

09

Акусто-модуляционная спекл-коррелометрия эволюционирующих пен: влияние акустического воздействия на динамику старения пены

© Е.А. Исаева,¹ А.А. Исаева,¹ Д.А. Зимняков^{1,2}

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410071 Саратов, Россия

² Институт проблем точной механики и управления РАН, 410028 Саратов, Россия
e-mail: 27isaevaea@mail.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 25 декабря 2025 г.

Принято к публикации 25 декабря 2025 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований эволюции структуры модельных образцов газожидкостных пен с использованием метода спекл-коррелометрии. Эксперименты проводились при низкочастотном акустическом воздействии (на частоте 2 kHz) на исследуемые образцы и в отсутствие воздействия. Используемый режим озвучивания образца соответствует циклическому знакопеременному изменению избыточного внешнего давления в зоне взаимодействия лазерного пучка с пеной. Учитывая соотношение между длиной звуковой волны и характерными размерами зоны взаимодействия, можно сделать вывод о квазиоднородном распределении избыточного давления по зоне взаимодействия. Установлено, что в обоих случаях имеет место автомодельный характер эволюции структуры пены, при котором средний размер газовых ячеек в пене возрастает с течением времени по степенному закону с показателем степени, равным 0.5. В то же время акустическое воздействие приводит к существенному увеличению скоростной константы в степенном законе и более быстрому росту времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного пеной лазерного излучения по сравнению с образцами неозвученной пены по мере старения исследуемых образцов. Обсуждена качественная интерпретация наблюдаемых в эксперименте особенностей.

Ключевые слова: газожидкостные пены, эволюция структуры, многократное рассеяние света, спекл-коррелометрия, акустическое воздействие.

DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62760.346-25

Введение

Структурные и физико-химические свойства вспененных жидких сред являются объектом постоянного исследовательского интереса на протяжении около полутора столетий, начиная с классической работы Кельвина [1]. Многочисленные экспериментальные и теоретические работы, посвященные исследованиям эволюции газожидкостных пен, начиная от зарождения и заканчивая стабилизацией структуры пены или ее разрушением, затрагивают такие фундаментальные разделы физики, как термодинамика, кинетика, статистическая физика, физика капиллярных и поверхностных явлений и др. С другой стороны, подобные исследования в значительной степени характеризуются выраженной практической направленностью, обусловленной широким применением пеноподобных материалов в современных наукоемких технологиях, биомедицинских приложениях и повседневной жизни. В этой связи можно отметить, например, металлические пены как конструкционные материалы с исключительными эксплуатационными характеристиками [2–4], высокопористые матрицы-скаффолды на основе вспененных биорезорбируемых полимеров [5–7], высокоэффективные звуко- и теплоизолирующие слои полимерных пен [8–10] и др.

При постоянных внешних условиях (давлении и температуре) и в отсутствие газообмена с окружающей средой газожидкостные пены представляют собой термодинамически метастабильные случайно-неоднородные двухфазные системы, в которых происходят медленные изменения статистических характеристик ансамбля ячеек (газовых пузырей): среднего радиуса ячеек $\langle R_c \rangle(t)$ и дисперсии распределения ячеек по радиусам $\sigma_R^2(t)$ [11–15]. При этом постепенно уменьшается объемная доля жидкой фазы f , постепенно стекающей под действием гравитации на дно содержащего пену контейнера стенкам пузырей и сетке каналов Плато–Гиббса [16–18]. В результате в газожидкостных пенах происходит постепенный переход от состояния „влажной“ (wetfoam, $f > 0.1$) к состоянию „сухой“ пены (dryfoam, $f < 0.05$). Изменение $\langle R_c \rangle(t)$ и $\sigma_R^2(t)$ в процессе медленной эволюции пены обусловлено влиянием газообмена между соседними ячейками через разграничивающие их стенки и коалесценцией соседних ячеек при разрушениях разграничивающих стенок. Газообмен между ячейками обусловлен диффузионными потоками газа через стенки вследствие различий избыточного лапласовского давления (и соответственно локальных концентраций молекул газа) в соседних ячейках [17]. Как следствие, более мелкие поры постепенно поглощаются

крупными, и средний радиус монотонно возрастает. Установлено [19], что распределение ячеек по размерам при медленной эволюции пены имеет автомодельный характер, при этом форма распределения с приемлемой точностью аппроксимируется логнормальным законом, а средний радиус ячеек в зависимости от времени изменяется как $\langle R_c \rangle(t) \propto t^{1/2}$.

