



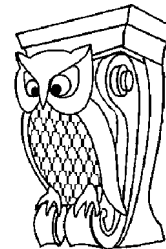
Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 220–228

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 220–228

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-220-228>

Научная статья
УДК 535.4



Спекл-коррелометрия как метод оценки динамического поведения вспененных жидкостей

Е. А. Исаева¹, А. А. Исаева¹, А. В. Пантюков¹, Д. А. Зимняков^{1,2}✉

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410071, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Институт проблем точной механики и управления РАН, Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24

Исаева Елена Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», 27isaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>

Исаева Анна Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>

Пантюков Алексей Викторович, аспирант кафедры «Физика», alex.pantukoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, ¹заведующий кафедрой «Физика»; ²главный научный сотрудник лаборатории проблем лазерной диагностики технических и живых систем, Институт проблем точной механики и управления РАН (Саратов), zimnyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

Аннотация. Двухфазные пеноподобные системы активно исследуются как теоретическими, так и экспериментальными методами на протяжении нескольких десятилетий. Интерес к ним обусловлен их широким применением в различных отраслях промышленности и биомедицины. Исследование газожидкостных пен в процессе их эволюции затрудняется тем, что они представляют собой сложные динамические системы с одновременным протеканием различных физических процессов: оствальдское созревание газовых пузырей, коалесценция газовых пузырей, синерезис пены, испарение жидкой составляющей. Кинетика этих процессов взаимосвязана и определяется такими параметрами пены, как дисперсность, реологические свойства жидкой составляющей пены и объемная доля жидкой составляющей пены, связанная со средним размером пузырей, удельной поверхностью пены, толщиной перегородок между газовыми пузырями и формой газовых ячеек и каналов. Несмотря на существующие достижения в области исследований поведения нестабильных и метастабильных двухфазных пеноподобных систем, развитие методов диагностики структурной эволюции газожидкостных пен в процессе их старения в режиме реального времени с учетом изменения объемных свойств системы является актуальной задачей. В рамках данной работы проводится сравнительный анализ поведения времени корреляций флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения на длительных временных масштабах для жидких пен с массопереносом жидкой составляющей за счет её частичного испарения и изолированных пен. Подобные исследования играют важную роль для развития когерентно-оптических методов диагностики морфофункциональных свойств микро- и наноструктурированных многофазных систем в режиме реального времени.

Ключевые слова: спекл-коррелометрия, газожидкостная пена, испарение, диффузия

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-00051), <https://rscf.ru/project/21-79-00051/> (разработка комплексного акустического и когерентно-оптического морфофункционального метода диагностики многофазных систем для функционализации материалов в тканевой инженерии).

Для цитирования: Исаева Е. А., Исаева А. А., Пантюков А. В., Зимняков Д. А. Спекл-коррелометрия как метод оценки динамического поведения вспененных жидкостей // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 220–228. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-220-228>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Speckle correlometry as a method for evaluating the dynamics of the liquids foam

E. A. Isaeva¹, A. A. Isaeva¹, A. V. Pantyukov¹, D. A. Zimnyakov^{1,2}✉

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov 410071, Russia

²Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences (IPTMU RAS), 24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia

Elena A. Isaeva, 27isaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>

Anna A. Isaeva, isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>

Alexsey V. Pantyukov, alex.pantukoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>

Dmitry A. Zimnyakov, zimnyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9787-7903>

© Исаева Е. А., Исаева А. А., Пантюков А. В., Зимняков Д. А., 2022



Abstract. Background and Objectives: The two-phase gas-liquid foams have been an active object of research over the past few decades. Usually, during the coarsening of the foam such physical processes as a foam syneresis (the liquid drainage along the Plateau channel and the bubble walls under the gravity), an Oswald ripening of the gas bubbles, and their coalescence are investigated. Another process that accompanies the aging of gas-liquid foams is the evaporation of the liquid component of the foam that is insufficiently described in the literature. Each of these processes is characterized by its own kinetics. The major factors that determine the dynamic and kinematic characteristics of the foams are the volume fraction of the liquid in the foam, the rheological properties of foam films, the average thickness of films between the gas bubbles, and the dispersion of the system. The modern methods for the diagnostic of the structural rearrangements and the foam aging do not allow studying the evolution of the three-dimensional foams in the real time. In this work, a comparative analysis of the behavior of the time correlations of the intensity fluctuations of the scattered by the liquid foam laser radiation on long time scales is carried out for the case of the system with mass transfer of the liquid component due to its partial evaporation and the isolated system. Such studies play an important role in the development of the coherent-optical methods for the morphofunctional diagnostic of the micro- and nanostructured multiphase systems in the real time. **Materials and Methods:** The analysis of the evolution of the isolated and “open” liquid foams during their aging is carried out by use of the speckle correlometry method. Two series of the experiments were performed with an isolated system and an “open” system at a temperature of 24°C. **Results:** The correlation time of the intensity fluctuations of the radiation scattered by the medium was calculated from the normalized correlation function, based on the criterion of its decay by a factor of e . The dependences of the correlation time of the intensity fluctuations on the aging time for isolated and “open” systems are obtained. A phenomenological model to describe the increase in the correlation time of intensity fluctuations is proposed. Within the framework of the model, the experimental data agree with the model data for an isolated foam and correlates with a power law with an exponent equal to 1.5. **Conclusion:** A speckle-correlation analysis as method for the analysis of the local instabilities caused by the structural rearrangements in the foams under the coarsening was considered. The phenomenological model, that establishes the relationship between the correlation time of the intensity fluctuations of the laser radiation scattered by the foam and the aging time of the foam, is proposed. The obtained results may be useful for the further development of laser methods for the diagnostic of nonstationary multiphase systems with a complex structure and dynamics.

