

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ И МЕТАМАТЕРИАЛЫ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 225–232
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 225–232
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

Научная статья
УДК 534.08

Акустоэмиссионный метод анализа структурной эволюции пеноподобных сред

Е. А. Исаева[✉], А. А. Исаева, М. В. Алонова

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Исаева Елена Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, AuthorID: 631180

Исаева Анна Андреевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, AuthorID: 732490

Алонова Марина Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431

Аннотация. В метастабильных газожидкостных пенах в процессе их эволюции происходят структурные перестройки в условиях локального массопереноса жидкой и газовой компонент системы. События перегруппировки и коалесценций газовых пузырей могут быть единичными или каскадными за счет разрушения пленок соседних газовых пузырей. Подобные структурные изменения архитектуры пены будут отражены на её акустическом эмиссионном спектре. Структурная модификация газожидкостных пен в условиях постоянного соотношения объемных долей жидкости и газа регулируется капиллярными силами, толщиной пленки и площадью жидких пленок пены. В данной работе рассмотрено типичное поведение спектра акустической эмиссии газожидкостной пены в области малых частот при универсальной степенной зависимости среднего радиуса газовой ячейки от времени.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, газожидкостная пена, автомодельность, скаффолды

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00679, <https://rscf.ru/project/25-29-00679/>).

Для цитирования: Исаева Е. А., Исаева А. А., Алонова М. В. Акустоэмиссионный метод анализа структурной эволюции пеноподобных сред // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 225–232. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

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

Article

Acoustic emission method for analyzing the structural evolution of foam-like media

Е. А. Isaeva[✉], А. А. Isaeva, М. V. Alonova

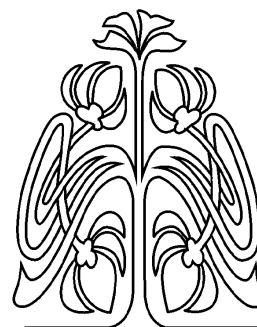
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

Elena A. Isaeva, 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, AuthorID: 631180

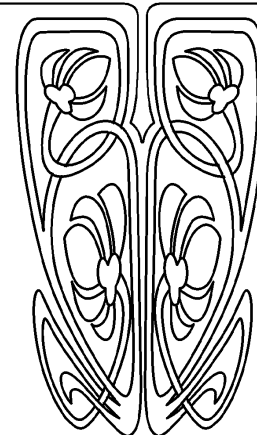
Anna A. Isaeva, isanna.1987@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, AuthorID: 732490

Marina V. Alonova, alonova_marina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7772-3985>, AuthorID: 667431

© Исаева Е. А., Исаева А. А., Алонова М. В., 2026



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





Abstract. Background and Objectives: In metastable gas-liquid foams, structural rearrangement occurs during their evolution under conditions of local mass transfer of the liquid and gas components of the system. Rearrangement and coalescence events of gas bubbles will be reflected in the foam's acoustic emission spectrum. Structural modification of gas-liquid foams under conditions of constant volume fractions of liquid and gas is governed by capillary forces, film thickness, and the area of the foam's liquid films. This work examines the typical behavior of the acoustic emission spectrum of a gas-liquid foam in the low-frequency region, considering the scaling dependence of the average gas cell radius on time.

Materials and Methods: The acoustic emission spectrum of a model gas-liquid foam was studied during its evolution in the low-frequency range. Using microscopy methods, the temporal dependencies of changes in the average foam gas cell size were obtained. **Results:** The time dependence of the average size of gas cells in a model gas-liquid foam exhibits a characteristic power-law dependence on time with an exponent of 0.5. The recorded acoustic signal is generated by a set of coalescence and rearrangement events of gas cells within the medium and, during foam evolution, will be described by a characteristic spatial scale proportional to the average bubble size $\langle R(t) \rangle$. **Conclusion:** The possibility of using acoustic emission signal analysis to study the structural modifications in a metastable two-component system during its evolution under self-similarity conditions has been demonstrated. It has been shown that the scaling laws governing the evolution of the gas-liquid foam's emission spectra and the dependence of the average gas cell radius reflect the dynamic self-similarity. The comparison of critical exponents allows us to analyze the kinetics of local inhomogeneity changes and the morphological evolution of the two-component system.