Исследования динамики локальных изменений структуры пены вследствие процессов коалесценции ячеек и поглощений мелких ячеек крупными представляет значительный интерес как с точки зрения установления фундаментальных особенностей формирования структуры пены на мезоскопическом уровне, так и для практических приложений, связанных с синтезом пеноподобных материалов или применением газожидкостных пен в качестве технологических агентов (мониторинг структуры пены в условиях, близких к реальному времени).

Приемлемым подходом к экспериментальной реализации бесконтактного мониторинга локальных структурных перестроек в эволюционирующих газожидкостных пенах является метод спекл-коррелометрии, основанный на эффекте многократного динамического рассеяния лазерного излучения в зондируемых средах. При этом анализируются значения времени корреляции флуктуаций интенсивности спекл-модулированного лазерного излучения в зависимости от характеристик структуры зондируемых систем. Следует отметить, что ранее диагностические подходы, использующие эффект динамической спекл-модуляции многократно рассеянного лазерного излучения в нестационарных средах (в частности, диффузионно-волновая спектроскопия [20,21]) были применены различными исследовательскими группами для исследования динамики развития газожидкостных и полимерных пен. В этой связи следует особо упомянуть работы Д. Дуриана с сотрудниками по диффузионно-волновой спектроскопии эволюционирующих пен [22–24].

Метод лазерного спекл-корреляционного зондирования с использованием низкоинтенсивного лазерного излучения является неинвазивным диагностическим подходом, не оказывающим какого-либо существенного влияния на зондируемую среду. Это является одним из его главных достоинств (особенно в биомедицинских приложениях и при решении деликатных диагностических задач в физическом материаловедении). В то же время контролируемые физические воздействия на зондируемую среду в процессе спекл-корреляционной диагностики, не приводящие к кардинальным изменениям ее структурных и физико-химических свойств, позволяют существенно расширить функциональные возможности диагностики. Характерным примером является исследование влияния температурного фактора на время корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения, по сути являющееся в настоящее время одной из рутинных процедур в физическом материаловедении коллоидных систем.

Эффективность рассеяния акустического излучения и характер взаимодействия со случайно-неоднородными средами зависит от соотношения размеров и формы локальных гетерогенных включений и длины акустической волны [25–28]. Стоит отметить, что высокоинтенсивное ультразвуковое воздействие на метастабильные пеноподобные среды может приводить к нелинейным эффектам, таким как самоадаптация жидких пленок в ячейках, вихревые потоки жидкой составляющей и др. [29,30]. Кроме того, звуковое воздействие в области низких частот может при определенных условиях оказывать влияние на стабильность газожидкостной пены [31,32].

В этой связи представляет интерес проведение спекл-коррелометрической диагностики эволюционирующих пен одновременно с низкочастотным акустическим воздействием на зондируемый объем пены.

Распространение акустического излучения в случайно-неоднородной структуре газожидкостной пены может оказывать определенное влияние на локальные структурные перестройки в кластерах, объединяющих несколько соседних ячеек, ускоряя или, напротив, подавляя их.

Целью настоящей работы явилась экспериментальная реализация подобного подхода, который можно определить как „акусто-модуляционная спекл-коррелометрия“, для исследования эффекта акустического воздействия на динамику локальных структурных перестроек в эволюционирующих газожидкостных пенах, и интерпретация полученных экспериментальных данных.

1. Методика проведения экспериментов

На рис. 1 представлена схема используемой лабораторной спекл-коррелометрической системы с одновременным воздействием низкочастотного акустического излучения на зондируемый объем пены. В качестве источника излучения I использовался гелий-неоновый лазер ГН-5П (длина волны 633 nm, выходная мощность 5 mW, линейная поляризация, производитель — НПО „Плазма“, г. Рязань, РФ). Исследуемый образец газожидкостной пены располагался в кювете 2; акустическое воздействие на зондируемый объем осуществлялось с помощью пьезоэлектрического актуатора UL103 (3, производитель Hunan Mac Sensor Co., Ltd), возбуждаемого гармоническим сигналом с амплитудой 100 mV и частотой 2 kHz с генератора сигналов специальной формы Agilent-33220A. Рассеянное перед образцом пены спекл-модулированное лазерное излучение регистрировалось с кадровой частотой 1000 s^{-1} с помощью КМОП-камеры OptronisCamRecord 3000 с объективом TamronforNikon 70-210 4. Оптическая система камера–объектив фокусировались на поверхность образца, и типичное количество спеклов в пределах кадра составляло от 22 до 25.

