

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1197-1204

УДК 535.3, 519.85

Моделирование процессов переноса излучения в газожидкостных пенах

Анна Андреевна Исаева¹✉, Елена Андреевна Исаева², Алексей Викторович Пантюков³

^{1,2,3} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация

¹ isanna.1987@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>

² 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>

³ alex.pantukoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты численного моделирования процесса переноса излучения в газожидкостных пенах. Для исследования переноса зондирующего излучения в газожидкостных пеноподобных средах на различных этапах старения предложен метод численного моделирования Монте-Карло. Для учета переотражения на границах раздела двух фаз применена методика на основе формул Френеля. **Метод.** В качестве модельной среды рассмотрены ячеистые структуры Кельвина, имитирующие газовые пузырьки в жидкой матрице в процессе старения (coarsening), представляющем переход пеноподобной среды от «влажной» к «сухой». Подобный переход для изолированной системы обусловлен медленным стеканием жидкости по стенкам газовых ячеек и каналам Плато–Гиббса вследствие влияния гравитационной силы. В процессе эволюции происходит уменьшение объемной доли жидкой фазы и увеличение среднего размера газовых ячеек пеноподобной среды. Трехмерная ячеистая структура на разных этапах эволюции представлена как система плотноупакованных упорядоченных сфер или тетраэдров различных геометрических размеров в зависимости от длительности процесса старения. **Основные результаты.** На основе численного моделирования методом Монте-Карло и формул Френеля получены значения коэффициентов пропускания и обратного рассеяния зондирующего излучения для газожидкостной пены. Полученные результаты хорошо коррелируют со спектрометрическими измерениями вспененной жидкости производства Gillette (Gillette shaving cream). Приведен анализ влияния фактора анизотропии среды на среднюю оптическую длину зондирующего излучения. **Практическая значимость.** Разработка теоретических подходов к диагностике двухфазных пеноподобных материалов позволит оптимизировать синтез вспененных материалов с заданными реологическими и структурными свойствами и повысить эффективность оценки функциональных параметров подобных материалов.

Ключевые слова

газожидкостные пены, ячейка Кельвина, коэффициент пропускания, метод Монте-Карло, формулы Френеля

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-00051).

Ссылка для цитирования: Исаева А.А., Исаева Е.А., Пантюков А.В. Моделирование процессов переноса излучения в газожидкостных пенах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1197–1204. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1197-1204

Simulation of radiative transfer in gas-liquid foams

Anna A. Isaeva¹✉, Elena A. Isaeva², Aleksey V. Pantukov³

^{1,2,3} Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation

¹ isanna.1987@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>

² 27isaevaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>

³ alex.pantukoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>

Abstract

The results of the radiation light transfer in the gas-liquid foams are presented. To study the probing light transfer in gas-liquid foam-like media at different stages of aging, a Monte Carlo numerical simulation method is proposed. To

take into account the re-reflections at the phase interfaces, the approach based on the Fresnel formula is applied. Kelvin cells structures are considered as a model medium, imitating gas bubbles in a liquid matrix during aging (coarsening), which represents the transition of a foam-like medium from “wet” to “dry”. Such transition is caused by the slow liquid flow along the gas cells walls and Plateau-Gibbs channels due to the influence of the gravitational force in an isolated system. During the evolution process, the volume fraction of the liquid phase decreases and the average size of the gas cells of the foam-like medium increases. The three-dimensional cellular structure at different evolution stages is represented as a system of close-packed ordered spheres or tetracaedrons of various geometric sizes depending on the aging process duration. The Monte Carlo modeling of the radiation light transfer in scattering two-phase foam-like media, taking into account the redistribution at the interfaces of two phases by use of Fresnel formulas at different coursing stages, is presented. The transmittance and backscattering coefficients of a probing light are obtained using the Monte Carlo numerical simulations and Fresnel formulas for the gas-liquid foams. The obtained results are well correlated with the spectrometric measurements of the foamed liquid produced by Gillete (Gillete shaving cream). The influence of the anisotropy factor on the optical length of the probing light was carried out. The development of the theoretical approaches to the diagnostics of the two-phase foam-like materials makes it possible to synthesize foamed materials with established rheological and structural properties to increase and improve the efficiency of evaluating of the functional characteristics for such materials.

