

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.06,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело _____
Решение диссертационного совета от 24.10.2024 № 104/24

о присуждении **Ушаковой Екатерине Владимировне**, гражданке РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» по специальности 1.3.6. - Оптика принята к защите 17 мая 2024 года (протокол заседания 98/24) диссертационным советом 24.2.392.06, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83. Совет 24.2.392.06 создан приказом Минобрнауки России №362/нк от 19.03.2020.

Соискатель Ушакова Екатерина Владимировна, гражданка РФ, 19.01.1996 года рождения, в 2019 г. окончила магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» по направлению «Техническая физика» с присвоением квалификации «Магистр» по направлению «Техническая физика» (профиль «Физическая оптика, квантовая электроника и физико-химическое материаловедение оптических сред»). В период подготовки диссертации соискатель обучалась в очной аспирантуре СГТУ имени Гагарина Ю.А. по специальности 1.3.6. – Оптика и окончила ее в 2023 году.

Диссертация выполнена на кафедре «Физика» Физико-технического института СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Научный руководитель – Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» Физико-технического института СГТУ имени Гагарина Ю.А., утвержденный в качестве руководителя приказом ректора СГТУ имени Гагарина Ю.А. № 1219-С от 22.10.2019, **представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.**

Официальные оппоненты:

Захаров Валерий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных и биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара, и

Кириллин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории биофотоники отдела радиофизических методов в медицине федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный университет» **в своем положительном отзыве**, составленном Храмовым Владимиром Николаевичем, доцентом кафедры радиофизики ФГАОУ ВО «ВолГУ», кандидатом физико-математических наук, доцентом, Фирсовым Константином Михайловичем, профессором кафедры радиофизики ФГАОУ ВО «ВолГУ», доктором физико-математических наук, профессором, и Якимцом Андреем Леонидовичем, заведующим кафедрой радиофизики ФГАОУ ВО «ВолГУ», кандидатом физико-математических наук, доцентом, и утвержденном первым проректором ФГАОУ ВО «ВолГУ» д.э.н. Дзедиком Валентином Алексеевичем, отметила, что диссертационная работа Ушаковой Екатерины Владимировны является законченным научным исследованием, удовлетворяющим критериям актуальности, научной и практической значимости и новизны и направленным на решение актуальных задач оптической диагностики случайно-неоднородных сред со сложной динамикой и структурой. В отзыве ведущей организации отмечается, что диссертация «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ушакова Екатерина Владимировна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высоким уровнем экспертизы и близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, высокой квалификацией в области оптического зондирования многократно рассеивающих сред со сложной структурой и динамикой.

Результатам проведенного диссертационного исследования опубликованы в 14 работах: 7 статей, входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science, Scopus (2 статьи Q1), и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Все публикации в полной мере отражают содержание работы. Результаты работы в достаточной степени апробированы путем представления докладов на всероссийских и международных конференциях, а перечисленные в отзыве замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общего положительного впечатления от работы.

Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации:

1. 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. DOI: 10.3390/photonics8120549

В работе представлены результаты по разработке и экспериментальной верификации нового подхода к мониторингу процесса интенсивного расширения полимерной пены, использующего эффект многократного динамического рассеяния лазерного излучения в объеме пены. Предложено в качестве параметра, характеризующего микроскопическую подвижность межфазных границ в расширяющейся полимерной пене, использовать среднее время жизни регистрируемых динамических спеклов. Установлено, что выбранный параметр инвариантен по отношению к типу динамики (дрейфовая/диффузионная) межфазных границ в зондируемой пене.

2. 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. DOI: 10.3390/s21206701

Разработан, обоснован и верифицирован в экспериментах метод визуализации и анализа пространственно-временных флуктуаций лазерного излучения, многократно рассеянного эволюционирующей полимерной пеной. Метод основан на синтезе наборов пространственно-временных спекл-текстур, каждая из которых отображает пространственно-временную динамику спеклов, модулирующих рассеянный эволюционирующей пеной лазерный свет на различных стадиях эволюции.

3. 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. DOI: 10.3390/polym13071115

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамики формирования и развития зародышей пор в пластифицированном полилактиде

при сверхкритическом флюидном синтезе высокопористых полимерных матриц на стадии нуклеации.