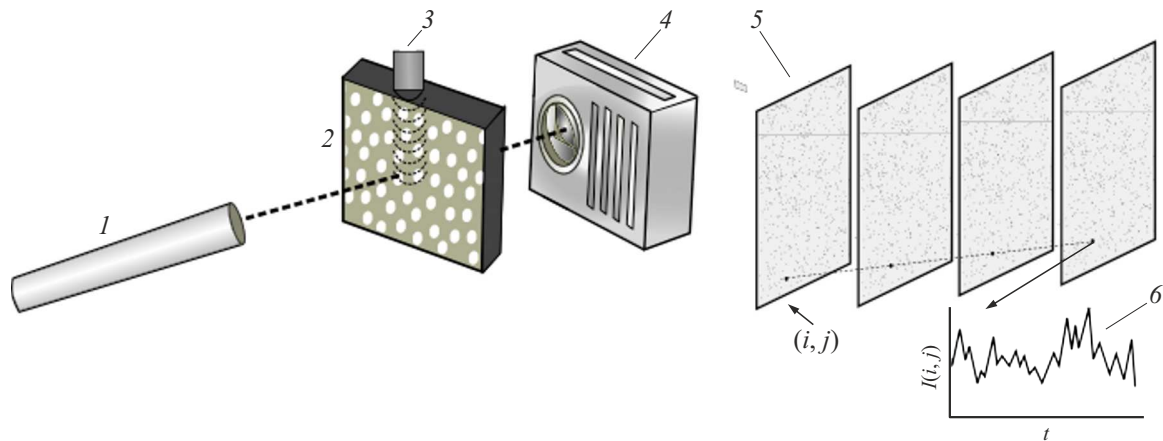


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — гелий-неоновый лазер ГН-5П (633 нм, 5 мВт); 2 — кювета с образцом пены; 3 — пьезоэлектрический актуатор; 4 — КМОП-камера; 5 — схематическое изображение последовательности регистрируемых кадров; 6 — качественное отображение временной реализации флуктуаций интенсивности в произвольно выбранном пикселе.

В качестве модельных образцов эволюционирующей газожидкостной пены использовался крем для бритья Gillette FoamyRegular, закачиваемый в стеклянные кюветы высотой 75 мм, шириной 25 мм и толщиной 3 мм с помощью шприца непосредственно после напуска из баллона с кремом. Следует отметить, что в течение эксперимента средний диаметр ячеек (газовых пузырей) в пене не превышал 100 мкм, что обеспечивало существенно многократный режим рассеяния при распространении зондирующего излучения в слое пены. Действительно, в соответствии с [22] типичное значение транспортной длины распространения излучения видимого диапазона в пене со средним диаметром ячеек $\langle D \rangle$ составляет приблизительно $\langle 3.5D \rangle$, что значительно меньше толщины кюветы.

После закачки образцов пены кюветы запечатывались с помощью клея стеклянными пластинками толщиной 1.3 мм для минимизации испарения жидкой фазы из пены; озвучивание образцов пены осуществлялось через эти покровные пластинки. Для контроля величины потерь жидкой фазы в ходе эксперимента производилось взвешивание кювет с образцами в начале и конце эксперимента с помощью лабораторных весов DL-123 (производитель ДЭМКОМ, Китай, погрешность не хуже 0.01 г). Установлено, что потери жидкой фазы вследствие испарения не превышают 1% от исходной массы образцов. Волюмометрические измерения показали, что объемная доля жидкой фазы f в исследуемых образцах составляла ~ 0.07 . В ходе экспериментов также производилась регистрация микроскопических изображений поверхности пены в кюветах при линейном увеличении $2 \mu\text{m}/\text{pixel}$. В результате статистической обработки полученных изображений затем определялись значения среднего радиуса ячеек $\langle R_c \rangle(t)$ в различные моменты времени.