Keywords: acoustic emission, gas-liquid foam, self-similarity, scaffolds

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-29-00679, <https://rscf.ru/project/25-29-00679/>).

For citation: Isaeva E. A., Isaeva A. A., Alonova M. V. Acoustic emission method for analyzing the structural evolution of foam-like media. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 225–232 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-225-232>, EDN: XHJCGF

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

Введение

Метод акустической эмиссии имеет большой потенциал как метод оценки структурной модификации двухфазных сред в условиях локального массопереноса компонент системы.

Методы диагностики структурной модификации пеноподобных систем играют важную роль в задачах биомедицины. Так, пористые 3D структуры, в том числе скаффолды, активно внедряющиеся в регенеративной медицине, могут быть использованы для доставки биохимических факторов, лекарств, жизненно важных питательных веществ, оказания механического и биологического воздействия на поведение клеток [1, 2]. Контроль структурных параметров каркасов в режиме реального времени и управление их эволюцией в процессе синтеза позволит повысить функциональность скаффолдов [3–6].

К существующим методам анализа структурных и функциональных свойств неравновесных объемных пен в процессе эволюции в режиме реального времени можно отнести методы диффузионно-волновой спектроскопии (ДВС), активно развивающиеся применительно к анализу структурных эволюций подобных нестационарных двухкомпонентных пен. С использованием методов ДВС показано, что ключевыми параметрами в эволюции газожидкостных пен являются объемная доля жидкости и средний размер газовых пузырьков пены [7–9]. Методом томографии выявлены универсальные законы изменения распределения газовых ячеек в газожидкостной пене по размерам с течением времени [10]. Однако такой подход требует

особой подготовки образцов и не подходит для реализации диагностики структуры объемных пеноподобных сред в режиме реального времени.

Метод пассивного акустического мониторинга в условиях улучшения механизмов сбора и распознавания звуков становится перспективным для мониторинга состояния процессов образования и схлопывания газовых пузырьков [11].

Газожидкостные пены относятся к модельным системам изучения локального массопереноса и динамики структурных реконфигураций неупорядоченных ячеистых систем. Эволюция метастабильных систем сопровождается медленным постепенным ростом размера газовой ячейки в результате локального перераспределения газовой составляющей и быстрыми событиями перестройки (коалесценциями) в результате разрыва жидкой пленки и локального перераспределения жидкой компоненты системы. В процессе таких структурных перестроек формируется акустический эмиссионный сигнал, параметры и взаимодействие которого со структурными элементами системы определяются морфологическими особенностями развития системы. Эмиссионный сигнал представляет собой широкополосный спектр с возможными ярковыраженными модами на определенных частотах.

Наиболее часто в работах рассматривают моды колебаний единичных газовых пузырей в жидкости, описываемые частотами Миннаерта [12–14]. Значение частоты Миннаерта для газового пузырька в жидкости зависит от его размеров и гидродинамики. Для пузырька радиусом



от 30 нм до 300 мкм в несжимаемой жидкости частота Миннаерта варьируется примерно от 100 МГц до 10 кГц [15]. Для коммерческой пены Gillette критический радиус, определяющий резкий скачок в скорости распространения акустических волн, соответствует значению порядка 72 мкм и частоте Миннаерта порядка 40 кГц. [16].

Анализ всего спектра акустической эмиссии несет информацию не только о поведении отдельных газовых пузырей, но и о развитии и структурных перестройках системы в целом. Именно анализу единичных газовых пузырей в жидкости, в частности, в области собственной резонансной частоты пузыря, посвящено много работ. Так, было получено соотношение между распределением энергии спектра эмиссии и формой разрывающегося на поверхности неньютоновской жидкости единичного газового пузыря [17]. Проведен анализ энергий деформаций при коалесценции единичных пузырей и лавинных коалесценциях в газожидкостных пенах [18].

Акустический эмиссионный подход применим и для анализа случайно-неоднородных сред с нестационарной структурой [19]. Взаимосвязь формы и размеров структурных элементов пены на разных этапах развития системы с акустическим эмиссионным сигналом была проанализирована в работе [20].

