



УДК 535.36, 53.09

ПРОСТРАНСТВЕННО-СЕЛЕКТИВНАЯ СПЕКЛ-КОРРЕЛОМЕТРИЯ КИНЕТИКИ ТЕМПЕРАТУРНО-ЗАВИСИМЫХ ПРОЦЕССОВ ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ

А.А. Исаева^а, Е.А. Исаева^а, А.В. Пантюков^а

^а Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, 410054, Российская Федерация

Адрес для переписки: isanna.1987@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 01.10.17, принята к печати 01.11.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1011-1017

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Исаева А.А., Исаева Е.А., Пантюков А.В. Пространственно-селективная спекл-коррелометрия кинетики температурно-зависимых процессов гелеобразования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1011–1017. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1011-1017

Аннотация

Показано применение метода спекл-коррелометрии полного поля с использованием локализованного источника зондирующего излучения и пространственной кольцевой фильтрации для исследования динамических термически активированных процессов в гелеподобных структурах, содержащих субмикронные частицы и наночастицы. Спекл-модулированные изображения содержат информацию о процессах, протекающих внутри исследуемой среды, поэтому эффективно применяются в биомедицине и материаловедении. Процесс перехода из лиозоля в гель рассмотрен в средах на основе водного раствора технического желатина (объемная доля технического желатина 0,28%), содержащего частицы диоксида титана TiO₂ (объемная доля частиц TiO₂ равна 0,1% и 0,01%) и водного раствора пищевого желатина (объемная доля пищевого желатина 0,3%) с включениями нанонаночастиц диоксида титана TiO₂ (объемная доля частиц TiO₂ равна 0,1% и 0,01%). Температура среды в ходе структурного превращения системы «золь-гель» варьировалась в пределах от 50 до 25 °С. Для оценки экспериментально полученных меняющихся в пространственно-временном интервале флуктуаций интенсивности обратно рассеянных спекл-полей использован корреляционный метод анализа и формализм структурных функций Колмогорова. Получены оценки температур, при которых происходит активация процесса перехода от лиозоля к гелю для технического и пищевого желатинов. Подобный подход может быть успешно применен для исследования динамических систем, например, демонстрации броуновского движения частиц.

Ключевые слова

рассеяние, спеклы, корреляционная функция, структурная функция, гидрогели

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, РФФИ (грант № 16-02-00458). Коллектив авторов выражает благодарность И.П. Гурову, Н.Б. Маргарянцу и М.А. Волынскому за предоставленные образцы гидрогеля и обсуждение концепций исследования.

SPATIALLY SELECTED SPECKLE-CORRELOMETRY OF TEMPERATURE DEPENDENT GELATION KINETICS

А.А. Isaeva^а, Е.А. Isaeva^а, А.В. Pantyukov^а

^а Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation

Corresponding author: isanna.1987@mail.ru

Article info

Received 01.10.17, accepted 01.11.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1011-1017

Article in Russian

For citation: Isaeva A.A., Isaeva E.A., Pantyukov A.V. Spatially selected speckle-correlometry of temperature dependent gelation kinetics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1011–1017 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1011-1017

Abstract

The paper presents the application of speckle correlometry method with the spatial ring filtration of back scattered field with the usage of localized radiation source for the study of dynamic thermally activated processes in gel-like structures containing submicron particles and nanoparticles. Speckle-modulated images contain information about the processes taking

place inside the investigated medium; therefore, they are effectively used in biomedicine and materials science. The transformation process from lysol to gel was considered in media based on technical gelatin dissolved in water with weight fraction equal to 0.28% containing titanium dioxide nanoparticles TiO_2 (volume fraction of particles is equal to 0.1% and 0.01%) and media based on food gelatin dissolved in water with weight fraction equal to 0.3% containing titanium dioxide nanoparticles TiO_2 (volume fraction of particles is equal to 0.01% and 0.01%). The temperature of the medium during the structural transformation of "sol-gel" system was changed from 50 to 25°C. To estimate the experimentally obtained distribution of space-time intensity fluctuations of backscattered speckle fields, the correlation analysis and the formalism of Kolmogorov structure functions were used. The estimations of activation temperatures for the "sol-gel" transition process for technical and food gelatin were obtained. This approach can be successfully applied for the study of dynamic systems, for example, the demonstration of Brownian particle movements.

