

## УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГАОУ ВО

«Волгоградский государственный  
университет»,

доктор экономических наук, доцент



В.А. Дзедик

« 24 » 09 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Ушаковой Екатерины Владимировны «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика

Диссертационная работа Ушаковой Екатерины Владимировны посвящена разработке, экспериментальной верификации и применению современных оптических методов для диагностики эволюционирующих полимерных пен.

### Актуальность темы диссертационной работы

Использование лазерного излучения для анализа морфофункциональных свойств объектов со сложной структурой и динамикой является одним из наиболее востребованных диагностических подходов в современном материаловедении и биомедицине. В то же время применение методов лазерного зондирования случайно-неоднородных сред с использованием эффекта многократного динамического рассеяния лазерного излучения в значительной степени ограничивается требованиями слабой нестационарности зондируемых объектов и наличия априорной информации о характере микроскопической динамики рассеивающих центров в объектах.



Соответственно, полученные в ходе выполнения диссертационной работы теоретические и экспериментальные результаты, позволившие предложить метод синтеза пространственно-временных спекл-текстур и оценки среднего времени жизни динамических спеклов для характеристики микроскопической динамики рассеивающих центров, являются новым существенным вкладом в спекл-корреляционную диагностику случайно-неоднородных сред, позволяющим существенно расширить ее функциональные возможности.

С другой стороны, рассмотренные в работе диагностируемые объекты (синтезируемые с использованием сверхкритического флюидного вспенивания биорезорбируемые полимерные пены) представляют собой прототипы тканеинженерных конструкторов (скаффолдов), широко применяемых в настоящее время в регенеративной медицине и тканевой инженерии. Внедрение разработанных в диссертации диагностических методов в технологию синтеза скаффолдов позволит повысить эффективность синтеза в части получения биорезорбируемых тканеинженерных конструкторов на основе биорезорбируемых полимеров с требуемыми морфофункциональными свойствами.

Таким образом, тема диссертационного исследования несомненно является актуальной и соответствующей современным тенденциям развития в предметной области.

**Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов** заключается в следующем.

1. Разработан и верифицирован в экспериментах новый метод анализа динамики межфазных границ в эволюционирующих полимерных пенах. Метод основан на оценке среднего времени жизни динамических спеклов в флуктуирующем поле многократно рассеянного лазерного излучения, отображаемом в виде набора пространственно-временных спекл-текстур (ПВСТ).

2. Разработана феноменологическая модель многократного рассеяния лазерного излучения в объеме расширяющейся пены, в рамках которой впервые установлена связь между временем существования динамических спеклов в поле рассеянного лазерного излучения и параметрами, описывающими динамику расширения, а именно текущими значениями объема пены и его первой производной по времени.

3. Впервые установлено, что на стадии быстрого расширения полимерной пены происходит дополнительное формирование зародышей пор в полимерной составляющей. Соответственно, кратность рассеяния зондирующего излучения в объеме пены увеличивается по сравнению со случаем медленного расширения пены. Анализ получаемых пространственно-временных спекл-текстур показывает, что средний наклон треков, ассоциируемых с отдельными спеклами, к временной оси в случае быстрого расширения существенно меньше. Это свидетельствует о доминировании режима «кипения» над трансляционным движением в динамике спеклов.

4. Впервые установлено существенное влияние квази-волноводного режима распространения излучения накачки и флуоресцентного отклика в стенках пор на эффективность возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции при лазерной накачке насыщенных флуорофором полимерных пен в полосе поглощения флуорофора. Соответственно, среднее время жизни квантов накачки и флуоресценции в объеме пены возрастает по сравнению со случаем распространения излучения в макроскопически однородной рассеивающей среде с такими же оптическими характеристиками.

#### **Практическая значимость работы и полученных результатов**

1. Предложен метод анализа микроскопической динамики рассеивающих центров в нестационарных средах, основанный на синтезе набора пространственно-временных спекл-текстур на различных стадиях эволюции



зондируемой среды и оценках выборочных средних значений времени жизни динамических спеклов по синтезированным спекл-текстурам. Метод применим для анализа процессов формирования структуры различных существенно нестационарных многофазных систем в отсутствие априорной информации о типе микроскопической динамики рассеивающих центров.