В газожидкостных пенах спектр акустической эмиссии лежит в широком диапазоне частот, что говорит о одновременных каскадных коалесценциях пузырей в пене. В работе [21] показано, что интенсивность и статистика событий перестройки и коалесценции связаны с акустическим сигналом, и акустическая эмиссия позволяет отслеживать кинетику разрушения пенной структуры. Для эмиссионного сигнала газожидкостных пен обычно выделяют интервалы, связанные с особенностями структурных перестроек. Энергетические компоненты, регистрируемые в частотном интервале в области высоких частот 10–50 кГц, связывают с резонансами коллапсирующих газовых пузырей и их коллективными колебаниями [22]. Формирование акустического сигнала в области низких частот ассоциируются со структурными перестройками в пене и характерным «потрескиванием» пенной структуры. [23].

Кинетика развития локальных нестабильностей (коалесценций) и оствальдовского созревания газожидкостной пены зависит от объемных

долей компонент системы, взаимного распределения компонент в пространстве и их геометрических параметров [24]. Геометрический размер газового включения в случайно-неоднородной среде, характеризующейся монодисперсным распределением газовых ячеек внутри жидкого каркаса, в отсутствие синерезиса в текущий момент времени определяется только объемной долей жидкой составляющей. Кинетика развития архитектуры таких систем сопровождается перестройками, обусловленными постепенным ростом радиуса газового пузыря внутри ячейки. В пеноподобных полидисперсных системах между составными элементами жидкого каркаса – пленками и каналами и призмами Плато – Гиббса – могут развиваться эффекты изменения соотношения их объемных долей. Критическая толщина жидкой пленки влияет на характер коалесценции и локальность захватываемого коалесценцией объема газовых ячеек. Для квазидвумерных газожидкостных пен показано, что вторичная индуцированная коалесценция газовых пузырей зависит от объемной доли жидкости, и при её уменьшении наблюдается уменьшение количества захваченных в процесс коалесценции пузырей [25]. Переход от «сухой» к «влажной» пене в процессе развития системы может оказывать влияние на капиллярные давления и доли жидкостей в пленках, каналах и призмах Плато – Гиббса и также влиять на регистрируемые сигналы [26]. Запас жидкой компоненты в рассеивающем каркасе определяет массы мелких капель от разрыва первой пленки, разлетающихся при коалесценции и индуцирующих разрыв соседних пленок [27]. Для газовых пузырьков в жидкости продемонстрировано, что лавинная коалесценция зависит от длины и кривизны тонких жидких пленок [28]. Процесс синерезиса жидкости также оказывает влияние на формирование коалесценций, и при дренаже жидкости пленки большой длины истончаются локально, а пленки малой длины истончаются по всей длине [29]. Альтернативным критическим параметром помимо толщины пленки и объемной доли жидкости можно рассмотреть площадь поверхности жидкой пленки. Так, показано, что в пенах в случае определенного капиллярного давления вероятность коалесценций определяется площадью пленки, разделяющей два пузыря [30].

Таким образом, в процессе эволюции газожидкостной пены при неизменной объемной



доле жидкой компоненты её структурные модификации регулируются толщинами жидких пленок между газовыми ячейками и радиусами каналов Плато – Гиббса и газовых ячеек. При этом механизмы регуляции и соотношение вкладов коалесценций в результате остальдовского роста пузырей, тепловых и капиллярных волн могут меняться в процессе развития системы. Показано, что в процессе эволюции газожидкостные пены переходят в автомодельный режим, и ряд параметров таких систем описываются степенным законом, имеющим универсальный характер [31, 32]. В таких системах при малой объемной доле жидкости средняя длина пленки линейно росла во времени, а соответствующие распределения таких длин были фактически стационарными при развитии пены в условиях коалесценции газовых ячеек [33]. В самоподобном режиме взаимосвязь средних размеров ячейки и временных масштабов между актами перестройки и плотностью вероятности событий перестройки газовых пузырей может подчиняться степенному закону, имеющему универсальный характер [34, 35].