4. 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. DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55033.279-22

В работе рассмотрены различные подходы к оптической диагностике эволюционирующих полимерных пен, формируемых в результате сброса внешнего давления по заданному сценарию в системах "полимер-сверхкритический флюид" и рассматриваемых в качестве прототипов для создания тканеинженерных конструкторов – скаффолдов. Установлено существенное влияние квази-волноводного эффекта при распространении излучения накачки и флуоресценции в стенках пор на эффективность возбуждения индуцированной составляющей флуоресцентного отклика.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах. На **автореферат** диссертации поступило **7** положительных **отзывов**, в которых отмечается актуальность и высокий уровень проведенных исследований, их научная новизна и практическая значимость. Отзывы поступили от:

1) Аксёнова Валерия Петровича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика, главного научного сотрудника лаборатории оптической локации федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева» Сибирского отделения Российской академии наук; отмечается излишне большой объем второй главы диссертационной работы, имеющей несколько опосредованное отношение к когерентно-оптическим и флуоресцентным методам диагностики и посвященной в основном результатам в области разработки технологии вспенивания биорезорбируемых полимеров и анализа динамики формирования полимерных пен;

2) Владимирова Александра Петровича, доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, старшего научного сотрудника федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова» Уральского отделения Российской академии наук, без замечаний;

3) Голованя Леонида Анатольевича, доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика, профессора кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский

государственный университет имени М. В. Ломоносова»; отмечается, что в автореферате отсутствует рассмотрение поляризационных эффектов (в частности, деполяризации лазерного света) при многократном рассеянии в объеме расширяющейся пены;

4) Кравчука Дениса Александровича, доктора технических наук по специальности 2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения, доцента кафедры электрогидроакустической и медицинской техники института нанотехнологий, электроники и приборостроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; отмечается, что в автореферате отсутствует обсуждение ограничений применимости используемых феноменологических моделей;

5) Лякина Дмитрия Владимировича, кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика, старшего научного сотрудника лаборатории проблем когерентно-оптических измерений в точной механике института проблем точной механики и управления ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук»; отмечается, что имеет место некоторая расплывчатость формулировок третьего и четвертого защищаемых положений, заключающаяся в том, что эти положения сформулированы в виде нескольких предложений, что затрудняет их восприятие;

6) Свиридова Александра Петровича, доктора физико-математических наук по специальности 05.27.03 – Квантовая электроника, главного научного сотрудника отделения «Институт фотонных технологий» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники (КККиФ) НИЦ «Курчатовский институт»; приведены замечания:

– обозначения осей координат на части графиков даны на русском, а на другой части (рис. 4б, рис. 5) – на английском языке; следовало бы придерживаться единообразия при подготовке графических материалов;

– в защищаемом положении 1 используется аббревиатура ПВСТ (пространственно-временная спекл-текстура), не являющаяся общепринятой;

– в защищаемом положении 2 понятие «тип микроскопической динамики» не является общепринятым; кроме того, оно не поясняется в тексте автореферата;

– на рис. 2б выделены участки зависимости: «близкая к линейной» (четыре точки слева) и «близкая квадратичной» (7 точек справа); Однако при детальном рассмотрении практически все приведённые точки удовлетворительно описываются квадратичной зависимостью; желательно показать сами аппроксимации и их достоверности;

7) Хайдукова Евгения Валерьевича, доктора физико-математических наук по специальностям 05.27.03– Квантовая электроника и 03.01.02– Биофизика, проректора по науке и инновациям федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева»; отмечается, что не совсем очевидно, как результаты исследования динамики развития зародышей пор, представленные в главе 2, используются в дальнейших исследованиях многократно динамического рассеяния лазерного излучения и флуоресцентного отклика пен (главы 3, 4).

На все высказанные замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

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 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 синтезированных пространственно-временных спекл-текстурах появление дополнительных рассеивателей в объеме расширяющейся пены 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 пен, на эффективность возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции при лазерной накачке в полосе поглощения флуорофора.

Теоретическая значимость работы обоснована важностью полученных результатов для усовершенствования и развития оптических методов зондирования существенно нестационарных случайно-неоднородных сред со сложной динамикой и

структурой, каковыми являются полимерные пены, синтезируемые путем сверхкритического флюидного вспенивания. Полученные результаты имеют **практическую значимость**, поскольку способствуют повышению эффективности применений оптических методов диагностики и выявлению особенностей распространения лазерного излучения в высокопористых полимерных матрицах в процессе их синтеза. Разработанные методы зондирования случайно-неоднородных сред на основе эффектов многократного динамического рассеяния лазерного излучения и сужения спектра флуоресценции при увеличении интенсивности лазерной накачки в полосах поглощения флуоресцирующих составляющих сред применимы для морфофункциональной диагностики не только синтезируемых пен, но и других классов материалов со случайно-неоднородной структурой.