Keywords: speckle correlometry, gas-liquid foam, evaporation, diffusion

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-79-00051), <https://rscf.ru/project/21-79-00051/> (The development of a complex acoustic and coherent-optical analyzer of the morphological and functional characteristics of the dispersed systems and the porous media for the monitoring of the processes of the synthesis and for the functionalization of the materials).

For citation: Isaeva E. A., Isaeva A. A., Pantyukov A. V., Zimnyakov D. A. Speckle correlometry as a method for evaluating the dynamics of the liquids foam. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 3, pp. 220–228 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-3-220-228>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

Двухфазные газожидкостные пены являются активным объектом исследования на протяжении последних нескольких десятилетий [1–3].

Газожидкостные пены состоят из газовых пузырей, окруженных сплошной жидкой фазой. В области соприкосновения нескольких газовых пузырей формируются каналы Плато. При этом сами газовые пузыри в сухих и влажных пенах разделены тонкими стенками. Каналы Плато и стенки пузырей формируют жидкий структурный каркас пены [4]. Для газожидкостных пен справедлива зависимость: чем больше влажность пены, тем толще каналы Плато.

Обычно при эволюции газожидкостных пен рассматривают такие физические процессы, как синерезис пены (дренирование жидкости по каналам Плато и стенкам пузырей вследствие воздействия силы тяжести), остальдское созревание (укрупнение) газовых пузырей и их коалесценцию (разрыв стенок и слияние пузырей). Ещё один процесс, сопровождающий старение газожидкостных пен и в недостаточной степени описанный в литературе, – это испарение жидкой составляющей пены. Каж-

дый из этих процессов характеризуется своей кинетикой. К медленным процессам относятся процессы стекания жидкости по каналам, постепенное укрупнение пузырьков и испарение жидкости. К быстрым – процесс схлопывания пузырьков и, как следствие, локальные перестройки структуры пены.

Один из ключевых факторов, определяющих динамические и кинематические характеристики пен, – это объемная доля жидкости в пене. В частности, показано, что площадь локальной перестройки и количество пузырей, захваченных процессом перестройки после исчезновения одного пузыря, увеличивается с увеличением объемной доли жидкости для случая квазидвумерных пен [5]. Одновременно с этим для объемных трехмерных пен локальные перестройки при схлопывании отдельных пузырей могут захватывать большие объемы по сравнению с квазидвумерными пенами вследствие влияния поверхностного натяжения жидкой составляющей на границе пена – контейнер.

Другой важный фактор, определяющий устойчивость пены, – это реологические свойства пенных пленок. Кинетика медленных и быстрых



перестроек в двухфазных пенах зависит от вязкоупругих свойств пены [6,7].

Еще один часто используемый параметр для описания динамики процессов коалесценции в пене – это средняя толщина пленок между газовыми пузырьками. Были проведены исследования по взаимосвязи размеров пузырей, толщины пленок между ними и вероятности схлопывания пузырей [8–10]. Несмотря на интуитивный аргумент, что большие пузыри менее устойчивы по сравнению с малыми, акустические исследования показали, что пузыри малых размеров также активно вовлекаются в лавинообразные акты коалесценции.

Одной из теорий, описывающих процесс коалесценции и его взаимосвязь с толщиной пленки, является теория Б. В. Дерягина [11]. Согласно этой теории коалесценции газового пузыря предшествует следующее последовательные изменения жидкостных стенок между пузырьками: равномерное уменьшение толщины, локальное неоднородное уменьшение толщины и образование отверстия в стенке с последующим быстрым ростом. Эти процессы приводят к переходу локальной области пены из метастабильного состояния к нестабильному. Такое нестабильное состояние будет характеризоваться критической толщиной жидкостной пленки между пузырьками (стенки) [12]:

$$h_{кр} = \sqrt[5]{\frac{9\sqrt{3} AK_{ВВ}}{16 v\eta\sigma}},$$

где $A = \sqrt{kT/\sigma}$ – амплитуда флуктуационных волн на поверхности жидкости, $K_{ВВ}$ – константа Ван-дер-Ваальса – Гамакера, v – скорость утончения пленки, η – динамическая вязкость пленки, σ – поверхностное натяжение пленки. Условие возникновения разрыва в пленке – достижение состояния капиллярной неустойчивости [13].