Анализ последовательностей спекл-модулированных изображений, регистрируемых КМОП-камерой

OptronisCamRecord 3000 (позиция 4 на рис. 1) производился по следующему алгоритму:

- из полученных видеорядов выделялись фрагменты длительностью 30 с и производилась их раскадровка;

- в каждом кадре в выбранном фрагменте произвольным образом выбирался пиксель с координатами i, j , для которого в пределах фрагмента восстанавливалась временная реализация регистрируемой яркости $\{I_{i,j}^k\}$, где k — номер кадра;

- для выбранного пикселя вычислялась нормированная автокорреляционная функция:

$$g_{i,j}^2(\Delta k) = \frac{\sum_{m=\Delta k}^{N-\Delta k} (I_{i,j}^m - \overline{I_{i,j}})(I_{i,j}^{m+\Delta k} - \overline{I_{i,j}})}{\sum_{m=\Delta k}^{N-\Delta k} (I_{i,j}^m - \overline{I_{i,j}})^2}, \quad (1)$$

где $\overline{I_{i,j}}$ — усредненное по выборке $\{I_{i,j}^k\}$ значение регистрируемой яркости пикселя, N — количество кадров в выборке;

- данная процедура повторялась для M случайным образом выбираемых пикселей, после чего производилось усреднение нормированных автокорреляционных функций по полученному ансамблю;

- по полученной усредненной автокорреляционной функции $\langle g_{i,j}^2(\Delta k) \rangle$ определялось в общем случае целое значение \tilde{k} , соответствующее спаду $\langle g_{i,j}^2(\Delta k) \rangle$ в e раз; по нему затем вычислялось время корреляции флуктуаций интенсивности $\tau_c \approx \tilde{k}/f$ в момент времени, соответствующий середине обрабатываемого фрагмента видеоряда.

Подобное двойное усреднение выборочных данных спекл-коррелометрии (по времени и по ансамблю) существенно повышает робастность оценок времени корреляции флуктуаций интенсивности.

2. Результаты экспериментов

На рис. 2 приведены зависимости среднего радиуса ячеек (газовых пузырей) $\langle R_c \rangle$ от времени в логарифмических координатах в отсутствие 1 и при наличии 2 постоянного акустического воздействия на образцы модельной пены. Значения $\langle R_c \rangle$ получены в результате статистической обработки растровых микроскопических изображений структуры эволюционирующей пены, регистрируемых в ходе эксперимента.

Данный результат хорошо согласуется с известным соотношением для эволюционирующих газожидкостных пен при относительно малых значениях объемной доли жидкой фазы $f \leq 0.2$: $[\langle R_c \rangle(t)]^2 - [\langle R_c \rangle(t_0)]^2 \approx \alpha(t - t_0)$ (см., например, [16]). Значения $\langle R_c \rangle(t_0)$ и t_0 соответствуют переходу к автомодельному режиму эволюции пены, а параметр α может рассматриваться как константа скорости для квадрата среднего радиуса ячеек. Очевидно, что при $t \gg t_0$ и соответственно $\langle R_c \rangle(t) \gg \langle R_c \rangle(t_0)$ имеет место соотношение $[\langle R_c \rangle(t)]^2 \approx \alpha t$, приемлемо согласующееся с представленными на рис. 2 экспериментальными данными. В то же время параметр α в случае акустического воздействия значительно (приблизительно в 2.15 раз) превышает соответствующую величину в отсутствие акустического воздействия. Возможная интерпретация этой особенности обсуждается в разд. 3.

На рис. 3 представлены результаты спекл-корреляционного анализа структурных изменений в эволюционирующих образцах модельных пен в форме сглаженных зависимостей времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения от времени эволюции в отсутствие и при наличии акустического воздействия. Зависимости представлены в логарифмических координатах и на малых временах старения (до $\sim 4 \cdot 10^4$ s) с приемлемой точностью допускают

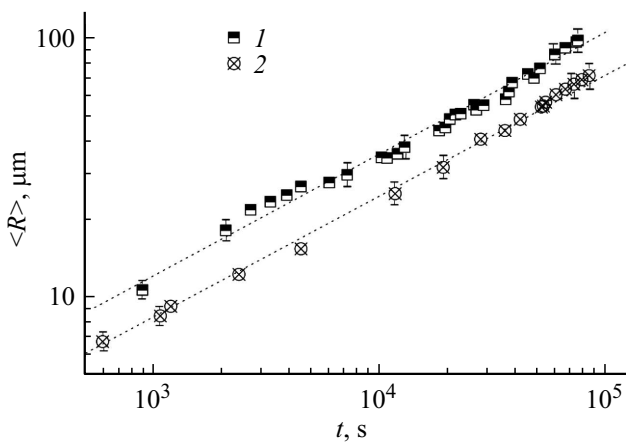


Рис. 2. Зависимости $\langle R_c \rangle$ от времени при акустическом воздействии на исследуемые образцы (1) и в отсутствие акустического воздействия (2). Пунктирные линии соответствуют аппроксимации $\langle R_c \rangle \propto t^{0.5}$. Выборочно показанные доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 0.9.