Сигнал акустической эмиссии пены содержит информацию о структурных эволюциях и скоростях локального массопереноса компонент системы в процессе развития таких систем. В данной работе рассмотрена возможность использования параметров эмиссионного спектра газожидкостной пены для диагностики структурных модификаций в процессе эволюции её архитектуры в автомодельном режиме в области малых частот.

Методы и результаты

Условная схема измерительной ячейки экспериментальной установки, представленная на рис. 1, состояла из шумомера-анализатора «Экофизика 110» с микрофоном МК-265 (50 мВ/Па, частотный диапазон 1.6–20000Гц, Октава-Электрон Дизайн, Россия) и с предусилителем P200 (Октава-Электрон Дизайн, Россия), кюветы с образцом модельной газожидкостной пены (кювета имела отверстие, позволяющие незначительно погружать в нее покрытый пленкой предусилитель с микрофонным капсулем) и шумоизоляционного короба позволяющего значительно убрать шумы в регистрируемом сигнале.

Шумомер-анализатор «Экофизика 110» соединялся с персональным компьютером (ПК). В процессе измерения акустической эмиссии

прибор шумомер-анализатора целиком вместе с кюветой с модельной средой размещался внутри шумоизоляционного короба. Преобразованный шумомер-анализатором сигнал передавался на ПК и обрабатывался с помощью приложения Audacity. В приложении Audacity с использованием встроенных функций преобразования Фурье (частота дискретизации 96 кГц) получали частотные зависимости амплитуды регистрируемого сигнала. Сигнал фонового шума измеряли путем помещения шумомера-анализатора в шумоизоляционный короб в закрытом состоянии без модельной среды. Полученные частотные зависимости амплитуды сигнала акустической эмиссии анализировались во всем частотном диапазоне с учетом уровня шумов. Регистрируемый сигнал переменного выходного напряжения с микрофона записывался на протяжении всего эксперимента.

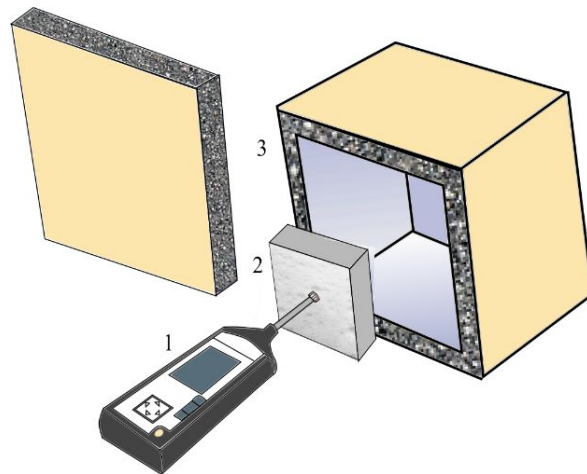


Рис. 1. Условная схема измерительной ячейки экспериментальной установки: 1 – шумомер-анализатор «Экофизика 110» с микрофоном МК-265 и предусилителем P200, 2 – кювета с образцом модельной газожидкостной пены, 3 – шумоизоляционный короб (цвет онлайн)

Fig. 1. The schematic of the experimental measurement cell: 1 – the Ekofizika 110 sound level analyzer equipped with an MK-265 microphone (sensitivity 50 mV/Pa, frequency range 1.6–20000 Hz) and a P200 preamplifier, 2 – the sample cuvette containing the model gas-liquid foam, 3 – the acoustic isolation box (color online)

В качестве модельной среды использовалась газожидкостная пена (крем для бритья Gillette Foamy Regular), которая размещалась в кювете размером 15 x15 мм и имела толщину 6 мм. До эксперимента производились временное закрытие кюветы и ее взвешивание на лабораторных весах (модель: DL-123, производитель – ДЭМКОМ, Россия, Москва) с погрешностью не хуже 0.01 г. (Взвешивание



осуществлялось также и после проведения эксперимента).