Keywords

gas-liquid foams, Kelvin cell, transmission coefficient, Monte Carlo simulation, Fresnel formulas

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-79-00051).

For citation: Isaeva A.A., Isaeva E.A., Pantukov A.V. Simulation of radiative transfer in gas-liquid foams. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1197–1204 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1197-1204

Введение

Двухфазные пеноподобные структуры представляют большой интерес для науки, промышленности и биомедицины [1–3]. Скаффолд-технологии активно используются в биомедицине для таких задач, как выращивание трехмерных клеточных конструкций, обеспечения жизнедеятельности клеток в процессе формирования определенных типов живых тканей в тканевой инженерии [4–9]. Скаффолды могут быть разработаны на основе синтетических или природных материалов, в частности, биоактивной керамики, стекол, полимеров или наноккомпозитов [9–13]. Один из перспективных методов изготовления скаффолдов основан на вспенивании предварительно пластифицированных биосовместимых полимеров с помощью газа или сверхкритической жидкости [14, 15]. Структурные параметры 3D-скаффолдов определяют функциональные свойства биоматериалов. Микроскопические поры (размером более 50 мкм) влияют на форму и размер формируемой ткани, мезоскопические поры (размером 1–50 мкм) задают функции клеток в процессе их синтеза, а наноскопические поры (размером менее 1 мкм) определяют эффективность диффузии питательных веществ [16].

Разработка эффективных методов оптической диагностики для оценки структурных параметров синтезированных высокопористых матриц, например распределения пор по размерам и форме, а также степени их взаимосвязи, актуальная и важная задача.

Пены подразделяются на сухие (объемная доля жидкого компонента менее 0,1–0,15) и влажные (объемная доля жидкого компонента более 0,1–0,15). Экспериментальные исследования процессов переноса электромагнитного излучения во вспененных жидкостях и влияние таких структурных параметров, как средний размер газовых пузырей и объемная доля жидкой фазы в пене, проводились многими группами исследователей. В частности, группа ученых во гла-

ве с Д. Дурианом исследовала структурные и функциональные особенности вспененных жидкостей в процессе их старения методами спектроскопии диффузионного пропускания и диффузионно-волновой спектроскопии [17]. Динамика дренирования жидкой фазы во вспененных жидкостях описана рядом уравнений, формирующих единую модель [18–21]. Для развития экспериментальных методик исследования влияния структурных особенностей газожидкостных пен на их оптические свойства необходима адекватная математическая модель рассеяния электромагнитного излучения в подобных средах.

Описание метода и основные результаты моделирования

Газожидкостные пены можно рассмотреть, как ячеистую структуру, состоящую из газовых ячеек с перегородками из пленок жидкости, при этом форма перегородок и характер их пересечения описываются законами Плато.

Процесс старения пены (coarsening) и, соответственно, переход от «влажной» к «сухой» пене (wet to dry transition) сопровождается трансформацией формы ячеек от сферической к многогранной, увеличением среднего размера газовой ячейки и убыванием объемной доли жидкой матрицы (рис. 1). Этот процесс обусловлен частичным испарением жидкой фазы в случае неизолированной, открытой системы и ее дренажом на дно кюветы, вызванным гравитационными эффектами. Схлопывание и коалесценция газовых пузырей приводит к перестройкам внутри ячеистой структуры.

В процессе эволюции системы изменяется механизм рассеяния света. На начальных этапах старения пены рассеяние излучения происходит на газовых пузырях в жидкой матрице, а на последних этапах — на структурных элементах сухой пены, так называемых каналах Плато–Гиббса [22]. В процессе численного моделирова-