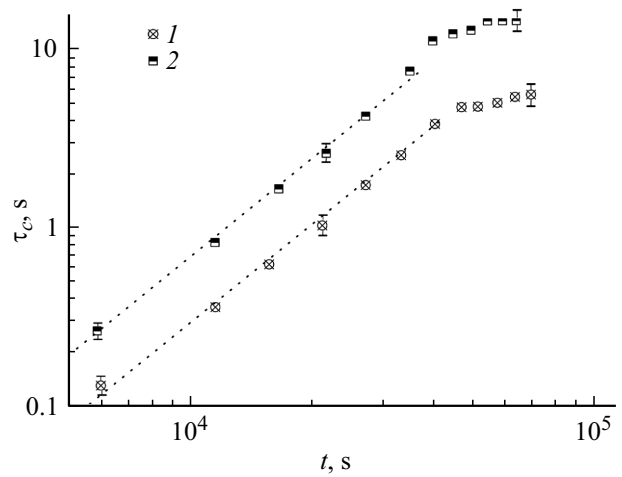


Рис. 3. Зависимости времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного эволюционирующими пенами лазерного излучения от времени проведения эксперимента в отсутствие акустического воздействия (1) и при воздействии (2). Соответствие между маркерами и отображаемыми данными то же, что и на рис. 2. Пунктирные линии соответствуют аппроксимации $\tau_c \approx \tilde{\alpha} t^{1.73}$. Выборочно показанные доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 0.9.

степенные аппроксимации вида $\tau_c \approx \tilde{\alpha} t^\beta$, где показатель $\beta \approx 1.73$ приблизительно одинаков для обеих наборов данных, а нормировочный коэффициент $\tilde{\alpha}$ в случае акустического воздействия приблизительно в 2.27 раза больше (что близко к соотношению для констант скоростей α).

Для дальнейшего обсуждения представляет интерес взаимосвязь между текущими значениями среднего радиуса ячеек $\langle R_c \rangle$ и временем корреляции флуктуаций интенсивности τ_c при используемых условиях проведения эксперимента. Рис. 4 иллюстрирует подобную взаимосвязь при отсутствии и наличии акустического воздействия.

3. Обсуждение результатов

Как следует из полученных экспериментальных данных, влияние низкочастотного акустического воздействия на эволюционирующие модельные пены приводит к возрастанию константы скорости α , определяющей кинетику увеличения квадрата среднего радиуса ячеек в процессе старения пены (foam coarsening в англоязычной терминологии) и нормировочного коэффициента $\tilde{\alpha}$ для времени корреляции флуктуаций интенсивности. Для интерпретации этих особенностей следует рассмотреть, с одной стороны, основные физические механизмы, контролирующие локальные перестройки структуры пены в процессе ее эволюции. С другой стороны, следует учитывать интегральное влияние этих локальных структурных перестроек на оптические транспортные параметры эволюционирующей пены, влияющие на эф-

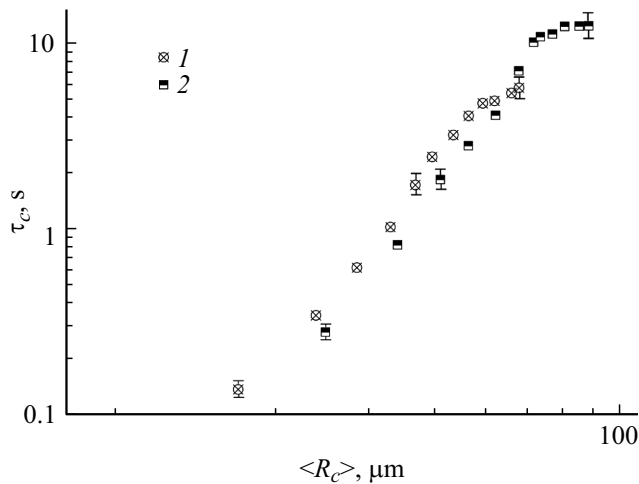


Рис. 4. Взаимосвязь между текущими значениями среднего радиуса ячеек и временем корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения для исследуемых модельных образцов пены в отсутствие акустического воздействия (1) и при воздействии (2). Выборочно показанные доверительные интервалы соответствуют уровню значимости 0.9.