В настоящее время установлены взаимосвязи временной зависимости размеров пузырей при эволюции «влажных» и «сухих» пен. Показано, что средний размер пузыря на больших временах старения для пен с долей жидкой фазы $\epsilon > 0.35$ («влажные» пены) пропорционален $\propto t^{1/3}$, при этом локальная диффузия газа происходит через границы раздела фаз, по форме близких к сферическим. Пены с долей жидкой фазы $\epsilon < 0.25$ характеризуются ростом пузырей в соответствии с законом $\propto t^{1/2}$, что определяется увеличивающейся плотностью упаковки газовых пузырей и квазиплоскими границами раздела фаз [14].

Для изолированных пен медленный рост пузырей контролируется только диффузией газа через их стенки пузырьков и переносом жидкой фазы по каналам Плато и перегородкам под действием силы тяжести.

Еще одним важным параметром, определяющим динамику процессов эволюции пены, является дисперсность системы. Дисперсность системы влияет на процесс диффузии газа из одного пузыря в другой. Чем больше разность радиусов газовых пузырей в мокрых пенах, тем больше разность давлений Лапласа ΔP между соседними пузырьками и, соответственно, скорость диффузии газа между ними v_{diff} :

$$v_{diff} \propto \Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух соседних газовых пузырей. Также дисперсия пузырей по размеру контролирует медленный процесс дрейфа пузырей при эволюции «влажной» пены и активацию локальных структурных перестроек. Недавние исследования показывают, что распределение пузырей по размеру влияет на динамику их миграции при локальных механических воздействиях [15].

К современным наиболее активно используемым методам диагностики структурных перестроек и процессов старения пены относятся рентгеновская томография [16] и методы оптической и атомной силовой микроскопии, в том числе и с применением микрофлюидных моделей [17–19]. Однако подобные методы не позволяют исследовать эволюцию трехмерных пенных структур в режиме реального времени в процессе их развития [20].

В то же время спекл-корреляционные методы, активно применяемые для анализа динамики и структуры дисперсных систем [21, 22], могут быть использованы для исследования эволюции многофазных пеноподобных систем. Общий анализ динамики процессов перестройки пены для пористых систем с использованием подхода спекл-коррелометрии проведен в работах [23, 24]. Показано, что процесс эволюции пены в процессе стадии укрупнения пор на начальных этапах описывается степенным законом изменения времени корреляции флуктуации интенсивности рассеянного системой излучения в зависимости от времени старения пены $\tau \propto t^a$.

В данной работе представлены результаты спекл-коррелометрического анализа эволюции изолированных и «открытых» жидких пен



в процессе их старения (в случае «открытых» пен одним из ключевых факторов является испарение жидкой фазы с поверхности пены). При этом производится сравнительный анализ влияния наличия или отсутствия частичного испарения жидкой составляющей пены на быстрые и медленные процессы локальных структурных перестроек в исследуемых модельных пенах.

1. Методы и результаты

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения 1 использовался гелий-неоновый лазер Г-5П ($\lambda = 633$ нм, 50 мВт, ГН-5П) (АО «Плазма», Россия). Рассеянное слоем эволюционирующей пены спекл-модулированное лазерное излучение регистрировалось быстродействующей КМОП камерой Optronis CamRecord 3000 (Optronis GmbH, Германия) с кадровой частотой до $100\,000\text{ с}^{-1}$, достаточной для последующего анализа динамики структурных перестроек в слое пены.

В качестве объектов исследования использовались слои пены (крем для бритья Gillette Foamy Regular) толщиной 3 мм. Образцы пены шприцом закачивались в кюветы, состоящие из двух стеклянных пластинок толщиной 1.3 мм, разделенных прокладкой толщиной 3 мм. Далее производились частичная или полная герметизация кювет и их взвешивание на лабораторных весах (модель DL-123, производитель ДЭМКОМ

(Россия), погрешность порядка 0.01 г). Взвешивание осуществлялось как до начала эксперимента, так и после его проведения. По полученным результатам рассчитывалась объемная доля жидкой составляющей пены в начале экспериментов и после их завершения. Выполнялось две серии экспериментов с изолированной системой ($\epsilon = \text{const}$) и неизолированной системой ($\epsilon \neq \text{const}$) при температуре 24°C . В процессе старения пены объемная доля жидкой составляющей пены в неизолированной кювете изменялась в пределах от $\epsilon \approx 0.099$ до $\epsilon \approx 0.046$. При этом, учитывая горизонтальное расположение, вкладом синерезиса пены при толщинах слоев, равных 3 мм, можно пренебречь. В процессе старения пены в неизолированной кювете происходило постепенное уменьшение объемной доли жидкой фазы за счет ее испарения. Для контроля изменения среднего размера газовых пузырей для изолированных систем проводились дополнительные измерения с помощью микроскопической системы с КМОП-камерой (микроскопические объективы Nikon MRP70100 и Nikon MRP70040 (Nikon, Япония), камера Thorlabs DCC 1240C-NQ (EO Edmund Optics, США)) на временных интервалах до 1000 минут. По полученным временным зависимостям среднего радиуса газовых пузырей рассчитывалось среднеквадратичное отклонение радиусов газовых пузырей, нормированное на среднее значение радиуса газовых пузырей в текущий момент времени, $\frac{\sigma_R}{\langle R \rangle}$ (рис. 2).