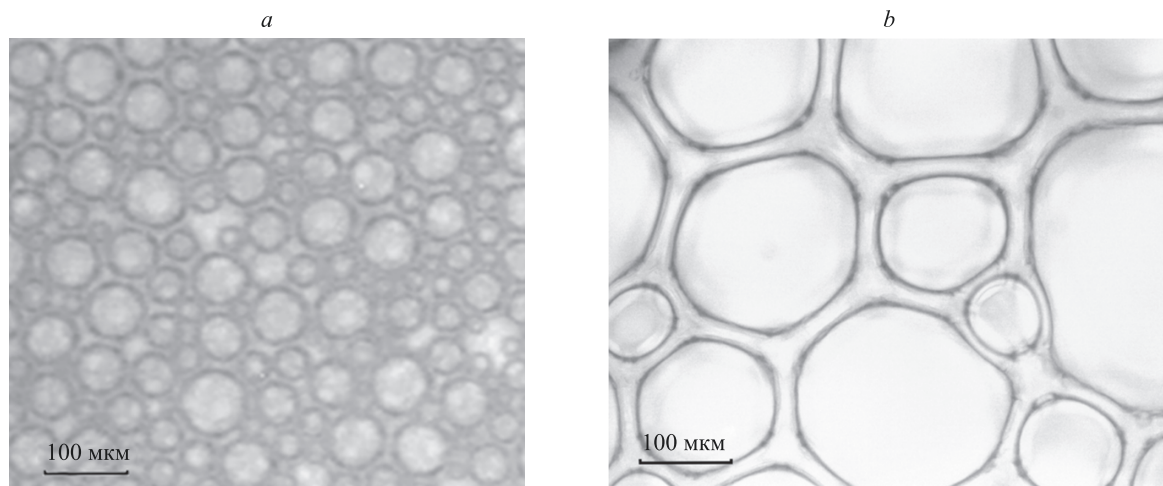


Рис. 1. Фотографии вспененной жидкости для разного времени старения пены: 500 с (а) и 60 000 с (b)
Fig. 1. Photographs of the foamed liquid at the different foam aging time: 500 s (a); 60000 s (b)

ния в качестве пеноподобной среды рассмотрим монодисперсную сотообразную модель плотноупакованных элементарных ячеек, имеющих форму усеченных октаэдров равного объема. Такая ячеистая структура впервые была упомянута в 1887 г. как структура Кельвина.

Уравнение, описывающее трансформацию ячеистой структуры пены от «влажной» к «сухой» и, соответственно, переход от сферической формы к многогранной, имеет вид

$$\left[h_{cube}(x, y, z) + \frac{1}{a^p} h_{octa}(x, y, z) + \frac{1}{b^p} h_{dodeca}(x, y, z) \right]^{1/p} = r, \quad (1)$$

где a и b — описывают геометрические свойства многогранников, вписанных в сферу (например, число сторон); r — радиус сферы, из которой формируется многогранник; p — определяет полиэдральность (степень близости многогранников к сфере).

Если $p \rightarrow 2$, то форма ячейки сферическая, если $p \rightarrow \infty$, то ячейка имеет форму многогранника [23].

Уравнение трансформации сферы в многогранник:

$$h_{cube}(x, y, z) = |x|^p + |y|^p + |z|^p. \quad (2)$$

Для $p = 2$ уравнение (2) задает сферу радиуса r , для $p \rightarrow \infty$ это уравнение описывает куб с длиной ребра $2r$.

Уравнение трансформации сферы в правильный октаэдр:

$$h_{octa}(x, y, z) = |x + y + z|^p + |-x + y + z|^p + |x - y + z|^p + |x + y - z|^p.$$

Уравнение ромбододекаэдрической формы сферы:

$$h_{dodeca}(x, y, z) = |x + y|^p + |x - y|^p + |y + z|^p + |y - z|^p + |x + z|^p + |x - z|^p.$$

Ячейка Кельвина в форме усеченного октаэдра описывается уравнением (1), где $a = b \approx 1,5355$ (рис. 2).

Выполним моделирование распространения рассеянного средой зондирующего излучения на этапе «влажной» газожидкостной пены в среде с помощью метода Монте-Карло, и на этапе «сухой» пены в рамках геометрической оптики с использованием формул Френеля. В качестве критического параметра, характеризующего переход «влажная–сухая» пена, выбран средний радиус газовых пузырей $r_{кр} = 10$ мкм.