Keywords

scattering, speckles, correlation function, structural function, hydrogels

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the grant No. 16-02-00458 from the Russian Foundation for Basic Research. The authors are thankful to Gurov I.P., Margaryanc N.B. and Volynsky M.A. for the providing of hydrogel samples and the discussing of the research concepts.

Введение

Различные гидрогели, в том числе на основе желатина, находят широкое применение в биомедицинских приложениях, таких как доставка лекарств, инкапсуляция клеток и тканевая инженерия [1]. Желатиновые гидрогели используются в качестве фантомов биотканей для развития методов визуализации патологически измененных и здоровых тканей груди [2–3], поэтому актуальным является вопрос анализа структурных и функциональных свойств подобных систем в процессе их синтеза. Методы диффузионно-волновой спектроскопии (ДВС), активно развивающиеся в последние несколько десятилетий, позволяют анализировать структурные особенности сложных дисперсных систем [4–7]. Метод ДВС впервые был предложен Д. Пайном в 1988 г. [8]. ДВС имеет ряд модификаций, среди которых ДВС с использованием низкокогерентного интерферометра [9], метод LASCA (Laser speckle contrast analysis) [10] и т.д. Методы ДВС позволяют анализировать информацию о морфологических особенностях двухфазных систем [11–13], проводить мониторинг и визуализировать микрогемодинамику и потоки других тканевых жидкостей в поверхностных слоях нормальных и патологических биотканей [14–16].

В классических схемах анализа подвижности рассеивающих центров с использованием эффекта многократного динамического рассеяния света применяется «одноточечный» принцип регистрации рассеянного зондирующего излучения, когда апертура детектора соизмерима с характерным размером области когерентности рассеянного светового поля (спекла). В то же время развивающиеся в последние два десятилетия методы спекл-коррелометрии полного поля и многоспекловой ДВС [17] обладают несомненным преимуществом по сравнению с традиционной «одноточечной» ДВС. Это преимущество обусловлено робастностью оценок корреляционных характеристик рассеянного света вследствие использования процедур усреднения как в пространственной, так и во временной областях.

Статистический и корреляционный анализ пространственно-временных флуктуаций интенсивности многократно рассеянного средой с динамическими включениями лазерного излучения дает возможность анализировать микроскопические движения рассеивателей среды с различной динамикой. В зависимости от скорости процесса массопереноса время корреляции флуктуаций интенсивности изменяется в пределах 0,01–1 с, при этом метод спекл-коррелометрии полного поля позволяет осуществлять анализ коротких выборок данных и получить робастные оценки анализируемого параметра с минимальным разбросом по значениям.

Выбор наиболее эффективного алгоритма обработки спекл-модулированных полей для среды с данными физическими структурными свойствами позволяет увеличивать надежность и производительность при обработке данных и повысить информативность получаемых данных.