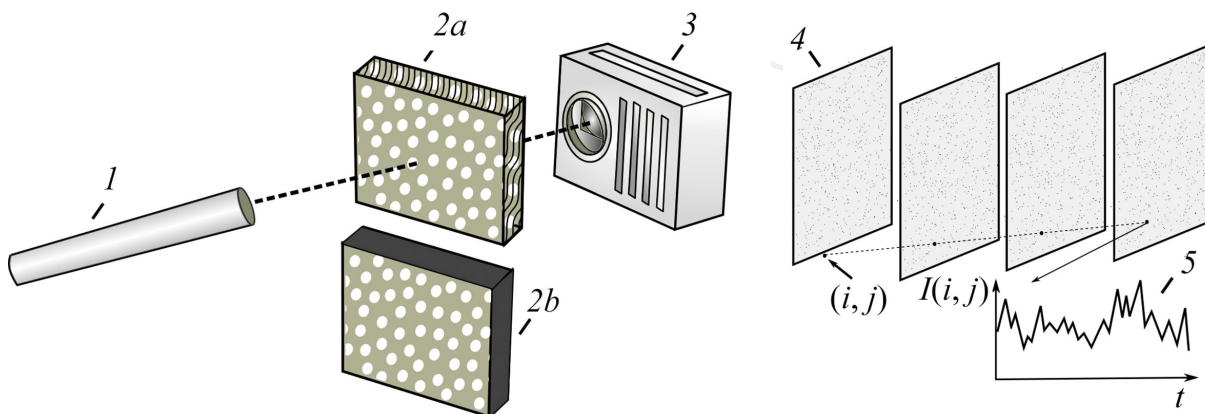


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – гелий-неоновый лазер (632 нм, 3 мВт, ГН-5П); 2a – неизолированная ($\epsilon \neq \text{const}$) кювета с образцом пены; 2b – изолированная кювета ($\epsilon = \text{const}$) с образцом пены; 3 – КМОП-камера; 4 – последовательность полученных спекл-изображений; 5 – пример зарегистрированной временной зависимости интенсивности излучения в одном пикселе

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 – single-mode He-Ne laser (633 nm, 3 mW, linearly polarized output); 2a – non-isolated foam sample in the cuvette ($\epsilon \neq \text{const}$); 2b – isolated foam sample in the cuvette ($\epsilon = \text{const}$); 3 – high-performance CMOS sensor; 4 – sequences of obtained speckle-modulated images; 5 – an example of intensity fluctuations for an arbitrarily chosen pixel in the image plane

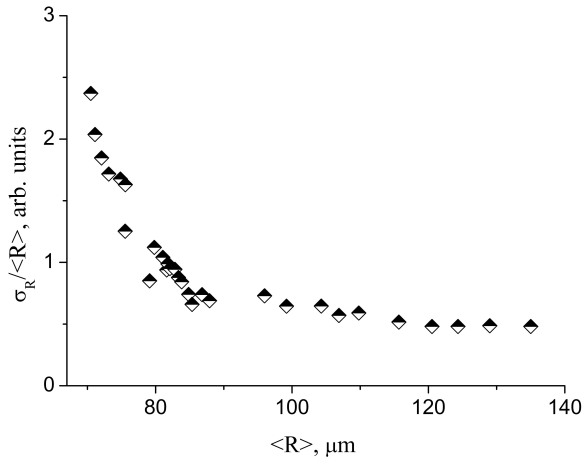


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения радиусов газовых пузырей от среднего значения $\langle R \rangle$ в каждый момент времени, нормированное на среднее значение радиуса газовых пузырей в текущий момент времени $\frac{\sigma_R}{\langle R \rangle}$ для изолированной системы

Fig. 2. Dependence of the standard deviation of the radii of the gas bubbles on the average value $\langle R \rangle$ at each time moment, normalized at the average value of the radius of gas bubbles at a current time moment $\frac{\sigma_R}{\langle R \rangle}$ for an isolated system

По полученным с помощью камеры Opttronis CamRecord 3000 (Opttronis GmbH, Германия) последовательностям спекл-модулированных изображений рассеянного лазерного поля (см. рис. 1) рассчитывались нормированные временные корреляционные функции флуктуаций интенсивности:

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

где

$$G_2(i, j, \Delta k) = \sum_{k=k_1}^{k_2} [I^{k+\Delta k}(i, j) - \bar{I}(i, j)] \cdot [I^k(i, j) - \bar{I}(i, j)]. \quad (1)$$

При этом средняя интенсивность выбранного пикселя для анализируемого фрагмента последовательности изображений определялась как

$$\bar{I}(i, j) = \sum_{k=k_1}^{k_2} \frac{I^k(i, j)}{k_2 - k_1}, \quad (2)$$

где $I^k(i, j)$ – текущее значение интенсивности, определяемое через яркость соответствующего пикселя в интервале от 0 до 255 градаций серого, значения (i, j) задают положение пикселя на изображении (см. рис. 1, i – номер строки, j – номер столбца); k_1, k_2, \dots, k_n задают номер n -го кадра в последовательности регистрируемых изображений. Время корреляции

флуктуации интенсивности рассеянного средней излучения τ рассчитывалось по нормированной корреляционной функции $g_2(i, j, t, \Delta k)$, исходя из критерия ее спада в e раз. Полученные зависимости времени корреляции флуктуаций интенсивности $\tau(t)$ от времени старения сглаживались с помощью встроенного медианного фильтра программы Origin 8.1 (Origin Lab Corporation) (рис. 3).