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

Личный вклад соискателя состоит в том, что автор принимал непосредственное участие во всех этапах исследований, начиная с постановки задач и заканчивая обсуждением результатов и подготовкой статей и докладов на конференциях. 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.

В ходе защиты диссертации были заданы следующие вопросы:

1. В работе рассматривается переход от спонтанной флуоресценции к стохастической лазерной генерации в полимерных пенах. Можете ли Вы объяснить различия между спонтанной флуоресценцией и стохастической лазерной генерацией?
2. Объясните, почему на графиках рисунка 2.6 в презентации не приведены результаты статистического анализа получаемых данных. Каким образом осуществлялась статистическая обработка получаемых экспериментальных данных?

3. Сколько и какие модели были разработаны в ходе Вашей работы? Какие существенные допущения были использованы в этих моделях?

4. Чем предложенная Вами модель развития зародышей пор отличается от известных из литературы моделей?

5. Объясните преимущественное проявление флуоресценции в стенках пор в объеме пены.

Соискатель Ушакова Екатерина Владимировна ответила на заданные ей вопросы, и привела собственную аргументацию:

1. Отличие стохастической лазерной генерации от спонтанной флуоресценции проявляется в значительном уменьшении полуширины спектра флуоресценции с ростом лазерной накачки. Порогом перехода от спонтанной к стохастической флуоресценции считается значение интенсивности накачки, при котором полуширина спектра флуоресценции уменьшается в два раза по сравнению со спектром спонтанной флуоресценции. При этом вклад индуцированной составляющей флуоресценции во флуоресцентный отклик значительно возрастает.

2. На рисунке 2.6 представлены модельные зависимости безразмерного радиуса зародыша поры от безразмерного времени, полученные в результате компьютерного моделирования. Статистический разброс модельных данных практически отсутствует из-за детерминированного характера модели. В ходе статистической обработки экспериментальных данных определялись доверительные интервалы, внутри которых с вероятностью 0.9 находились измеряемые величины. Эти интервалы выборочно представлены на всех графиках, отображающих экспериментальные данные.

3. Хотелось бы отметить две разработанные феноменологические модели: модель развития зародышей пор в вязкой среде и модель многократного динамического рассеяния лазерного излучения в объеме пены. В модели развития зародышей пор используются следующие допущения: рассматриваются невзаимодействующие зародыши пор; динамика развития анализируется на относительно коротких временных интервалах, когда отношение текущего давления в реакторе к величине давления в момент возникновения зародыша несущественно отличается от 1. Основным допущением модели многократного динамического рассеяния лазерного излучения в объеме пены является оправданное для рассматриваемого случая допущение о статистической независимости парциальных рассеянных волн, распространяющихся в объеме пены по различным путям.

4. Разработанная модель развития зародышей пор в вязкой среде учитывает особенности поведения среды, заполняющей расширяющуюся пору (углекислого газа) вблизи критической точки, где ее плотность зависит от текущего давления существенно

нелинейным образом. В известных из литературы моделях развития зародышей пор в вязкой среде подобный эффект не рассматривается.

5. Доминирующий флуоресцентный отклик из стенок пор синтезированной флуоресцирующей пены обусловлен как высокой концентрацией флуорофора в стенках, так и существованием квази-волноводного эффекта увеличения времени пребывания как квантов накачки, так и флуоресценции в стенках. Это было показано нами в результате анализа экспериментальных данных о полуширине спектра флуоресценции в 4 главе.

На заседании 24.10.2024 г. диссертационный совет принял решение: за разработку, теоретическое обоснование и экспериментальную верификацию новых оптических методов зондирования существенно нестационарных случайно-неоднородных сред со сложной динамикой и структурой, каковыми являются полимерные пены, синтезируемые путем сверхкритического флюидного вспенивания, с использованием эффектов многократного динамического рассеяния лазерного излучения и возбуждения индуцированной составляющей флуоресцентного отклика при лазерной накачке насыщенных флуорофором пен, присудить Ушаковой Екатерина Владимировне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. - Оптика.

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из которых 5 членов диссертационного совета, участвующих в интерактивном режиме, в том числе 7 докторов наук по специальности 1.3.6. - Оптика из 21 члена списочного состава совета проголосовали:

За – 16 , против – 0, воздержались – 0.

Отзыв составил

Член диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Романова Елена Анатольевна

Председатель диссертационного совета

д.ф.-м.н., чл.-корр РАН



Тучин Валерий Викторович

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н., доцент

Генина Элина Алексеевна

24.10.2024 г.