На первых этапах эволюции модель «влажной» газожидкостной пены представляет собой систему газовых пузырей в жидкости. Среда имеет следующие параметры: бесконечную ширину, толщину 3000 мкм, коэффициент рассеяния $\mu_s = 0,177$ мкм⁻¹, малый коэффициент поглощения $\mu_a = 10^{-11}$ мкм⁻¹.

Из падающего однонаправленного пакета фотонов выбрана и отмечена одна парциальная компонента или один фотон. Фотон, распространяясь в среде, испытывает акты рассеяния, при этом траектория движения фотона задана направляющими косинусами и оптической длиной пути фотона (расстоянием, проходимым фотоном до последующего акта рассеяния).

На первом шаге генерируем направляющие косинусы, которые определяются на основе угла рассеяния ϑ в виде:

$$\cos \vartheta = \frac{1}{2g} \left(1 + g^2 - \left(\frac{1 - g^2}{1 - g + 2g\chi} \right)^2 \right),$$

где χ — случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0, 1]$; g — параметр анизотропии.

На следующем шаге случайным образом зададим оптическую длину пути фотона, с помощью набора равномерно распределенных случайных чисел.

Информация о длине пути фотона и направляющих косинусах сохраним в матрицу и запишем в файл. Далее сгенерируем новое значение угла и длины пробега фотона. Повторяем процедуру до тех пор, пока фотон не достигнет заданной глубины внутри среды или не вылетит из среды в направлении, обратном падающему излучению. Выберем следующий фотон из набора и повторим всю процедуру.

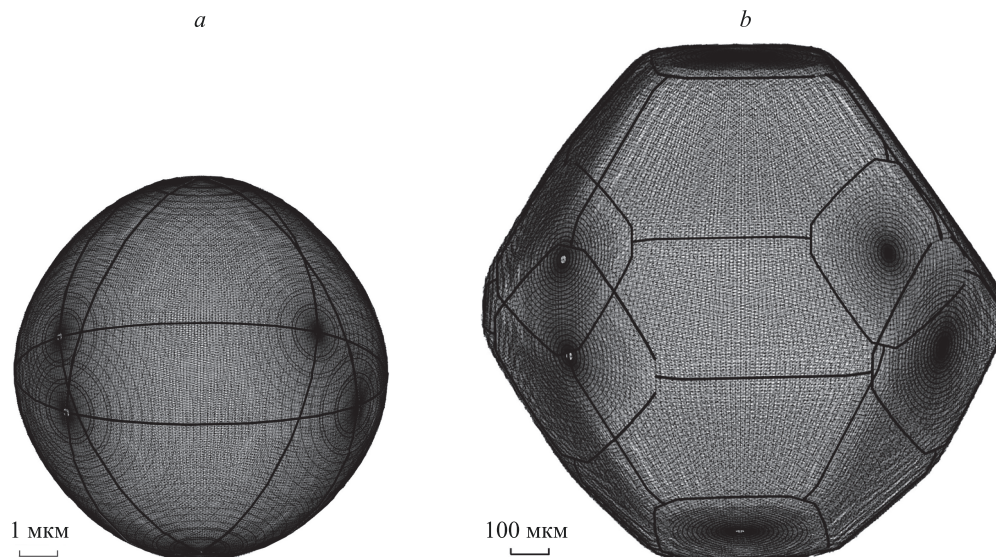


Рис. 2. Сферическая и многогранная формы ячеек Кельвина, имитирующих газовые ячейки пеноподобной среды на разных этапах ее старения: $p = 5$ (a); $p = 50$ (b)

Fig. 2. The spherical and the polyhedral shapes of Kelvin cells imitating the gas cells of a foam-like medium at the different aging stages: $p = 5$ (a); $p = 50$ (b)

На последующих этапах эволюции пены модель «сухой» газожидкостной пены представляет систему плотноупакованных ячеек Кельвина одинакового размера.