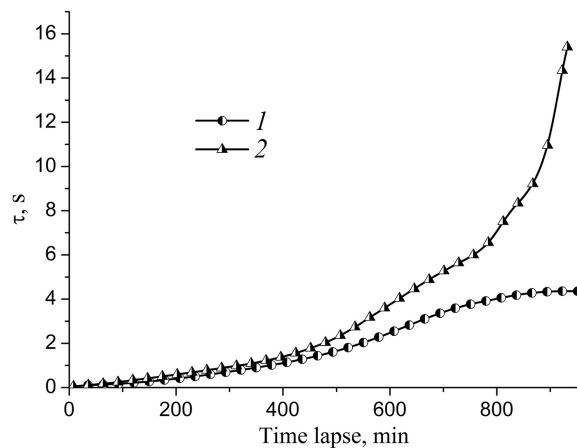


Рис. 3. Зависимость времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного излучения $\tau(t)$ от времени старения пены при 24°C: 1 – изолированная кювета с образцом пены ($\epsilon = \text{const}$), 2 – неизолированная кювета с образцом пены ($\epsilon \neq \text{const}$)

Fig. 3. Dependence of the correlation time of intensity fluctuations of the scattered radiation $\tau(t)$ in the course of foam aging at 24°C: 1 – isolated cuvette with a foam ($\epsilon = \text{const}$), 2 – non-insolated cuvette with a foam ($\epsilon \neq \text{const}$)

2. Анализ диффузионного массопереноса газовой фазы

Рассмотрим эволюцию наблюдаемых систем с точки зрения процессов массопереноса газовой и жидкой составляющей в исследуемом образце пены.

Диффузионный массоперенос газовой фазы между соседними пузырями происходит от меньшего пузыря к большему через жидкостную стенку между ними в силу большего значения лапласовского давления в меньшем пузыре. Диффузионный поток между соседними пузырями через единичную поверхность стенки может быть описан следующим выражением [25]:

$$Q_m = -k\Delta P = -\frac{DH}{h} 2\sigma \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (3)$$

где k – проницаемость стенки, $k = \frac{DH}{h}$, D – коэффициент диффузии газа в стенке, H – оствальдский коэффициент растворимости газа,



h – толщина стенки, σ – поверхностное натяжение жидкости, R_1, R_2 – радиусы соседствующих пузырей, причем $R_2 > R_1$.

Оценим усредненное по ансамблю пузырей абсолютное значение диффузионного потока $\langle Q \rangle = \langle |Q_{12}| \rangle$, исходя из предположения, что

$$\langle Q \rangle \approx \frac{DH}{\langle h \rangle} 2\sigma \left| \left(\frac{1}{\langle R \rangle} - \frac{1}{R_{cr}} \right) \right| = \frac{DH}{\langle h \rangle} 2\sigma \left| \frac{R_{cr} - \langle R \rangle}{\langle R \rangle R_{cr}} \right|, \quad (4)$$

где R_{cr} – критическое значение радиуса для ансамбля пузырей в данный момент времени. Установлено, что для больших времен старения распределение пузырей по размерам является автомодельным [26, 27], не меняющимся с течением времени. При этом $R_{cr}/\langle R \rangle = \Delta = \text{const}$; в частности, в работе [27] показано, что при переходе в автомодельный режим $\Delta \rightarrow 0.8$. Таким образом, выражение (4) преобразуется к следующей форме, учитывающей взаимосвязь между средней по ансамблю толщиной стенок между пузырями и средним радиусом пузырей:

$$\langle Q \rangle \approx \frac{0.4DH\sigma}{\langle h \rangle \langle R \rangle}. \quad (5)$$

С другой стороны, средняя толщина стенок $\langle h \rangle$ может быть представлена как [25]

$$h(t) = \frac{2}{3} \langle R \rangle \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}, \quad (6)$$

и, соответственно,

$$\langle Q \rangle \approx \frac{0.6DH\sigma(1 - \varepsilon)}{\varepsilon \langle R \rangle^2}. \quad (7)$$

3. Результаты и их обсуждение

Характерное время t_{diff} диффузионного истечения массы газа из объема усредненного по ансамблю пузыря в определенной степени характеризует среднее время существования пузырей в ансамбле и коррелирует с определяемым в эксперименте временем корреляции τ флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения. Масса газа в усредненном по ансамблю пузыре в предположении о близком к идеальному поведении газа может быть оценена как

$$M \approx 4\pi P \langle R \rangle^3 \mu / 3RT,$$

где P – значение давления в пузырях, близкое к атмосферному, μ – молярная масса газа, R –

универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура. В результате получим, что

$$\tau \propto t_{diff} \approx \frac{M}{4\pi \langle R \rangle^2 \langle Q \rangle} \propto \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \langle R \rangle^3. \quad (8)$$