После первоначального взвешивания кювета с пеной аккуратно размещалась на дне шумоизоляционного короба; часть поверхности кюветы приоткрывалась для размещения кончика зонда шумомер-анализатора и затем аккуратно запечатывалась липкой пленкой в области контакта зонда шумомера-анализатора и кюветы. В процессе выполнения эксперимента температура окружающей среды была равна 24° С. В процессе старения пены объемная доля жидкой составляющей пены была порядка $\epsilon \approx 0.7$. Кювета располагалась горизонтально; считалось, что до 500 мин влиянием синерезиса на развитие архитектуры можно пренебречь. Для контроля изменения среднего размера газовых пузырей модельных сред проводились оценки геометрических параметров с помощью микроскопической системы с КМОП-камерой (микроскопические объективы Nikon MRP70100 и Nikon MRP70040, камера Thorlabs DCC 1240C-HQ, Thorlabs, Inc., США). Временная зависимость средних (по кювете) значений радиусов сфер $\langle R \rangle(t)$, приравненных к геометрическим размерам газовых ячеек газожидкостной пены, в процессе эволюции системы представлены на рис. 2.

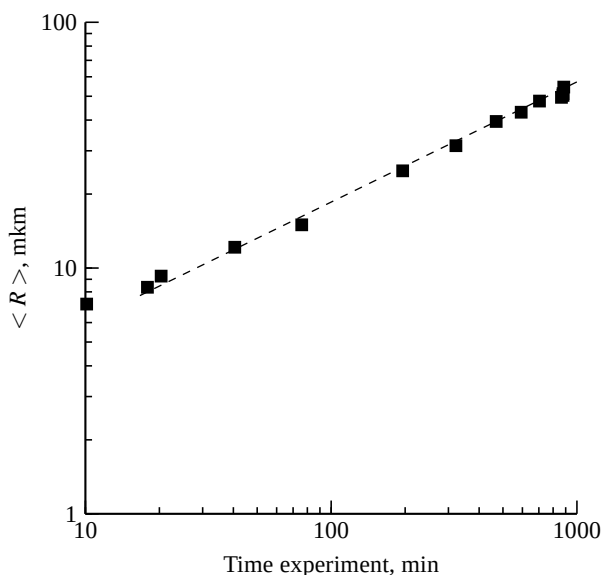


Рис. 2. Временная зависимость средних значений радиусов сфер $\langle R \rangle(t)$, Пунктирная линия – аппроксимация степенным законом с показателем 0.5

Fig. 2. Temporal dependence of the mean radii of spheres $\langle R \rangle(t)$ equivalent to the geometric sizes of gas cells in a gas-liquid foam during system evolution. The dashed line represents a power-law approximation with an exponent of 0.5

Спектральные зависимости сигнала акустической эмиссии модельной системы для разных моментов времени в процессе эволюции пены представлены на рис. 3.

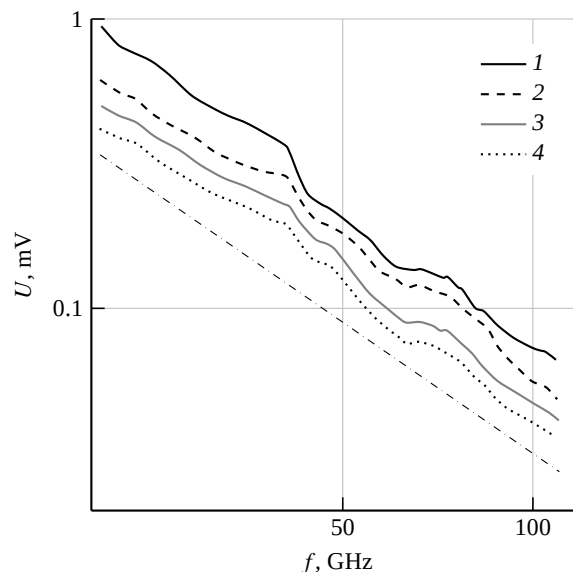


Рис. 3. Регистрируемый сигнал выходного напряжения микрофона для акустической эмиссии газожидкостной пены в процессе эволюции системы с учетом фонового шума в разные моменты времени после начала развития системы: 1 – 60, 2 – 80, 3 – 180, 4 – 215 мин. Пунктирная прямая линия – аппроксимация степенным законом с показателем -1.5

Fig. 3. The recorded microphone output voltage signal for the acoustic emission of a gas-liquid foam during system evolution taking into account background noise at the different time points after the beginning of foam evolution: 1 – 60, 2 – 80, 3 – 180, 4 – 215 min. The straight dashed line represents a power-law approximation with an exponent of -1.5

Обсуждение результатов

По результатам микроскопии в процессе развития системы оценивались изменения среднего размера газовых ячеек. Анализ показал, что временная зависимость средних значений радиусов сфер $\langle R \rangle$ от времени может быть аппроксимирована типичным соотношением описания динамики систем в режиме самоподобия как $\langle R \rangle(t) \propto t^{0.5}$.