факт временной декорреляции флуктуаций интенсивности. Исходя из основного соотношения диффузионно-волновой спектроскопии для флуктуаций рассеянного поля (см., например, [20]):

$$|g_1(\tau)| = \int_0^\infty \exp\left(-\frac{k_0^2 \langle \Delta r^2(\tau) \rangle}{3} \cdot \frac{s}{l^*}\right) \rho(s) ds, \quad (2)$$

можно сделать вывод, что увеличение транспортной длины l^* распространения зондирующего излучения в среде очевидным образом приводит к более медленному спаду временной корреляционной функции флуктуаций рассеянного поля (и соответственно определяемой в нашем случае из экспериментальных данных смещенной автокорреляционной функции флуктуаций интенсивности $g_2(\tau) = |g_1(\tau)|^2$). В выражении (2) $\rho(s)$ — плотность вероятности значений путей распространения s парциальных составляющих рассеянного светового поля в зондируемой среде, k_0 — волновое число зондирующего излучения, $\langle \Delta r^2(\tau) \rangle$ — средний квадрат смещения рассеивающих центров за время τ . Отметим, что в процессе эволюции пены имеет место как возрастание транспортной длины l^* , пропорциональной $\langle R_c \rangle(t)$ [22], так и уменьшение подвижности рассеивающих центров в пене, роль которых выполняют межфазные границы: $d(\sqrt{\langle \Delta r^2(\tau) \rangle})/dt \propto d\langle R_c \rangle(t)/dt \propto t^{-\frac{1}{2}}$.

Исходя из взаимосвязи текущих значений среднего радиуса ячеек в эволюционирующей пене и времени корреляции флуктуаций интенсивности рассеянного лазерного излучения, отображаемой рис. 4, можно предположить достаточно универсальный характер взаимосвязи между $\langle R_c \rangle$ и параметром $d\langle R_c \rangle(t)/dt$, характеризующим усредненную по ансамблю подвижность меж-

фазных границ и соответственно временем корреляции флуктуаций интенсивности. По крайней мере, подобная универсальность, следующая из степенных зависимостей $\langle R_c \rangle$ и τ_c от времени старения пены (рис. 2, 3), проявляет себя при значениях $\langle R_c \rangle$, не превышающих 80–90 μm . Насыщение значений τ_c , имеющее место при больших значениях времени старения и соответственно $\langle R_c \rangle$, предположительно обусловлено переходом от существенно многократного режима динамического рассеяния лазерного излучения, описываемого выражением (2), к малократному рассеянию вперед. Подобный механизм динамического рассеяния „включается“, когда транспортная длина l^* становится сопоставимой с толщиной рассеивающего слоя. Изменение транспортной длины в процессе эволюции газожидкостной пены также взаимосвязано с изменением еще одного параметра рассеяния излучения — длины рассеяния l_s . Такая взаимосвязь задается параметром анизотропии g согласно соотношению $l^* = l_s / (1 - g)$. Для изотропного режима рассеяния параметр анизотропии $g \approx 0$, для анизотропного рассеяния с преимущественным рассеянием вперед параметр анизотропии $g \approx 1$. В модельной газожидкостной пене развитие системы с течением времени приводит к изменению механизмов рассеяния. И, как было показано в [33], на охваченных в эксперименте временных интервалах имеет место „оптическая“ инверсия, проявляющаяся в переходе от режима рассеяния газовых пузырей в жидкости к рассеянию областями пересечений границ ячеек пены в газовой матричной среде, что сопровождается ростом параметра анизотропии рассеяния g от значений порядка 0.1 к значениям, большим 0.6.

Установленное в настоящей работе влияние акустической модуляции на константу скорости может быть качественно интерпретировано в соответствии с представлениями о механизме локальных перестроек структуры пены, для исследуемого интервала значений объемной доли жидкой фазы в первую очередь связанном с диффузионным переносом газа из более мелких соседних ячеек в более крупные. В соответствии с [34] этот процесс описывается выражением $dR/dt \propto 1/R - 1/R_{cr}$, где R_{cr} — критический радиус ячейки. Критический радиус газовой ячейки газожидкостной пены — это условный радиус мгновенного диффузного равновесия с окружающими ячейками: газовые ячейки с радиусом, большим критического, будут увеличиваться за счет диффузии газа из ячеек, имеющих радиусы, меньше критического. Этот процесс контролируется разностью избыточного давления Лапласа внутри данной ячейки и усредненным по ансамблю ячеек критическим давлением, определяемым средним размером ячеек. В процессе эволюции пены с течением времени критический радиус увеличивается [19].