Отметим тот факт, что усредненный по ансамблю диффузионный поток массы $4\pi \langle R \rangle^2 \langle Q \rangle$ в автомодельном режиме эволюции пены не зависит от среднего радиуса пузырей и в рамках рассмотренной модели равен $2.4\pi DH\sigma(1 - \varepsilon)/\varepsilon$. Соответственно, обсуждаемая феноменологическая модель предсказывает для изолированной системы ($\varepsilon = \text{const}$) степенной рост τ с показателем, равным 1.5, по мере старения пены (поскольку в автомодельном режиме $\langle R \rangle \propto t^{0.5}$). Данный вывод удовлетворительно согласуется с поведением экспериментальной зависимости времени корреляции флуктуаций интенсивности от времени старения изолированной пены в логарифмических координатах (рис. 4), где также представлена референтная линия, соответствующая модельной степенной зависимости $\tau(t)$ с показателем, равным 1.5. Несмотря на локальные отклонения экспериментальной зависимости $\tau(t)$ от отмеченного степенного тренда, в целом имеет место приемлемое соответствие между экспериментальными и модельными данными для изолированной пены.

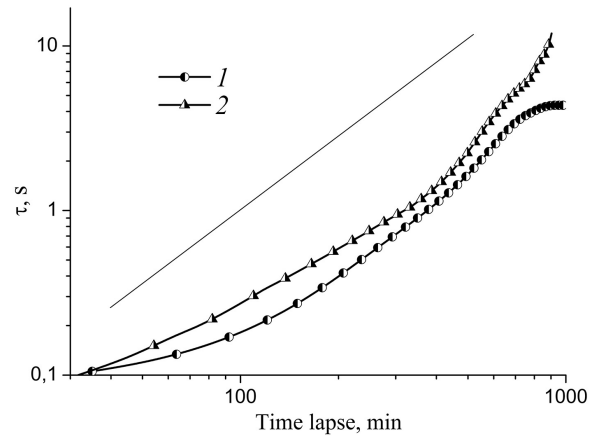


Рис. 4. Зависимость времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного излучения $\tau(t)$ от времени старения пены при 24°C с модельной степенной зависимостью (реферативная линия) с показателем, равным 1.5: 1 – изолированная кювета с образцом пены ($\varepsilon = \text{const}$), 2 – неизолированная кювета с образцом пены ($\varepsilon \neq \text{const}$)

Fig. 4. Dependence of the correlation time of intensity fluctuations of the scattered radiation $\tau(t)$ in the course of foam aging at 24°C with a model exponential dependence (reference line) with an exponent equal to 1.5: 1 – isolated cuvette with a foam ($\varepsilon = \text{const}$), 2 – non-insolated cuvette with a foam ($\varepsilon \neq \text{const}$)



Существенно меньшие значения времени корреляции флуктуаций интенсивности для больших интервалов времени старения для открытой системы (кривая 2) на рис. 3 и рис. 4 можно интерпретировать, как результат влияния изменения объемной доли жидкой составляющей системы. В соответствии с выражением (8) уменьшение объемной доли жидкой фазы вследствие испарения должно вызывать уменьшение времени диффузии газа, что является эффектом, обратным влиянию роста $\langle R \rangle$, который приводит к степенной зависимости роста времени диффузии.

Заключение

Разработана методика спекл-корреляционного анализа локальных нестабильностей, обусловленных структурными перестройками в эволюционирующих пенах. Разработана феноменологическая модель, устанавливающая взаимосвязь времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного пеной лазерного излучения с временем старения образца пены. Для образцов изолированной пены наблюдается степенной тренд зависимости времени корреляции от времени старения, адекватно описываемый в рамках разработанной модели. Модель основана на оценке характерного времени существования газовых пузырей в эволюционирующей пене, определяемого средней скоростью диффузионного массопереноса в системе и средней массой газа в пузырьках. В рамках модели дана качественная интерпретация эффекта существенно меньших значений времени корреляции флуктуаций интенсивности для открытых систем с испарением жидкой фазы по сравнению с изолированными пенами. Полученные результаты могут представлять интерес с точки зрения дальнейшего развития лазерных методов диагностики нестационарных многофазных систем со сложной структурой и динамикой.