Для самоподобных систем изменение распределения радиусов газовых ячеек с течением времени будет описываться характерным критическим радиусом и некоторой постоянной величиной дисперсии распределения пузырей по размерам σ . В таком режиме геометрические параметры структурных элементов (в частности толщина и площадь поверхности жидких пленок) в условиях неизменной объемной доли жидкости и газа также являются зависимыми



от среднего радиуса газовой ячейки, что описывается балансом капиллярных сил и вязкости.

Для подобных систем можно предположить, что акустический сигнал генерируется некоторыми событиями (коалесценции и перестроек внутри структуры за счет разрыва пленок) с характерным пространственным масштабом, пропорциональным $\langle R \rangle(t)$. В режиме автомоделности в разные моменты времени спектр акустической эмиссии должен иметь типичную частоту и некоторую амплитуду, которая будет отражать форму спектра.

В развитии газожидкостных пен ключевую роль играет остальдское созревание пены. Для таких систем существует критический радиус газовых пузырей. Газовые ячейки с радиусом меньшим критического значения постепенно исчезают (за счет диффузии газа) в пузыри большего размера. При схлопывании единичного пузыря возникает локальный дисбаланс равновесия системы, и в этой области может запуститься процесс вторично развивающихся после первого события коалесценций соседних пузырей. Поверхностная энергия, освобождаемая при разрушении пленки при схлопывании пузыря, зависит от радиуса схлопнувшегося пузыря. Чем больше радиус исчезнувшего пузыря, тем большая поверхностная энергия высвобождается в области локального дисбаланса и увеличивается вероятность большего количества каскадных событий разрыва и роста размеров области локального дисбаланса. И можно предположить, что характерное время релаксации для событий структурных перестроек в условиях неизменной вязкости жидкой составляющей системы подчиняется соотношению $\langle t \rangle \propto \langle R(t) \rangle$, и спектр сигнала при этом описывается степенным законом, имеющим универсальный характер. Характерная частота акустической эмиссии f_c в данный момент времени $f_c(t) \propto \frac{1}{\tau} \propto \frac{1}{\langle R(t) \rangle} \propto t^{-0.5}$. В общем виде для процессов с масштабной инвариантностью:

$$G(t, f) = A(t) \cdot F(f/f_c), \quad (1)$$

где $G(t, f)$ – рассматриваемый сигнал, $A(t)$ – функция изменения амплитуды сигнала в данный момент времени, $F(f/f_c)$ – функция подобия.

Для наших экспериментальных данных на некоторой выделенной частоте f_0 , можем наблюдать степенной закон спада амплитуды сигнала акустической эмиссии как $G(t, f_0) \propto t^{-0.5} \propto R^{-1}$. Спектральный закон по полученным экспериментальным данным спектральной мощности

акустической эмиссии в каждый момент времени падает с частотой как $G(t, f) \propto f^{-1.5}$. Таким образом, спектр эмиссионного сигнала подчиняется единому универсальному закону:

$$G(t, f) = R(t)^{0.5} \cdot F(f \cdot R(t)). \quad (2)$$

Подобный результат универсального поведения сигнала акустической эмиссии может быть получен посредством изменения числа рассеивателей в системе, что также должно давать типичное поведение параметров системы в процессе её развития, описываемое универсальными степенными законами. Полученные результаты описания универсальными степенными уравнениями сигнала акустической эмиссии газожидкостной пены согласуются со степенными зависимостями для параметров коалесценции и геометрических параметров подобных систем, приведенные, например, в работах [32, 33]. Таким образом, акустический эмиссионный сигнал может быть рассмотрен как фундаментальная основа для развития подхода диагностики динамики структурной модификации нестационарных пеноподобных дисперсных систем.