Совокупность локальных процессов переноса газа между соседними ячейками и определяет константу скорости α . В соответствии с [35] данный параметр, называемый в англоязычной литературе „the coarsening

rate“, зависит от ряда факторов, включая внешнее давление. Следует учитывать, что в рассматриваемом случае низкочастотной акустической модуляции эволюционирующей пены длина акустической волны в пене многократно превышает характерные размеры области взаимодействия лазерного излучения со средой. Действительно, в низкочастотной области типичное значение скорости звуковых волн в газожидкостных пенах при малых объемных долях жидкой фазы составляет ~ 50 м/с (см., например, [30]). При частоте акустического воздействия 2 кГц длина звуковой волны составляет приблизительно 2.5 см. Таким образом, учитывая, что поперечные размеры зоны взаимодействия составляют несколько миллиметров, можно предположить квазигомогенное распределение знакопеременного избыточного давления по зоне взаимодействия. Подобное воздействие даже при относительно небольших значениях амплитуды звуковой волны может приводить к интенсификации локальных структурных перестроек в зондируемом объеме и газообмена между соседними ячейками, что, предположительно, и является причиной увеличения константы скорости α при акустическом воздействии.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что как в случае низкочастотного акустического воздействия на эволюционирующую газожидкостную пену, так и в отсутствие воздействия имеют место универсальные соотношения между временем старения и усредненными по ансамблю характеристиками локальных структурных перестроек, приводящие к автомодельному режиму эволюции структуры, соответствующему степенной зависимости среднего радиуса ячеек от времени старения с показателем, равным 0.5. В то же время акустическое воздействие существенно влияет на константу скорости, соответствующую данному автомодельному режиму, приводя к ее значительному увеличению. Эта особенность, предположительно, обусловлена интенсификацией локального газообмена между соседними ячейками при акустическом воздействии.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление особенностей влияния различных факторов (включая температуру, частоту и амплитуду звуковой волны) на кинетику структурных перестроек в эволюционирующих пенах.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00679 <https://rscf.ru/project/25-29-00679/> (Разработка комплексного акустического и когерентно-оптического анализатора морфофункциональных характеристик нестационарных дисперсных систем и пористых сред для мониторинга процессов синтеза и функционализации материалов).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Thomson. *Acta Math.*, **11**, 121 (1887). DOI: 10.1007/BF02612322
- [2] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley. *Metal Foams: A Design Guide* (Butterworth-Heinemann, Boston, 2000)
- [3] J. Banhart. *Prog. Mater. Sci.*, **46** (6), 559 (2001). DOI: 10.1016/S0079-6425(00)00002-5
- [4] F. Garcia-Moreno. *Materials*, **9** (2), 85 (2016). DOI: 10.3390/ma9020085
- [5] S.J. Hollister. *Nat. Mater.*, **4** (7), 518 (2005). DOI: 10.1038/nmat1421
- [6] D.W. Hutmacher. *Biomaterials*, **21** (24), 2529 (2000).
- [7] J.J. Barry, H.S. Gidda, C.A. Scotchford, S.M. Howdle. *Biomaterials*, **25** (17), 3559 (2004). DOI: 10.1016/j.biomaterials.2003.10.022
- [8] S. Schiavoni, F. Bianchi, F. Asdrubali. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **62**, 988 (2016). DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
- [9] N.V. Gama, A. Ferreira, A. Barros-Timmons. *Materials*, **11** (10), 1841 (2018). DOI: 10.3390/ma11101841
- [10] T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, L. Wang. *J. Appl. Polym. Sci.*, **138** (45), 51280 (2021). DOI: 10.1002/app.51280
- [11] D. Weaire, S. Hutzler. *The Physics of Foams* (Oxford University Press, Oxford, 1999)
- [12] R. Lemlich. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **17** (2), 89 (1978). DOI: 10.1021/i160066a001
- [13] R. Höhler, S. Cohen-Addad. *J. Phys.: Condens. Matter*, **17** (41), R1041 (2005). DOI: 10.1088/0953-8984/17/41/R01
- [14] A. Saint-Jalmes. *Soft Matter*, **2** (10), 836 (2006). DOI: 10.1039/B606780H
- [15] D. Langevin. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **275**, 102077 (2020). DOI: 10.1016/j.cis.2019.102077
- [16] D.J. Durian. *Adv. Chem. Eng.*, **26**, 1 (2001). DOI: 10.1016/S0065-2377(01)26003-2
- [17] S. Hilgenfeldt, S.A. Koehler, H.A. Stone. *Phys. Rev. Lett.*, **86** (20), 4704 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4704
- [18] S.A. Koehler, S. Hilgenfeldt, H.A. Stone. *Langmuir*, **16** (15), 6327 (2000). DOI: 10.1021/la9913147
- [19] D.A. Zimnyakov, S.A. Yuvchenko, A.A. Isaeva, E.A. Isaeva, D.V. Tsy-pin. *Colloids Surf., A*, **579**, 123693 (2019). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123693
- [20] D.J. Pine, D.A. Weitz, P.A. Chaikin, E. Herbolzheimer. *Phys. Rev. Lett.*, **60** (12), 1134 (1988). DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.1134
- [21] S. Cohen-Addad, R. Höhler. *Phys. Rev. Lett.*, **86** (20), 4700 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.4700
- [22] D.J. Durian, D.A. Weitz, D.J. Pine. *Science*, **252** (5006), 686 (1991). DOI: 10.1126/science.252.5006.686
- [23] D.J. Durian. *Phys. Rev. E*, **51** (4), 3350 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevE.51.3350
- [24] D.J. Durian, D.A. Weitz, D.J. Pine. *Phys. Rev. A*, **44** (12), R7902 (1991). DOI: 10.1103/PhysRevA.44.R7902
- [25] S. Gholizadeh. *Procedia Structural Integrity*, **1**, 50 (2016). DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.008