Методика эксперимента

В работе представлены результаты исследования термически зависимой динамики образования гелеподобных структур на основе спекл-коррелометрии полного поля с использованием локализованного источника зондирующего излучения и пространственной кольцевой фильтрации спекл-модулированных изображений поверхности объекта в плоскости изображения. Был исследован процесс перехода «золь-гель» в средах на основе водного раствора технического желатина (объемная доля технического желатина 0,28%, марка 310/70), содержащего частицы диоксида титана (TiO_2) с объемными долями частиц, равными 0,1% и 0,01% (наночастицы рутила серии SACHTLEBEN RDI-S, средний размер частиц 150 нм) и водного раствора пищевого желатина (объемная доля пищевого желатина 0,3%) с включениями 0,01% нанопорошка TiO_2 (наночастицы рутила серии Sigma Aldrich № 20 637254, средний размер частиц 25 нм). Температура среды в ходе структурного превращения системы «золь-гель» варьировалась в пределах от 50 до 25 °С.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В качестве источника излучения (1) использовался гелий-неоновый лазер ГН-5П ($\lambda = 632 \text{ нм}$). Когерентное излучение фокусировалось на поверхность исследуемого объекта с помощью микрообъектива МИМ-9 (2) с фокусным расстоянием $F = 16 \text{ мм}$ и числовой апертурой $NA = 0,30$. В ходе проводимых экспериментов последовательности спекл-модулированных изображений зондируемого участка поверхности исследуемой среды (3) регистрировались КМОП-камерой: для исследования среды на основе технического желатина использовалась камера ThorlabsDCC1545M (4) (число пикселей в матрице 1280×1024 , 8 бит/пиксель, линейные размеры пикселя $5,2 \times 5,2$) с объективом ($F = 50 \text{ мм}$), для исследования среды на основе пищевого желатина использовалась камера Optonics CR3000×2 (число пикселей в матрице 1696×1710 , 8 бит/пиксель, линейные размеры пикселя $8 \times 8 \text{ мм}$) с объективом ($F = 160 \text{ мм}$). Изображение спекл-картины, формирующейся на поверхности исследуемого образца, и локализация программно-реализуемого пространственного кольцевого фильтра показаны на рис. 1 (5). Регистрация спекл-модулированных последовательностей изображений происходила таким образом, чтобы значения кадровой частоты для захвата и воспроизведения видеоданных были одинаковыми для всех серий экспериментов и достаточными для временного разрешения процессов, протекающих в исследуемом объекте. Обработка и программная реализация кольцевой фильтрации полученных в ходе эксперимента видеоизображений поверхности объекта выполнялись с помощью специально разработанного программного обеспечения в среде программирования C++.

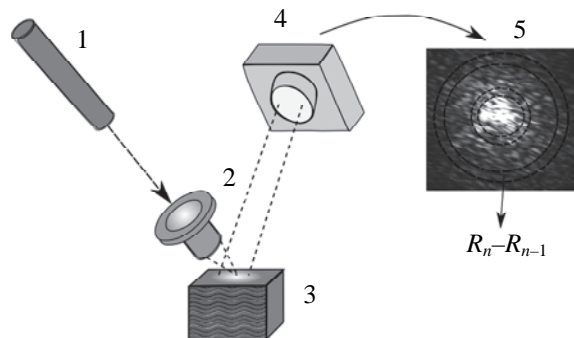


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – источник излучения – гелий-неоновый лазер (632 нм, ГН-5П); 2 – микрообъектив (МИМ-9); 3 – исследуемый объект; 4 – КМОП-камера с объективом; 5 – регистрируемое изображение и локализация кольцевого детектора с заданными значениями внешнего и внутреннего радиусов $R_n - R_{n-1}$.

Алгоритм обработки спекл-модулированных изображений

Зарегистрированные КМОП-камерой видеофайлы со спекл-модулированными изображениями поверхности исследуемого образца подвергались покадровому разбиению. Каждый кадр последовательности видеоизображения, содержащий набор пикселей, преобразовывался в матрицу, каждому элементу которой $I(i, j)$ присваивалось численное значение интенсивности в соответствии со шкалой градаций серого цвета – от 0 до 255 градаций серого. Локализация кольцевых зон осуществлялась исходя из определения профиля интенсивности кадра в горизонтальном и вертикальном направлениях и нахождения положения центра анализируемой кольцевой зоны с заданным значением радиуса R . Дальнейший анализ сводился к установлению взаимосвязи характеристик исследуемой среды и статистических характеристик флуктуаций интенсивности спекл-модулированных изображений.