Заключение

Продемонстрировано, что диагностировать поведение структурных изменений в метастабильной двухкомпонентной пене в процессе её эволюции в условиях режима автомоделности системы можно с помощью анализа спектра акустической эмиссии. Показано, что закономерности изменения спектров эмиссионного сигнала газожидкостной пены, как и зависимость среднего радиуса газовой ячейки, подчиняются условиям автомоделности, и сопоставление критических параметров позволяет анализировать кинетику изменения локальных неоднородностей и изменения морфологии двухкомпонентной системы. Метод акустической эмиссии может быть использован для анализа стабильности и архитектуры развития двухфазных нестационарных сред в режиме реального времени, что играет важную роль для биомедицины, в частности для анализа морфофункциональных свойств тканеинженерных конструкций в процессе их синтеза.

Список литературы / References

1. Maksoud F. J., de la Paz M. F. V., Hann A. J., Thanarak J., Gwendolen C Reilly G. C., Claeysens F., Green N. H., Zhang Yu S. Porous biomaterials for tissue engineering: A review. *J. Mater. Chem. B*, 2022, vol. 10, iss. 40, pp. 8111–8165. <https://doi.org/10.1039/d1tb02628c>



2. Sultana N., Cole A., Strachan F. Biocomposite scaffolds for tissue engineering: Materials, fabrication techniques and future directions. *Materials (Basel)*, 2024, vol. 17, no. 22, art. 5577. <https://doi.org/10.3390/ma17225577>
3. Lutzweiler G., Halili A. N., Vrana N. E. The overview of porous, bioactive scaffolds as instructive biomaterials for tissue regeneration and their clinical translation. *Pharmaceutics*, 2020, vol. 12, no. 7, art. 602. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12070602>
4. Murphy C. M., Haugh M. G., O'Brien F. J. The effect of mean pore size on cell attachment, proliferation and migration in collagen–glycosaminoglycan scaffolds for bone tissue engineering. *Biomaterials*, 2010, vol. 31, iss. 3, pp. 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.09.063>
5. Loh Q. L., Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Eng. Part B: Reviews*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 485–502. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2012.0437>
6. Matsiko A., Gleeson J. P., O'Brien F. J. Scaffold mean pore size influences mesenchymal stem cell chondrogenic differentiation and matrix deposition. *Tissue Eng. Part A*, 2015, vol. 21, no. 3–4, pp. 486–497. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2013.0545>
7. Vera M. U., Saint-Jalmes A., Durian D. J. Scattering optics of foam. *Appl. Opt.*, 2001, vol. 40, iss. 24, pp. 4210–4214. <https://doi.org/10.1364/AO.40.004210>
8. Durian D. J., Weitz D. A., Pine D. J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics. *Science*, 1991, vol. 252, iss. 5006, pp. 686–688. <https://doi.org/10.1126/science.252.5006.686>
9. Erpelding M., Guillermic R. M., Dollet B., Saint-Jalmes A., Crassous J. Investigating acoustic-induced deformations in a foam using multiple light scattering. *Phys. Rev. E*, 2010, vol. 82, art. 021409. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.021409>
10. Lambert J., Mokso R., Cantat I., Cloetens P., Glazier J. A., Graner F., Delannay R. Coarsening foams robustly reach a self-similar growth regime. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, vol. 104, art. 248304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.248304>
11. Al-Masry W. A., Ali E. M., Aqeel Y. A. Determination of bubble characteristics in bubble columns using statistical analysis of acoustic sound measurements. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2005, vol. 83, iss. 10, pp. 1196–1207. <https://doi.org/10.1205/cherd.05014>
12. Leighton T. *The Acoustic Bubble*. London, Academic Press, 1997. 613 p.
13. Devaud M., Hocquet T., Bacri J.-C., Leroy V. The Minnaert bubble: An acoustic approach. *Eur. J. Phys.*, 2008, vol. 29, no. 6, pp. 1263–1285. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/29/6/014>
14. Minnaert M. XVI. On musical air-bubbles and the sound of running water. *Philos. Mag.*, 1933, vol. 16, iss. 104, pp. 235–248. <https://doi.org/10.1080/14786443309462277>
15. Ainslie M. A., Leighton T. G. Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011, vol. 130, iss. 5, pp. 3184–3208. <https://doi.org/10.1121/1.3628324>