2. Разработан метод оценки эффективности возбуждения индуцированной составляющей флуоресценции в случайно-неоднородных флуоресцирующих средах на основе анализа зависимости полуширины спектра флуоресценции от интенсивности лазерной накачки. Метод может быть применен для исследования особенностей переноса излучения в средах со сложной структурой, приводящих к возрастанию среднего времени нахождения квантов флуоресценции в среде.

3. Разработан и верифицирован в экспериментах комплекс лабораторных методов, а также их инструментально-программное и методическое обеспечение, позволяющие анализировать структуру полимерных пен на различных стадиях их синтеза. Результаты разработки могут быть применены в технологиях синтеза пеноподобных материалов с оптическим контролем состояния синтезируемых материалов в различных областях современной науки и техники.

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по образовательному направлению "Техническая физика", а также аспирантов, обучающихся по научным специальностям "Оптика" и "Лазерная физика". Внедрение осуществлено путем модернизации специальных курсов лекций и постановки новых учебно-исследовательских работ в специальных практикумах.

### **Объем и структура диссертации**

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы

представлено на 115 страницах, 31 рисунке и в 2 таблицах. Список источников содержит 123 наименования.

### Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные решаемые задачи, описаны научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные результаты и защищаемые положения.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния исследований в области диагностики полимерных пен и пеноподобных материалов. Обсуждены основные методы, используемые для анализа структуры и динамики этих материалов. Выявлены преимущества и ограничения существующих методов; обоснована цель и основные решаемые задачи.

Во **второй главе** представлены результаты разработки лабораторного комплекса для синтеза высокопористых полимерных матриц с использованием технологии сверхкритического флюидного вспенивания с двуокисью углерода в качестве вспенивающего агента. Представлены результаты теоретического моделирования формирования и развития зародышей пор на стадии нуклеации, предшествующей интенсивному формированию пены в процессе убывания давления в сверхкритическом реакторе. Приведены результаты экспериментальной верификации разработанной теоретической модели и отмечено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных. Обсуждены неизвестные ранее фундаментальные особенности формирования и развития зародышей пор (существование «мертвой зоны» в окрестностях критического давления вспенивающего агента, автомоделный характер развития зародышей).

В **третьей главе** обсуждены физические основы спекл-корреляционной диагностики применительно к исследованию эволюционирующих полимерных пен. Представлена феноменологическая модель многократного динамического рассеяния лазерного излучения в нестационарных многократно рассеивающих системах, на основе которой установлена



инвариантность среднего времени жизни динамических спеклов по отношению к типу микроскопической динамики рассеивающих центров. Обоснован оригинальный метод синтеза пространственно-временных спекл-текстур на основе обработки видеорядов, отображающих флуктуирующее спекл-модулированное световое поле. Разработана лабораторная установка для спекл-корреляционного мониторинга процесса вспенивания полимеров. Приведены результаты экспериментальной верификации разработанного метода и обсуждены особенности спекл-текстур, получаемых при зондировании эволюционирующих в различных условиях полилактидных пен излучением He-Ne лазера. Разработана феноменологическая модель, устанавливающая взаимосвязь среднего времени динамических спеклов с текущим объемом расширяющейся пены, первой производной объема по времени и числом пор в объеме пены. Результаты экспериментальной верификации модели в экспериментах с различной скоростью сброса давления реакторе при вспенивании позволили установить адекватность разработанной модели.

**Четвертая глава** посвящена исследованию флуоресцентного отклика насыщенных флуорофором (родамином 6Ж) полилактидных пен в зависимости от интенсивности импульсно-периодической лазерной накачки на длине волны 532 нм. Проведен анализ особенностей спектров флуоресцентного отклика синтезированных полилактидных пен, предварительно насыщенных флуорофором, в условиях перехода от чисто спонтанной флуоресценции к выраженному вкладу индуцированной составляющей при возрастании интенсивности накачки. Разработана качественная модель, интерпретирующая наблюдаемые в экспериментах особенности как результат квази-волноводного распространения излучения накачки и флуоресценции в стенках пор.