Для оценки меняющихся в пространственно-временных интервалах флуктуаций интенсивности зарегистрированного обратно рассеянного спекл-поля использовались корреляционный метод анализа и формализм структурных функций Колмогорова. Нормированная корреляционная функция флуктуаций интенсивности обратно рассеянного спекл-поля для выбранного пикселя матрицы (номер строки i и столбца j) из последовательности Δk изображений вычислялась по формуле

$$g_2(i, j, \Delta k) = G_2(i, j, \Delta k) / G_2(i, j, 0),$$

где

$$G_2(i, j, \Delta k) = \sum_{k=k_1}^{k_2} [I^{k+\Delta k}(i, j) - \bar{I}(i, j)] \cdot [I^k(i, j) - \bar{I}(i, j)].$$

Среднее значение интенсивности заданного пикселя рассчитывалось по формуле

$$\bar{I}(i, j) = \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{I^k(i, j)}{k_2 - k_1},$$

где $I^k(i, j)$ – текущее значение интенсивности, соответствующее i, j – положению пикселя матрицы (номер строки i и столбца j); k_1, k_2, \dots, k_n – номер кадра в последовательности n зарегистрированных спекл-модулированных изображений. По полученным значениям $g_2(i, j, t, \Delta k)$ вычислялись значения времени корреляции флуктуаций интенсивности спеклов τ_c . Время корреляции τ_c – это временной интервал, за который подвижный рассеиватель внутри среды смещается на расстояние порядка длины волны зондирующего излучения λ .

Второй порядок структурной функции флуктуаций интенсивности может быть определен как

$$D_I(i, j, \Delta k) = \sum_{k=k_1}^{k_2} \left((I^k(i, j) - \bar{I}(i, j)) - (I^{k+\Delta k}(i, j) - \bar{I}(i, j)) \right)^2.$$

Структурная функция соотносится с корреляционной функцией как

$$D_I(i, j, \Delta k) = 2(G_2(i, j, 0) - G_2(i, j, \Delta k)).$$

Асимптотическое поведение временной структурной функции $D_I(\tau) \approx T^{(2-\alpha)}\tau^\alpha$ описывается параметрами топотезы T и экспоненциального фактора α [18, 19], где τ – временной интервал. Топотеза определяется как интервал между двумя временами, характеризующими две точки из последовательности значений интенсивности, для которых средний наклон хорды равен 1 (в соответствующем образом выбранной системе координат). Показатель α связан с коэффициентом Херста H как $\alpha = 2(2 - H)$. Подобное описание позволяет охарактеризовать поле обратно рассеянное случайно блуждающими броуновскими частицами.

Экспериментальные результаты

Процесс гелеобразования сопровождается послыпным изменением вязкости в среде. На первых этапах процесса гелеобразования поверхностные и приповерхностные слои желатинового лиозоля переходят в гель, при этом переход сопровождается отверждением среды и, соответственно, замедлением броуновского движения частиц. Полученные зависимости времен корреляции флуктуаций интенсивности от температуры исследуемой среды показали, что для малых радиусов детекторов, осуществляющих селекцию излучения рассеянного верхними, стационарными слоями, характерны большие времена корреляции и медленная динамика соответственно. В то же время анализ времен корреляции флуктуаций интенсивности для больших радиусов детекторов, которые осуществляют селекцию излучения рассеянного нижележащими слоями с активной динамикой, показал характерные малые времена корреляции.

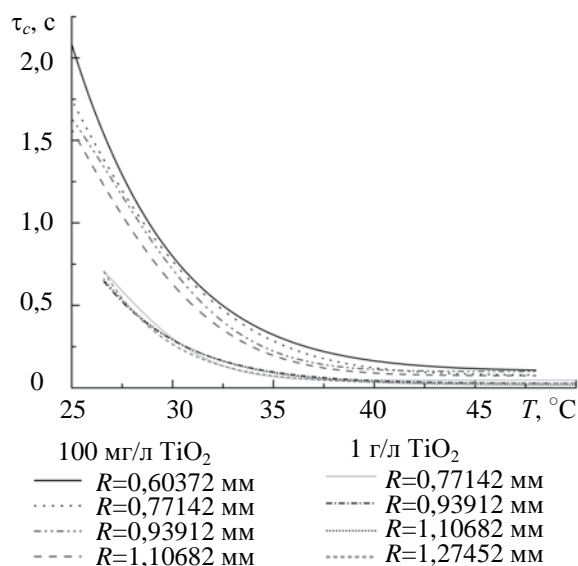


Рис. 2. Зависимости времени корреляции от температуры застывания гелеподобной среды (0,28% водного раствора технического желатина) для различных радиусов кольцевого детектора: $R = 0,60372$ мм, $R = 0,77142$ мм, $R = 0,93912$ мм и $R = 1,10682$ мм для объемной доли диоксида титана 0,01%; $R = 0,77142$ мм, $R = 0,93912$ мм, $R = 1,10682$ мм и $R = 1,27452$ мм для объемной доли диоксида титана 0,1%