Список литературы

1. Franklin S. F., Shattuck M. D. Handbook of Granular Materials. CRC Press, 2016. 522 p. <https://doi.org/10.1201/b19291>
2. Durian D. J. Foam mechanics at the bubble scale // Phys. Rev. Lett. 1995. Vol. 75. P. 4780–4783. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4780>
3. Weaire D., Hutzler S. The Physics of Foams. Oxford University Press, 2001. 264 p.
4. Plateau J. A. F. Statique Experimentale et Theoreque des liquides. Paris : Gauthier-Villiar, 1873. 518 p.
5. Furuta Y., Oikawa N., Kurita R. Close relationship between a dry–wet transition and a bubble rearrangement in two-dimensional foam // Sci. Rep. 2016. Vol. 6. P. 37506. <https://doi.org/10.1038/srep37506>
6. Boromand A., Signoriello A., Lowensohn J., Orellana C. S., Weeks E. R., Ye F., Shattuck M. D., O’Her C. S. The role of deformability in determining the structural and mechanical properties of bubbles and emulsions // Soft Matter. 2019. Vol. 15. P. 5854–5865 <https://doi.org/10.1039/C9SM00775J>
7. Miller R., Ferri J. K., Javadi A., Krägel J., Mucic N., Wüstneck R. Rheology of interfacial layers // Colloid and Polymer Science. 2010. Vol. 288. P. 937–950. <https://doi.org/10.1007/s00396-010-2227-5>
8. Carrier V., Colin A. Coalescence in Draining Foams // Langmuir. 2003. Vol. 19. P. 4535–4538.
9. Vandewalle N., Lentz J. F., Dorbolo S., Brisbois F. Avalanches of Popping Bubbles in Collapsing Foams // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 1. P. 179–182. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.179>
10. Vandewalle N., Lentz J. F. Cascades of popping bubbles along air / foam interfaces // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64, P. 021507. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.021507>
11. Дерягин Б. В., Гумон Ю. В. Теория разрушения свободных пленок // Коллоидный журнал. 1962. Т. 24, № 4. С. 431–437.
12. Manev E. D., Nguyen A. V. Critical thickness of microscopic thin liquid films // Advances in Colloid and Interface Science. 2005. Vol. 114–115, № 1. P. 133–46. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.07.013>
13. Vrij A., Overbeek J. Th. G. Rupture of thin liquid films due to spontaneous fluctuations in thickness // J. Am. Chem. Soc. 1968. Vol. 90, № 12. P. 3074–3078. <https://doi.org/10.1021/ja01014a015>
14. Thomas G. L., Belmonte J. M., Graner F., Glazier J. A., de Almeida R. M. 3D simulations of wet foam coarsening evidence a self similar growth regime // Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. Vol. 473. P. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.02.015>
15. Yanagisawa N., Kurita R. Size distribution dependence of collective relaxation dynamics in a two-dimensional wet foam // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. P. 2786. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82267-4>
16. Garing C., de Chalendar J. A., Voltolini M., Ajo-Franklin J. B., Benson S. M. Pore-scale capillary pressure analysis using multi-scale X-ray micromotography // Adv. Water Resour. 2017. Vol. 104. P. 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.04.006>
17. Gogoi S., Gogoi S. B. Review on microfluidic studies for EOR application // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. Vol. 9. P. 2263–2277. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0610-4>
18. Azhar Z. Z., Zakaria Z., Bakar A. A., Naser M. A. M. Effectiveness of A Simple Image Enhancement Method in Characterizing Polyethylene Foam Morphology Using Optical Microscopy // Procedia Chemistry. 2016. Vol. 19. P. 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.041>
19. Yang Y. Q., Biviano M. D., Guo J. X., Berry J. D., Dagastine R. R. Mass transfer between microbubbles // J. Colloid Interface Sci. 2020. Vol. 571. P. 253–259. <https://10.1016/j.jcis.2020.02.120>



