоресценции в среде.

3. Разработанный комплекс лабораторных методов для анализа структуры полимерных пен на различных стадиях их формирования и феноменологических моделей для интерпретации получаемых данных может быть применен в синтезе пеноподобных материалов с оптическим контролем структуры в различных областях современной науки и технологий.

4. Результаты исследований применены в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Техническая физика», а также аспирантов, обучающихся по научным специальностям «Оптика» и «Лазерная физика» в части модернизации специальных курсов лекций и постановки новых учебно-исследовательских работ в специальных практикумах.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием современного научно-исследовательского оборудования и программного обеспечения, применением апробированных методик моделирования и экспериментальных исследований, соответствием полученных результатов данным, полученным другими исследовательскими группами, а также их опубликованием в рецензируемых российских и международных научных журналах.

#### **Апробация работы:**

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных и российских конференциях: Saratov Fall Meeting - 2018, - 2019, 2020, -2021, -2022 (Саратов, Россия); The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS - 2019) (Дубна, Россия); «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (УОПИ-2019) (Саратов, Россия); VI Международная конференция и молодежная школа ИТНТ-2020 (Самара, Россия); XI Scientific and Engineering Conference “Supercritical Fluids: Fundamentals, Technologies, and Innovations” (SCF TEC 2021) (Новосибирск, Россия); III Международная молодежная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (Архангельск, Россия); XIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных имени В.В. Лунина «Сверхкритические флюидные технологии в решении экологических проблем» (Архангельск, Россия); XII Scientific and Engineering Conference “Supercritical Fluids: Fundamentals, Technologies, and Innovations” (SCF TEC 2023) (Тверь, Россия).

Диссертационная работа Ушаковой Е.В. соответствует специальности 1.3.6 – Оптика в части пунктов 1, 6, 7, 10 паспорта специальности 1.3.6.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ: 7 статей, индексируемых международными базами данных Scopus и WoS (из которых 2 статьи Q1) и входящих в перечень ВАК; получены 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

### **I. Издания, входящие в перечень ВАК и базы WoS, Scopus**

1. Зимняков Д. А., Алонова М. В., Ювченко С. А., **Ушакова Е. В.** Математическое моделирование переноса зондирующего излучения в низкокогерентной рефлектометрии случайно-неоднородных сред // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 4-15.
2. Особенности квази-изотермического вспенивания СКФ-пластифицированного полилактида: эффект перехода от расширения к коллапсу пены / Д. А. Зимняков, Е. О. Епифанов, А. В. Калачева, **Ушакова Е.В.** [и др.] // Сверхкритические флюиды: теория и практика. – 2020. – Т. 15. – № 1. – С. 112-123.
3. Zimnyakov D., Alonova M., **Ushakova E.**, Ushakova O., Isaeva A., Isaeva, E. Dynamic light scattering by foamed polymers during preparation of scaffold prototypes: events statistics analysis versus evaluation of correlation time in data interpretation // Photonics. – 2021. – V. 8. – Ar. 549.
4. Zimnyakov D., Alonova M., **Ushakova E.**, Volchkov S. Speckle-based sensing of microscopic dynamics in expanding polymer foams: Application of the stacked speckle history technique // Sensors. – 2021. – V. 21. – Ar. 6701.
5. Zimnyakov D., Alonova M., **Ushakova E.** Depressurization-induced nucleation in the “polylactide-carbon dioxide” system: self-similarity of the bubble embryos expansion // Polymers. – 2021. – V. 13. – Ar. 1115.
6. Зимняков Д. А., Алонова М. В., **Ушакова Е. В.** [и др.] Сверхкритический флюидный синтез высокопористых полилактидных матриц: фундаментальные особенности и технологические аспекты формирования, развития и стабилизации полимерные пен // Сверхкритические флюиды: теория и практика. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 99-109.
7. Алонова М. В., Волчков С. С., Зимняков Д. А., Исаева А. А., Исаева Е.А., **Ушакова Е. В.**, Ушакова О.В. Оптическая диффузионная диагностика эволюционирующих полимерных пен // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93, №4. – с. 463-472.

### **II. Прочие научные издания**

8. Зимняков Д. А., Здражевский Р. А., **Ушакова Е. В.** и др. Фундаментальные аспекты сверхкритических флюидных технологий синтеза высокопористых



полимерных матриц для регенеративной медицины // Медицинская физика (ТКМФ-7). – 2020. – С. 131-132.

9. Alonova M. V., Ushakova E. V., Zimnyakov D. A. Image processing procedures for quantification of bubble germ growth/collapse in synthesized highly-porous polymer matrices // SPIE Proceedings. – 2021. – V. 11845. – Ar. 118451B.

10. Ushakova E. V., Alonova M. V., Zimnyakov D. A. Non-coherent video-reflectometry of growing pores in plasticized polymers during supercritical fluidic foaming // SPIE Proceedings. – 2021. – V. 11845. – Ar. 118451A.

11. Ушакова Е. В., Алонова М. В., Зимняков Д. А. Фурье-анализ динамических спекл-картин применительно к мониторингу СКФ-синтеза высокопористых полимерных матриц // Сверхкритические флюидные технологии в решении экологических проблем – Архангельск: Издательский центр САФУ, 2022. – С. 152-155.12.

12. Ушакова Е. В., Алонова М. В., Зимняков Д. А. Пространственно-временной анализ спекл-структур для диагностики морфологических особенностей вспененных полимеров // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию – Архангельск: Издательский центр САФУ, 2022. – С. 524-527.

### III. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

13. № 2021661976. Программа моделирования роста зародышей пор на ранней стадии вспенивания пластифицированных полимеров. 20.07.2021 / Ушакова Е. В., Алонова М. В., Зимняков Д. А.

14. № 2022616120. Программа для пространственно-временного анализа динамических спекл-полей. 05.04.2022 / Е. В. Ушакова, М. В. Алонова, Д. А. Зимняков.

Высказанные в ходе обсуждения диссертационной работы замечания носили частный характер и по существу не затрагивали ее основных положений и результатов.

Диссертационная работа Ушаковой Екатерины Владимировны «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» является законченной научной работой, посвященной разработке, теоретическому обоснованию и экспериментальной верификации новых оптических методов зондирования полимерных пен, являющихся существенно нестационарными случайно-неоднородными средами со сложной динамикой и структурой. Диссертация может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика» как удовлетворяющая критериям пп. 9-11, 13, 14, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»,

утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании присутствовали 12 докторов и 7 кандидатов наук. Результаты открытого голосования: «за» - 19 чел.; «против» - нет, «воздержалось» - нет (протокол № 10 от 09.04.2024 г.)

Председатель заседания 

Гестрин Сергей Геннадьевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры «Физика»  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Саратовский государственный  
технический университет имени Ю.А.  
Гагарина»