Для анализа процесса перехода «золь-гель» пищевого желатина использовалась структурная функция флуктуаций интенсивности обратно рассеянного спекл-модулированного поля $D_I(\tau)$, для процесса перехода «золь-гель» технического желатина – корреляционная функция флуктуаций интенсивности

сти обратно рассеянного спекл-модулированного поля $G_f(\tau)$, так как процесс полимеризации протекает на больших временных интервалах, а структурная функция подходит для анализа кинетики процессов на малых временных интервалах. Время корреляции τ_c и угол наклона структурной функции α , полученные по рассчитанным зависимостям структурной и корреляционной функций флуктуаций интенсивности обратно рассеянного спекл-модулированного поля, показаны на рис. 2, 3 и 4. Как видно, время корреляций флуктуаций интенсивности поля, рассеянного гелеподобной средой на основе технического желатина с объемной долей диоксида титана 0,01%, достигает асимптотического значения при температуре $T \approx 40 - 41^\circ\text{C}$. Время корреляций флуктуаций интенсивности поля, рассеянного гелеподобной средой на основе технического желатина с объемной долей диоксида титана 0,1%, достигает асимптотического значения при $T \approx 36 - 37^\circ\text{C}$.

Временные зависимости структурной функции флуктуаций интенсивности характеризуются различными показателями α . При этом для броуновского движения характерны значения $\alpha \approx 1$, а для стационарных систем – $\alpha \approx 0,5$ [19]. Зависимости структурных функций флуктуаций интенсивности поля, рассеянного гелеподобной средой на основе пищевого желатина, для температур $T \approx 46,5^\circ\text{C}$ и $T \approx 50^\circ\text{C}$ демонстрируют скачок экспоненциального фактора α на $\Delta\alpha \approx 0,195$.

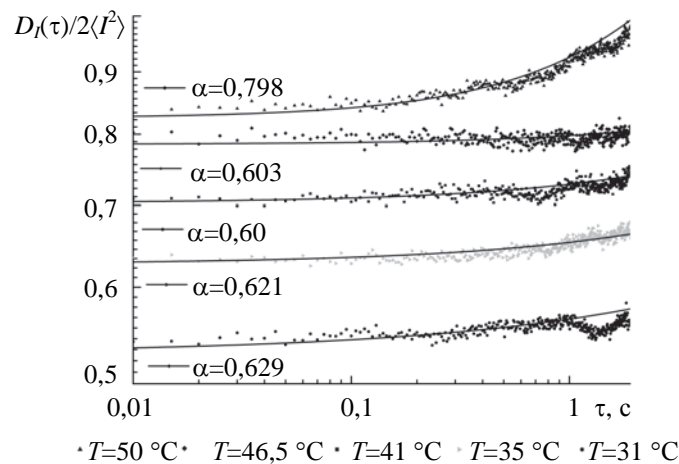


Рис. 3. Временная структурная функция флуктуаций интенсивности обратно рассеянного средой (0,3% водного раствора пищевого желатина с объемной долей диоксида титана 0,01%) излучения для радиуса кольцевого детектора $R = 1,27452$ мм в процессе перехода «золь-гель» для определенной температуры и соответствующее значение экспоненциального фактора: $T = 50^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,798$; $T = 46,5^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,603$; $T = 41^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,6$; $T = 35^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,621$ и $T = 31^\circ\text{C}$, $\alpha = 0,629$