20. Mazen W. Y., Kanj Y. Review of foam stability in porous media : The effect of coarsening // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. P. 109698. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109698>
21. Ульянов С. С., Ульянова О. В., Зайцев С. С., Салтыков Ю. В., Ульянов А. С., Федорова В. А. Интерференция GB-спеклов в молекулярной дискриминации бактериальных патогенов : использование метода s-LASCA на модели Chlamydia psittaci // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика*. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 315–328. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-315-328>
22. Dávila A. *Handbook of Speckle Interferometry*. Bellingham : Spie Press Book, 2022. 118 p.
23. Isaeva E. A., Isaeva A. A., Zimnyakov D. A. Structure diagnostics of dispersive two-phase systems using speckle correlation technique // *Proc. SPIE*. 2019. Vol. 11066. P. 110660Z. <https://doi.org/10.1117/12.2523142>
24. Yuvchenko S. A., Tzyipin D. V., Isaeva A. A., Isaeva E. A., Zimnyakov D. A. Structure changes in metastable and unstable foams probed by multispeckle diffusing light spectroscopy // *Proc. SPIE*. 2018. Vol. 10717. P. 107171I. <https://doi.org/10.1117/12.2315909>
25. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. *Пена и пенные пленки*. М. : Химия, 1990. 432 с.
26. Coussot P. Scaling approach of the convective drying of a porous medium // *Eur. Phys. J. B*. 2000. Vol. 15. P. 557–566. <https://doi.org/10.1007/s100510051160>
27. Zimnyakov D. A., Yuvchenko S. A., Isaeva A. A., Isaeva E. A., Tsyipina D. V. Growth/collapse kinetics of the surface bubbles in fresh constrained foams : Transition to self-similar evolution // *Colloids and Surfaces A*. 2019. Vol. 579. P. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>
28. Franklin S. F., Shattuck M. D. *Handbook of Granular Materials*. CRC Press, 2016. 522 p. <https://doi.org/10.1201/b19291>
29. Durian D. J. Foam mechanics at the bubble scale. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 75, pp. 4780–4783. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.4780>
30. Weaire D., Hutzler S. *The Physics of Foams*. Oxford University Press, 2001. 264 p.
31. Plateau J. A. F. *Statique Experimentale et Theoreque des liquides*. Paris, Gauthier-Villiar, 1873. 518 p. (in French).
32. Furuta Y., Oikawa N., Kurita R. Close relationship between a dry–wet transition and a bubble rearrangement in two-dimensional foam. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, pp. 37506. <https://doi.org/10.1038/srep37506>
33. Boromand A., Signoriello A., Lowensohn J., Orelana C. S., Weeks E. R., Ye F., Shattuck M. D., O’Her C. S. The role of deformability in determining the structural and mechanical properties of bubbles and emulsions. *Soft Matter*, 2019, vol. 15, pp. 5854–5865. <https://doi.org/10.1039/C9SM00775J>
34. Miller R., Ferri J. K., Javadi A. Krägel J., Mucic N., Wüstneck R. Rheology of interfacial layers. *Colloid and Polymer Science*, 2010, vol. 288, pp. 937–950. <https://doi.org/10.1007/s00396-010-2227-5>
35. Carrier V., Colin A. Coalescence in Draining Foams. *Langmuir*, 2003, vol. 19, pp. 4535–4538.
36. Vandewalle N., Lentz J. F., Dorbolo S., Brisbois F. Avalanches of Popping Bubbles in Collapsing Foams. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 86, no. 1, pp. 179–182. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.179>
37. Vandewalle N., Lentz J. F. Cascades of popping bubbles along air / foam interfaces. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, pp. 021507. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.021507>
38. Derjaguin B. V., Gutop Yu. V. Theory of destruction of free films. *Kolloidnyi zhurnal* [Colloidal Journal], 1962, vol. 24, no. 4, pp. 431–437 (in Russian).
39. Manev E. D., Nguyen A. V. Critical thickness of microscopic thin liquid films. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, vol. 114–115, no. 1, pp. 133–46. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.07.013>
40. Vrij A., Overbeek J. Th. G. Rupture of thin liquid films due to spontaneous fluctuations in thickness. *J. Am. Chem. Soc.*, 1968, vol. 90, no. 12, pp. 3074–3078. <https://doi.org/10.1021/ja01014a015>
41. Thomas G. L., Belmonte J. M., Graner F., Glazier J. A., de Almeida R. M. 3D simulations of wet foam coarsening evidence a self similar growth regime. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, vol. 473, pp. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.02.015>
42. Yanagisawa N., Kurita R. Size distribution dependence of collective relaxation dynamics in a two-dimensional wet foam. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, pp. 2786. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82267-4>
43. Garing C., de Chalendar J. A., Voltolini M., Ajo-Franklin J. B., Benson S. M. Pore-scale capillary pressure analysis using multi-scale X-ray micromotography. *Adv. Water Resour.*, 2017, vol. 104, pp. 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.04.006>
44. Gogoi S., Gogoi S. B. Review on microfluidic studies for EOR application. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, pp. 2263–2277. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-0610-4>
45. Azhar Z. Z., Zakaria Z., Bakar A. A., Naser M. A. M. Effectiveness of A Simple Image Enhancement Method in Characterizing Polyethylene Foam Morphology Using Optical Microscopy. *Procedia Chemistry*, 2016, vol. 19, pp. 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.041>
46. Yang Y. Q., Biviano M. D., Guo J. X., Berry J. D., Dagastine R. R. Mass transfer between microbubbles. *J. Colloid Interface Sci.*, 2020, vol. 571, pp. 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.02.120>
47. Mazen W. Y., Kanj Y. Review of foam stability in porous media : The effect of coarsening. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, pp. 109698. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109698>
48. Ulianova O., Ulyanov S., Ulyanov A., Zaytsev S., Saltykov Y., Feodorova V. A. GB-speckle interference in molecular discrimination of bacterial pathogens : Using the s-LASCA method on the Chlamydia psittaci



- model. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 315–328 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-4-315-328>
22. Dávila A. *Handbook of Speckle Interferometry*. Bellingham, Spie Press Book, 2022. 118 p.
23. Isaeva E. A., Isaeva A. A., Zimnyakov D. A. Structure diagnostics of dispersive two-phase systems using speckle correlation technique. *Proc. SPIE*, 2019, vol. 11066, pp. 110660Z. <https://doi.org/10.1117/12.2523142>
24. Yuvchenko S. A., Tzyipin D. V., Isaeva A. A., Isaeva E. A., Zimnyakov D. A. Structure changes in metastable and unstable foams probed by multispeckle diffusing light spectroscopy. *Proc. SPIE*, 2018, vol. 10717, pp. 107171I. <https://doi.org/10.1117/12.2315909>
25. Kruglyakov P. M., Ekserova D. R. *Peny i pennye plenki* [Foam and Foam Films]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 432 p. (in Russian).
26. Coussot P. Scaling approach of the convective drying of a porous medium. *Eur. Phys. J. B*, 2000, vol. 15, pp. 557–566. <https://doi.org/10.1007/s100510051160>
27. Zimnyakov D. A., Yuvchenko S. A., Isaeva A. A., Isaeva E. A., Tsykina D. V. Growth/collapse kinetics of the surface bubbles in fresh constrained foams : Transition to self-similar evolution. *Colloids and Surfaces A*, 2019, vol. 579, pp. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>

Поступила в редакцию 02.05.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 30.05.2022
The article was submitted 02.05.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 30.05.2022