Показатели преломления газовых ячеек и перегородок из жидкой пленки равны $n_1 = 1$ и $n_2 = 1,34$ соответственно. Теоретические значения среднего размера газовых пузырей и объемной доли жидкой фазы, используемые при моделировании процесса старения пеноподобной среды, выбраны исходя из экспериментальных исследований процессов эволюции пены производства Gillette (Gillette shaving cream) [24]. Объемная доля жидкости рассчитана по толщине слоя дренированной жидкости на дне кюветы в процессе эволюции пены от «влажной» к «сухой». На начальных этапах эволюции пены доля жидкости — $0,1 \pm 0,01$. Объемная доля жидкой фазы и средний размер газовых ячеек рассматриваемой пеноподобной среды представлен в таблице. Максимальное время старения ячейки структуры в процессе моделирования составило 180 000 с.

Событие отражения или преломления на границе раздела «жидкостная пленка–газовая ячейка» опреде-

лено случайным образом при сравнении коэффициента отражения, рассчитанного по формулам Френеля, со случайной величиной равномерно распределенной на интервале $[0, 1]$. Рассчитаем коэффициент обратного рассеяния для случая отличного от нормального падения:

$$R_{bs} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\sin^2(\alpha_i + \alpha_t)} + \frac{\tan^2(\alpha_i - \alpha_t)}{\tan^2(\alpha_i + \alpha_t)} \right),$$

где α_i и α_t — углы падения и преломления.

В ходе моделирования пакет фотонов распространялся в ячейистой среде. Парциальные составляющие, испытавшие многократное взаимодействие с каналами Плато–Гиббса (границами раздела «жидкостная пленка–газовая ячейка») и с узлами каналов Плато–Гиббса (точки пересечения жидкостных пленок), и достигшие заданной глубины, вносили вклад в коэффициент пропускания, а составляющие, рассеянные назад — в коэффициент обратного рассеяния.

В численном эксперименте выполним моделирование рассеяния зондирующего излучения на структурных элементах газожидкостной пены с различными

Таблица. Объемная доля жидкой фазы и средний радиус газовых ячеек пеноподобной среды

Table. The volume fraction of the liquid phase and the mean radius of the foam-like medium gas bubbles

Средний радиус газовых пузырей, мкм		Объемная доля жидкой фазы	
Моделирование	Теоретические значения	Моделирование	Теоретические значения
8,7	8,0	0,10	0,10
13,5	14,0	0,10	0,09
26,2	25,0	0,09	0,09
74,8	75,0	0,08	0,08
140,0	140,0	0,06	0,06

значениями параметра p и радиусов ячеек r . Световое поле, рассеянное исследуемой средой и формирующее сигнал, представляет суперпозицию парциальных составляющих, которые распространены в среде на различную глубину и, соответственно, имеют различные значения оптических длин путей. При этом парциальные составляющие содержат информацию о значениях характеристик подвижности рассеивающих структур. Интенсивности прошедшего и рассеянного излучений содержат информацию о реорганизации газовых ячеек, происходящей в процессе старения пеноподобной среды. В ходе моделирования проведена оценка коэффициентов пропускания и обратного рассеяния излучения в зависимости от характеристик, задающих геометрию ячейистой структуры газожидкостной пены.

Коэффициенты обратного рассеяния R_{bs} и пропускания T , зондирующего пеноподобную среду излучения, имеют вид

$$R_{bs} = \frac{I_{bs}}{I_0}, T = \frac{I_{tr}}{I_0}, \quad (3)$$

где интенсивности излучения: I_{bs} — обратнорассеянного пеноподобной средой; I_{tr} — прошедшего на заданную глубину в пеноподобной среде; I_0 — зондирующего.

Зависимости коэффициентов, полученные по формуле (3) с помощью моделирования методом Монте-Карло и учетом переотражения на границах раздела двух фаз с помощью формул Френеля для различных характеристик ячейистой структуры системы, представлены на рис. 3.

Полученные численные значения коэффициентов пропускания для модельной ячейистой среды соответствуют значениям коэффициента пропускания пены производства Gillette (Gillette shaving cream), полученным экспериментально с использованием спектрометра Ocean Optics QE65000 [24]. Средний радиус газовых ячеек, используемый при моделировании, изменялся от 9 до 140 мкм, при этом полученное пропускание ячейистой структуры изменялось в пределах от 0,04 до 0,21, а коэффициент пропускания пены производства Gillette изменялся в пределах от 0,07 до 0,23. При

анализе рассеянных компонент зондирующего излучения наблюдались увеличение доли рассеянного вперед излучения и уменьшение доли обратно рассеянного излучения. Переход от «влажной» к «сухой» пене привел к трансформации формы ячейки Кельвина от сферической к многогранной и, соответственно, увеличению значения p . При этом происходит увеличение коэффициента пропускания среды от 0,04 до 0,19.