- [26] A. Vary. *Material property characterization*. In: P.O. Moore (ed.) *Nondestructive Testing Handbook. Ultrasonic Testing* (ASTM, Columbus, 2007), v. 7, p. 365.
- [27] D.W. Fitting, L. Adler. *Ultrasonic spectral analysis for nondestructive evaluation* (Plenum Press, NY., 1981), p. 354.
- [28] F. Chevillotte, C. Perrot. *J. Acoustical Society of America*, **142** (2), 1130 (2017). DOI: [10.1121/1.4999058](https://doi.org/10.1121/1.4999058)
- [29] J. Pierre, B. Dollet, V. Leroy. *Phys. Rev. Lett.*, **112** (14), 148307 (2014). DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.148307](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.148307)
- [30] F. Elias, J. Crassous, C. Derec, B. Dollet, W. Drenckhan, C. Gay, V. Leroy, C. Nouÿs, J. Pierre, A. Saint-Jalmes. *Current Opinion in Colloid & Interface Sci.*, **50**, 101391 (2020). DOI: [10.1016/j.cocis.2020.101391](https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.101391)
- [31] C.Y. Ng, B. Yang, H. Park, L. Wang. *Minerals Engineer.*, **184** (2), 107654 (2022). DOI: [10.1016/j.mineng.2022.107654](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107654)
- [32] S.V. Komarov, M. Kuwabara. *ISIJ Int*, **39**, 1207 (1999).
- [33] Д.А. Зимняков, С.А. Ювченко, А.А. Исаева, Е.А. Исаева, О.В. Ушакова. *Опт. и спектр.*, **125** (5), 23 (2018). DOI: [10.21883/OS.2018.11.46846.99-18](https://doi.org/10.21883/OS.2018.11.46846.99-18) [D.A. Zimnyakov, S.A. Yuvchenko, A.A. Isaeva, E.A. Isaeva, O.V. Ushakova. *Opt. Spectr.*, **125** (5), 795 (2018). DOI: [10.1134/S0030400X18110371](https://doi.org/10.1134/S0030400X18110371)]
- [34] K. Feitosa, O.L. Halt, R.D. Kamien, D.J. Durian. *Europhys. Lett.*, **76** (4), 683 (2006). DOI: [10.1209/epl/i2006-10304-5](https://doi.org/10.1209/epl/i2006-10304-5)
- [35] M. Pasquet, N. Galvani, A. Requier, S. Cohen-Addad, R. Höhler, O. Pitois, E. Rio, A. Salonen, D. Langevin. *Soft Matter*, **19** (31), 6267 (2023). DOI: [10.1039/D3SM00695A](https://doi.org/10.1039/D3SM00695A)