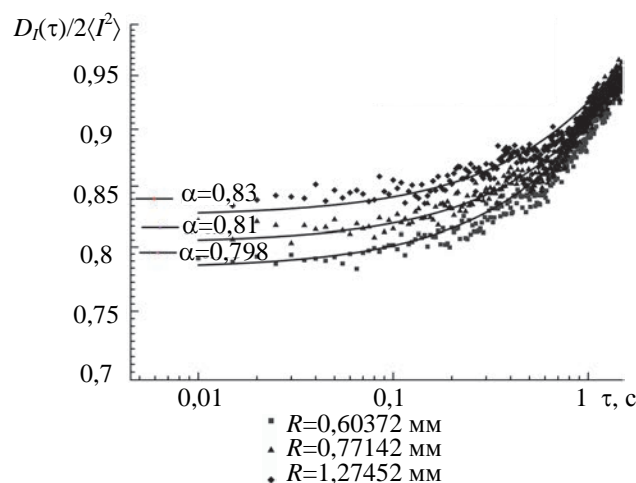


Рис. 4. Временная структурная функция флуктуаций интенсивности обратно рассеянного средой (0,3% водного раствора пищевого желатина с объемной долей диоксида титана 0,01%) излучения для температуры $T = 50^\circ\text{C}$ для различных радиусов кольцевого детектора и соответствующего значения экспоненциального фактора: $R = 0,60372$ мм, $\alpha = 0,83$; $R = 0,77142$ мм, $\alpha = 0,81$ и $R = 1,27452$ мм, $\alpha = 0,798$.

Заключение

Анализ экспериментально полученных зависимостей корреляционной и структурной функций флуктуаций интенсивности обратно рассеянного слоями гидрогелей излучения показал, что процесс полимеризации в средах на основе технического желатина имеет большую временную длительность, чем в среде на основе пищевого желатина, что обусловлено различными вязкоупругими свойствами вышеуказанных сред.

При этом рассчитанные времена корреляций флуктуаций интенсивности для технического желатина имеют численное значение в пределах от 0,1 до 2 с для всех радиусов кольцевых детекторов. По полученным данным видно, что процесс перехода от лиозоля к гелю технического желатина с объемной долей диоксида титана 0,01% активируется при температуре $T \approx 40^\circ\text{C}$, технического желатина с объемной долей диоксида титана 0,1% активируется при температуре $T \approx 36^\circ\text{C}$.

Для анализа быстро протекающего процесса полимеризации пищевого желатина необходимо использовать структурную функцию флуктуаций интенсивности обратно рассеянного спекл-поля. Основным характеристическим параметром структурной функции флуктуаций интенсивности является экспоненциальный фактор, оценка которого дает информацию о подвижности рассеивателей внутри среды на этапах формирования гелеподобной структуры. Процесс перехода пищевого желатина от лиозоля к гелю активируется в диапазоне температур $T \approx 46,5 - 50^\circ\text{C}$.

Таким образом, подходы на основе анализа корреляционной и структурной функции флуктуаций интенсивности обратно рассеянного спекл-поля могут быть использованы для исследования процессов полимеризации, протекающих в средах на основе гидрогелей.