Газовые пузыри в ячейистой структуре плотно упакованы и обладают высокой корреляцией. Рассеяние в подобных структурах носит нетипичный характер, в частности при увеличении времени старения пены происходит переход от рассеяния на газовых ячейках (на ранних этапах старения) к рассеянию на структурных элементах пены (на поздних этапах старения). Такие изменения влияют на оптические параметры: транспортную длину l_{tr} (расстояние, на котором происходит изменение режима рассеяния от направленного к диффузному); длину рассеяния l (среднее расстояние в среде, проходимое электромагнитной волной от первого акта рассеяния до последующего); анизотропию рассеяния света g (средний косинус угла рассеяния электромагнитного излучения).

Выполнен анализ влияния фактора анизотропии рассеяния на среднее значение оптической длины пути зондирующего излучения (рис. 4).

В процессе эволюции пеноподобной структуры увеличивается объемная доля газовых пузырей и изменяется плотность рассеивающих центров, и, как следствие, кратность рассеяния. В результате происходит увеличение оптической длины пути рассеянного излучения (рис. 4).

Разработанная модель среды позволила описать изменяющийся механизм рассеяния, заключающийся в переходе от рассеяния света на системе газовых пузырей в жидкости к рассеянию на структурных элементах «сухой» пены — каналах Плато–Гиббса [22].

Моделирование переноса излучения в газожидкостной пене методом Монте-Карло на малых временах эволюции системы и переход к геометрической оптике на больших временах эволюции демонстрирует способность выбранного подхода к описанию физических процессов, протекающих в газожидкостных пенах.

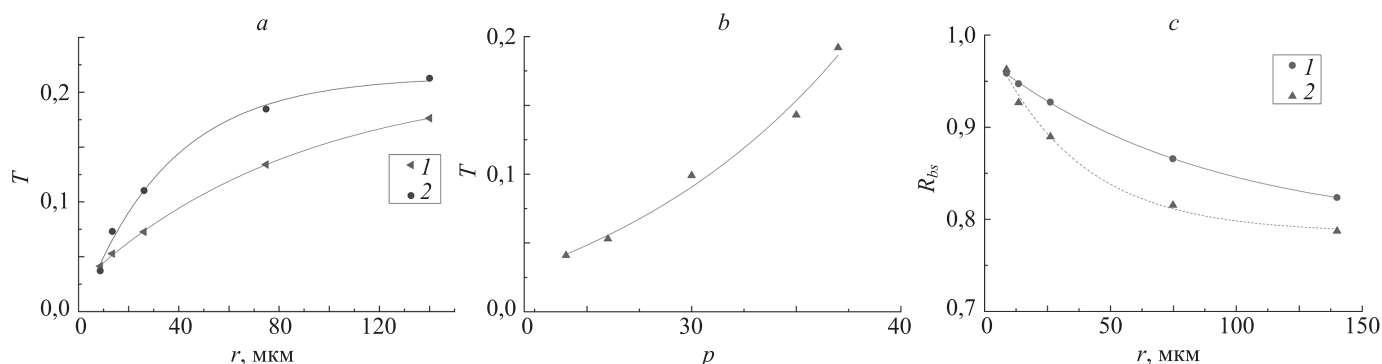


Рис. 3. Коэффициенты пропускания (T) (a, b) и обратного рассеяния (R_{bs}) (c) излучения для различных характеристик ячейистой структуры системы при значениях параметра: $p = 24$ (кривая 1); $p = 50$ (кривая 2)

Fig. 3. The transmission (T) (a, b) and backscattering coefficients (R_{bs}) (c) of the radiation for various characteristics of the parameter value: $p = 24$ (curve 1); $p = 50$ (curve 2)