В **Заключении** обобщены основные результаты проведенного диссертационного исследования.

**По содержанию и оформлению работы сформулированы следующие замечания.**

1. В описании прототипа разработанной лабораторной системы (раздел 2.2) следовало бы более подробно описать характеристики используемых КМОП камер (разрешающую способность, размер пикселей, динамический диапазон по интенсивности, максимальное значение кадровой частоты). Эти характеристики играют ключевую роль при регистрации динамических изображений со сложной структурой.
2. В разделе 3.1 не приведена информация об ограничениях применимости гибридного подхода при описании переноса излучения в случайно-неоднородных средах. Можно предположить, что при переходе от режима многократного рассеяния зондирующего излучения к режиму однократного рассеяния основное соотношение диффузионно-волновой спектроскопии (выражение 3.1) становится некорректным. Подобные ограничения следовало бы обсудить в тексте диссертационной работы.
3. Представленная на рис. 3.10 г пространственно-временная спекл-текстура перенасыщена (количество белых пикселей, соответствующих уровню яркости 255 в восьмибитном формате, очень велико). Очевидно, что подобное перенасыщение приводит к существенным отклонениям статистики яркости пикселей в регистрируемых изображениях от реальной статистики значений интенсивности спекл-поля. Как влияет эффект насыщения яркости пикселей на количественный анализ формируемых спекл-текстур?
4. В раздел «Заключение» следовало бы добавить фрагмент текста с обсуждением перспектив дальнейших исследований по представленной в диссертационной работе тематике.
5. В качестве замечания по оформлению диссертации следует отметить отсутствие единообразия представления символьных выражений и уравнений в тексте, а также рисунков. Например, в главе 2 все формулы представлены жирным шрифтом, в то время как в остальных разделах – обычным



шрифтом. Различаются размеры используемых шрифтов. Обозначения осей на графиках даются то на русском, то на английском языках.

Следует отметить, что эти замечания имеют рекомендательных характер и не снижают общего положительного впечатления от работы. В целом необходимо отметить, что диссертационная работа Ушаковой Е.В. является законченным научным исследованием, направленным на решение современных и актуальных задач оптической диагностики случайно-неоднородных сред со сложной динамикой и структурой. Результаты проведенного диссертационного исследования опубликованы в 14 научных статьях, 7 из которых – изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (в том числе и в журналах, относящихся к первому и второму квартилям по Web of Sciences). Получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Все публикации в полной мере отражают содержание работы. Результаты работы в достаточной степени апробированы путем представления докладов на российских и международных конференциях.

Проверка степени оригинальности диссертационной работы и доли содержащихся в ней заимствований в системе «Антиплагиат» показали, что с учетом приоритета по времени первичного опубликования результатов работы Ушаковой Е.В. (в соавторстве) степень оригинальности диссертационной работы в процентном отношении составляет 89.74 %. Степень оригинальности автореферата составляет 95.73%.

### **Заключение**


Таким образом, можно сделать вывод, что по актуальности решаемых задач, объему проведенных исследований, уровню анализа их результатов, и научной значимости этих результатов диссертация Ушаковой Е.В. является законченным научным исследованием. Защищаемые научные положения и результаты работы в достаточной степени обоснованы. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.



На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертация «Спекл-корреляционная и флуоресцентная диагностика эволюционирующих полимерных пен: развитие физических принципов и инструментальная реализация» является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации, Ушакова Екатерина Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании кафедры радиофизики ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», протокол заседания № 6 от 13 сентября 2024 г.

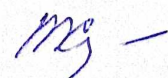
Заведующий кафедрой радиофизики  
ФГАОУ ВО «Волгоградский  
государственный университет»,  
к.ф.-м.н., доцент

 А.Л. Якимец

Отзыв составили:  
профессор кафедры радиофизики,  
д.ф.-м.н., профессор

 К.М. Фирсов

доцент кафедры радиофизики,  
к.ф.-м.н., доцент

 В.Н. Храмов