Литература

- Li Y.C., Rodrigues J.A., Tomas H.A. Injectable and biodegradable hydrogels: gelation, biodegradation and biomedical applications // *Chemical Society Reviews*. 2012. V. 41. N 6. P. 2193–2221. doi: 10.1039/c1cs15203c
- Mashal A., Gao F., Hagness S.C. Heterogeneous anisotropic phantoms with realistic dielectric properties for microwave breast imaging experiments // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2011. V. 53. N 8. P. 1896–1902. doi: 10.1002/mop.26128
- Cassano R., Mellace S., Pellegrino M., Ricchio E., Mauro L., Ando S., Picci N., Trombino S.D.A. Biocompatible targeting hydrogels for breast cancer treatment // *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*. 2016. V. 16. N 8. P. 651–657.
- Weitz D.A., Zhu J.X., Durian D.J., Gang Hu, Pine D.J. Diffusing wave spectroscopy: the technique and some applications // *Physica Scripta*. 1993. V. T49. P. 610–621. doi: 10.1088/0031-8949/1993/T49B/040
- Scheffold F. Particle sizing with diffusing wave spectroscopy // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2002. V. 23. N 5. P. 591–599. doi: 10.1081/DIS-120015365
- Mason T.G., Gang H., Weitz D.A. Diffusing-wave-spectroscopy measurements of viscoelasticity of complex fluids // *Journal of the Optical Society of America A*. 1997. V. 14. N 1. P. 139–49. doi: 10.1364/JOSAA.14.000139
- Routh A.F., Russel W.B. Deformation mechanisms during latex film formation: experimental evidence // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2001. V. 40. N 20. P. 4302–4308.
- Pine D.J., Weitz D.A., Chaikin P.M., Herbolzheimer E. Diffusing wave spectroscopy // *Physical Review Letters*. 1988. V. 60. N 12. P. 1134–1137. doi: 10.1103/PhysRevLett.60.1134
- Boas D.A., Bizheva K.K., Siegel A.M. Using dynamic low-coherence interferometry to image Brownian motion within highly scattering media // *Optics Letters*. 1998. V. 23. N 5. P. 319–321.
- Briers J.D. Webster S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow // *Journal of Biomedical Optics*. 1996. V. 1. N 2. P. 174–179.
- Vera M.U., Saint-Jalmes A., Durian D.J. Scattering optics of foam // *Applied Optics*. 2001. V. 40. N 24. P. 4210–4214. doi: 10.1364/AO.40.004210
- Durian D.J., Weitz D.A., Pine D.J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics // *Science*. 1991. V. 252. N 5006. P. 686–688.
- Zimnyakov D.A., Isaeva A.A., Isaeva E.A., Ushakova O.V.,

References

- Li Y.C., Rodrigues J.A., Tomas H.A. Injectable and biodegradable hydrogels: gelation, biodegradation and biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41, no. 6, pp. 2193–2221. doi: 10.1039/c1cs15203c
- Mashal A., Gao F., Hagness S.C. Heterogeneous anisotropic phantoms with realistic dielectric properties for microwave breast imaging experiments. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, vol. 53, no. 8, pp. 1896–1902. doi: 10.1002/mop.26128
- Cassano R., Mellace S., Pellegrino M., Ricchio E., Mauro L., Ando S., Picci N., Trombino S.D.A. Biocompatible targeting hydrogels for breast cancer treatment. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 2016, vol. 16, no. 8, pp. 651–657.
- Weitz D.A., Zhu J.X., Durian D.J., Gang Hu, Pine D.J. Diffusing wave spectroscopy: the technique and some applications. *Physica Scripta*, 1993, vol. T49, pp. 610–621. doi: 10.1088/0031-8949/1993/T49B/040
- Scheffold F. Particle sizing with diffusing wave spectroscopy. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2002, vol. 23, no. 5, pp. 591–599. doi: 10.1081/DIS-120015365
- Mason T.G., Gang H., Weitz D.A. Diffusing-wave-spectroscopy measurements of viscoelasticity of complex fluids. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, vol. 14, no. 1, pp. 139–49. doi: 10.1364/JOSAA.14.000139
- Routh A.F., Russel W.B. Deformation mechanisms during latex film formation: experimental evidence. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2001, vol. 40, no. 20, pp. 4302–4308.
- Pine D.J., Weitz D.A., Chaikin P.M., Herbolzheimer E. Diffusing wave spectroscopy. *Physical Review Letters*, 1988, vol. 60, no. 12, pp. 1134–1137. doi: 10.1103/PhysRevLett.60.1134
- Boas D.A., Bizheva K.K., Siegel A.M. Using dynamic low-coherence interferometry to image Brownian motion within highly scattering media. *Optics Letters*, 1998, vol. 23, no. 5, pp. 319–321.
- Briers J.D. Webster S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow. *Journal of Biomedical Optics*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 174–179.
- Vera M.U., Saint-Jalmes A., Durian D.J. Scattering optics of foam. *Applied Optics*, 2001, vol. 40, no. 24, pp. 4210–4214. doi: 10.1364/AO.40.004210
- Durian D.J., Weitz D.A., Pine D.J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics. *Science*, 1991, vol. 252, no. 5006, pp. 686–688.