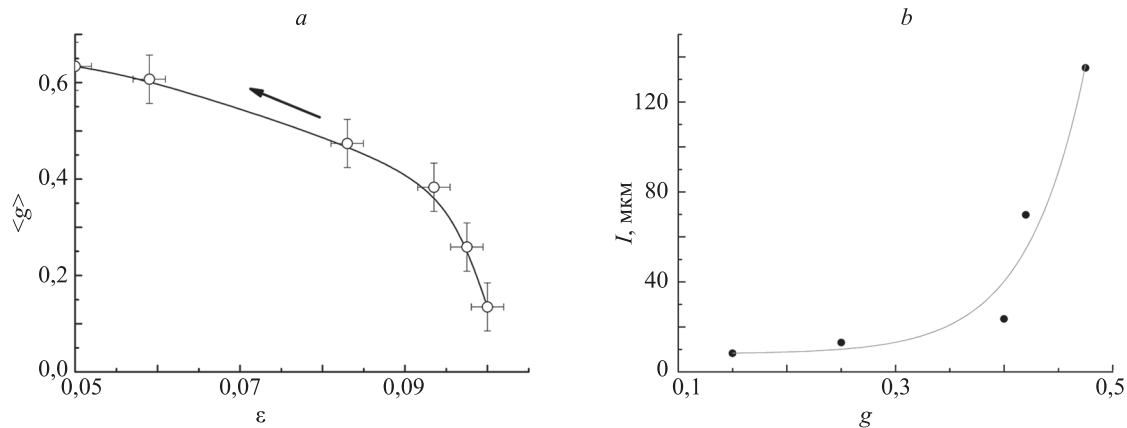


Рис. 4. Восстановленные зависимости по экспериментальным данным: параметра анизотропии рассеяния от объемной доли жидкой фазы в процессе эволюции пеноподобной среды [24] (а); среднего значения оптической длины пути зондирующего излучения от анизотропии рассеяния среды (б).

Стрелка — эволюция системы по мере ее старения

Fig. 4. The experimentally reconstructed dependence: of the scattering anisotropy parameter on the liquid phase volume fraction [24] (a); of the average optical path length of the probing radiation on the medium anisotropy parameter (b).

The arrow shows the evolution of aging system

Закключение

В работе рассмотрен подход с использованием формул Френеля и численного метода Монте-Карло для исследования переноса излучения в ячеистых структурах, имитирующих пеноподобные среды на различных этапах старения.

Увеличение коэффициента пропускания зондирующего излучения, наблюдаемое при переходе от «влажной» к «сухой» пене, обусловлено не только увеличением геометрических размеров газовых ячеек Кельвина в жидкой фазе, но и трансформацией ячеек от сферической к многогранной форме.

Коэффициенты пропускания излучения, полученные в результате моделирования и изменяющиеся в

пределах 0,04–0,21, демонстрируют хорошую сходимость с экспериментальными спектрометрическими измерениями коэффициента пропускания вспененной жидкости 0,07–0,23. Таким образом, для интерпретации экспериментальных исследований газожидкостных пен на ранних этапах старения может быть использована трехмерная ячеистая структура Кельвина со сферической формой, на поздних этапах старения — система ячеек Кельвина многогранной формы.

Полученные результаты могут быть использованы для развития когерентно-оптических методов морфофункциональной диагностики подобных систем в режиме реального времени.

Литература

- Li N., Fu Y., Lu Q., Xiao C. Microstructure and performance of a porous polymer membrane with a copper nano-layer using vapor-induced phase separation combined with magnetron sputtering // *Polymers*. 2017. V. 9. N 10. P. 524–527. <https://doi.org/10.3390/polym9100524>
- Poh P.S.P., Chhaya M.P., Wunner F.M., De-Juan-Pardo E.M., Schilling A.F., Schantz J.-T., van Griensven M., Huttmacher D.W. Polylactides in additive biomanufacturing // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016. V. 107. P. 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.07.006>
- Zimnyakov D.A., Yuvchenko S.A., Isaeva A.A., Isaeva E.A., Tsylin D.V. Growth/collapse kinetics of the surface bubbles in fresh constrained foams: transition to self-similar evolution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019. V. 579. P. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>
- Hollister S.J. Porous scaffold design for tissue engineering // *Nature Materials*. 2005. V. 4. N 7. P. 518–524. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>
- Садовой М.А., Ларионов П.М., Самохин А.Г., Рожнова О.М. Клеточные матрицы (скаффолды) для целей регенерации кости: современное состояние проблемы // *Хирургия позвоночника*. 2014. № 2. С. 79–86. <https://doi.org/10.14531/ss2014.2.79-86>