16. BenSalem I., Guillermic R. M., Sample C., Leroy V., Saint-Jalmes A., Dollet B. Propagation of ultrasound in aqueous foams: Bubble size dependence and resonance effects. *Soft Matter*, 2013, vol. 9, iss. 4, pp. 1194–1202. <https://doi.org/10.1039/C2SM25545F>
17. Divoux T., Vidal V., Melo F., Géminard J.-C. Acoustic emission associated with the bursting of a gas bubble at the free surface of a non-Newtonian fluid. *Phys. Rev. E*, 2008, vol. 77, art. 056310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.056310>
18. Stephens R. W. B., Pollock A. A. Waveforms and frequency spectra of acoustic emissions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1971, vol. 50, no. 3, pt. 2, pp. 904–910.
19. Chen G., Luo H., Yang H., Zhang T., Li S. Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo. *Acta Biomater.*, 2018, vol. 65, pp. 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.10.005>
20. Vandewalle N., Lentz J. F., Dorbolo S., Brisbois F. Avalanches of popping bubbles in collapsing foams. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, vol. 86, iss. 1, pp. 179–182. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.179>
21. Marston P. L., Trinh E. H., Depew J., Asaki T. J. Response of bubbles to ultrasonic radiation pressure: Dynamics in low gravity and shape oscillations. In: Blake J. R., Boulton-Stone J. M., Thomas N. H., eds. *Bubble Dynamics and Interface Phenomena. Fluid Mechanics and Its Applications*. Dordrecht, Springer, 1994, vol. 23, pp. 343–353. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0938-3_32
22. Prosperetti A., Lezzi A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Pt. 1. First-order theory. *J. Fluid Mech.*, 1986, vol. 168, pp. 457–478. <https://doi.org/10.1017/S0022112086000460>
23. Ding J., Tsaur F. W., Lips A., Akay A. Acoustical observation of bubble oscillations induced by bubble popping. *Phys. Rev. E*, 2007, vol. 76, iss. 4, pt. 1, art. 041601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.041601>
24. Ritacco H. A. Complexity and self-organized criticality in liquid foams. A short review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2020, vol. 285, art. 102282. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102282>
25. 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, art. 37506. <https://doi.org/10.1038/srep37506>
26. Yanagisawa N., Kurita R. In-situ observation of collective bubble collapse dynamics in a quasi-two-dimensional foam. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. 5152. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41643-x>
27. Vandewalle N., Lentz J. F. Cascades of popping bubbles along air / foam interfaces. *Phys. Rev. E*, 2001, vol. 64, iss. 2, pt. 1, art. 021507. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.021507>
28. Shah M. S., Kleijn C. R., Kreutzer M. T., van Steijn V. Influence of initial film radius and film thickness on the rupture of foam films. *Phys. Rev. Fluids*, 2021, vol. 6,



- art. 013603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.013603>
29. Manev E. D., Nguyen A. V. Critical thickness of microscopic thin liquid films. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2005, vol. 114–115, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.07.013>
30. Forel E., Dollet B., Langevin D., Rio E. Coalescence in two-dimensional foams: A purely statistical process dependent on film area. *Phys. Rev. Lett.*, 2019, vol. 122, art. 088002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.088002>
31. 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>
32. 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 Surf. A*, 2019, vol. 579, art. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>
33. Burnett G., Chae J. J., Tam W. Y., Almeida R. M. C., Tabor M. Structure and dynamics of breaking foams. *Phys. Rev. E*, 1995, vol. 51, no. 6, pp. 5788–5800. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.5788>
34. Chae J. J., Tabor M. Dynamics of foams with and without wall rupture. *Phys. Rev. E*, 1997, vol. 55, no. 1, pp. 598–611. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.598>
35. Müller W., Di Meglio J.-M. Avalanches in draining foams. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1999, vol. 11, no. 21, pp. L209–L215.

Поступила в редакцию 08.12.2025; одобрена после рецензирования 22.03.2026;
принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 08.12.2025; approved after reviewing 22.03.2026;
accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026