- Chekmasov S.P., Yuvchenko S.A. Analysis of the scatter growth in dispersive media with the use of dynamic light scattering // *Applied Optics*. 2012. V. 51. N 16. P. C62–C69. doi: 10.1364/AO.51.000C62
14. Зимняков Д.А., Хмара М.Б., Виленский М.А., Козлов В.В., Горфинкель И.В., Здражевский Р.А., Исаева А.А. Спекл-корреляционный мониторинг микрогемодинамики внутренних органов // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. № 6. С. 941–947.
 15. Boas D.A., Campbell L.E., Yodh A. Scattering and imaging with diffusing temporal field correlations // *Physical Review Letters*. 1995. V. 75. N 9. P. 1855–1858. doi: 10.1103/PhysRevLett.75.1855
 16. Boas D.A., Yodh A.G. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation // *Journal of Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1997. V. 14. N 1. P. 192–215.
 17. Viasnoff V., Lequeux F., Pine D.J. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy: a tool to study slow relaxation and time-dependent dynamics // *Review of Scientific Instruments*. 2002. V. 73. N 6. P. 2336–2344. doi: 10.1063/1.1476699
 18. Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Mishin A.A. Spatial speckle correlometry in applications to tissue structure monitoring // *Applied Optics*. 1997. V. 36. N 22. P. 5594–5607. doi: 10.1364/AO.36.005594
 19. Berry M.V. Diffractals // *Journal of Physics A*. 1979. V. 12. N 6. P. 781–797. doi: 10.1088/0305-4470/12/6/008
 13. Zimnyakov D.A., Isaeva A.A., Isaeva E.A., Ushakova O.V., Chekmasov S.P., Yuvchenko S.A. Analysis of the scatter growth in dispersive media with the use of dynamic light scattering. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 16, pp. C62–C69. doi: 10.1364/AO.51.000C62
 14. Zimnyakov D.A., Khmara M.B., Vilensky M.A., Kozlov V.V., Sadovoi A.V., Gorfinkel I.V., Zdrajevsky R.A., Isaeva A.A. Speckle-correlation monitoring of the microhemodynamics of internal organs. *Optics and Spectroscopy*, 2009, vol. 107, no. 6, pp. 891–897. doi: 10.1134/S0030400X09120091
 15. Boas D.A., Campbell L.E., Yodh A. Scattering and imaging with diffusing temporal field correlations. *Physical Review Letters*, 1995, vol. 75, no. 9, pp. 1855–1858. doi: 10.1103/PhysRevLett.75.1855
 16. Boas D.A., Yodh A.G. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation. *Journal of Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 1997, vol. 14, no. 1, pp. 192–215.
 17. Viasnoff V., Lequeux F., Pine D.J. Multispeckle diffusing-wave spectroscopy: a tool to study slow relaxation and time-dependent dynamics. *Review of Scientific Instruments*, 2002, vol. 73, no. 6, pp. 2336–2344. doi: 10.1063/1.1476699
 18. Zimnyakov D.A., Tuchin V.V., Mishin A.A. Spatial speckle correlometry in applications to tissue structure monitoring. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 22, pp. 5594–5607. doi: 10.1364/AO.36.005594
 19. Berry M.V. Diffractals. *Journal of Physics A*, 1979, vol. 12, no. 6, pp. 781–797. doi: 10.1088/0305-4470/12/6/008

Авторы

Исаева Анна Андреевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, 410054, Российская Федерация, isanna.1987@mail.ru

Исаева Елена Андреевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, 410054, Российская Федерация, 27isaeva@mail.ru

Пантюков Алексей Викторович – студент, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, 410054, Российская Федерация, alex.pantukoff@yandex.ru

Authors

Anna A. Isaeva – PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, isanna.1987@mail.ru

Elena A. Isaeva – PhD, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, 27isaeva@mail.ru

Aleksey V. Pantukov – student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, alex.pantukoff@yandex.ru