References

- Li N., Fu Y., Lu Q., Xiao C. Microstructure and performance of a porous polymer membrane with a copper nano-layer using vapor-induced phase separation combined with magnetron sputtering. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 10, pp. 524–527. <https://doi.org/10.3390/polym9100524>
- Poh P.S.P., Chhaya M.P., Wunner F.M., De-Juan-Pardo E.M., Schilling A.F., Schantz J.-T., van Griensven M., Huttmacher D.W. Polylactides in additive biomanufacturing. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, vol. 107, pp. 228–246. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.07.006>
- Zimnyakov D.A., Yuvchenko S.A., Isaeva A.A., Isaeva E.A., Tsylin D.V. Growth/collapse kinetics of the surface bubbles in fresh constrained foams: transition to self-similar evolution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, vol. 579, pp. 123693. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123693>
- Hollister S.J. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, 2005, vol. 4, no. 7, pp. 518–524. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>
- Sadovoy M.A., Larionov P.M., Samokhin A.G., Rozhnova O.M. Cellular matrices (scaffolds) for bone regeneration: state of the art. *Journal of Spine Surgery*, 2014, no. 2, pp. 79–86. (in Russian). <https://doi.org/10.14531/ss2014.2.79-86>

6. Ngadiman N.H.A., Yusof N.M., Idris A., Fallahiazouard E., Kurniawan D. Novel processing technique to produce three dimensional polyvinyl alcohol/maghemite nanofiber scaffold suitable for hard tissues // *Polymers*. 2018. V. 10. N 4. P. 353. <https://doi.org/10.3390/polym10040353>
7. Seo S.J., Mahapatra C., Singh R.K., Knowles J.C., Kim H.-W. Strategies for osteochondral repair: Focus on scaffolds // *Journal of Tissue Engineering*. 2014. V. 5. P. 1–5. <https://doi.org/10.1177/2041731414541850>
8. Hokmabad V.R., Davaran S., Ramazani A., Salehi R. Design and fabrication of porous biodegradable scaffolds: a strategy for tissue engineering // *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 2017. V. 28. N 16. P. 1797–1825. <https://doi.org/10.1080/09205063.2017.1354674>
9. Langer R., Vacanti J.P. Tissue engineering // *Science*. 1993. V. 260. N 5110. P. 920–926. <https://doi.org/10.1126/science.8493529>
10. Celikkin N., Rinoldi C., Costantini M., Trombetta M., Rainer A., Świąszkowski W. Naturally derived proteins and glycosaminoglycan scaffolds for tissue engineering applications // *Materials Science and Engineering: C*. 2017. V. 78. P. 1277–1299. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.016>
11. Laube T., Weisser J., Berger S., Börner S., Bischoff S., Schubert H., Gajda M., Bräuer R., Schnabelrauch M. In situ foamable, degradable polyurethane as biomaterial for soft tissue repair // *Materials Science and Engineering: C*. 2017. V. 78. P. 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.061>
12. O'Brien F.J. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering // *Materials Today*. 2011. V. 14. N 3. P. 88–95. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70058-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70058-X)
13. Maitz M. Applications of synthetic polymers in clinical medicine // *Biosurface and Biotribology*. 2015. V. 1. N 3. P. 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2015.08.002>
14. Dehghani F., Annabi N. Engineering porous scaffolds using gas-based techniques // *Current Opinion in Biotechnology*. 2011. V. 22. N 5. P. 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.04.005>
15. Quirk R.A., France R.M., Shakesheff K.M., Howdle S.M. Supercritical fluid technologies and tissue engineering scaffolds // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. V. 8. N 3-4. P. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.12.004>
16. Loh Q.L., Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size // *Tissue Engineering Part B: Reviews*. 2013. V. 19. N 6. P. 485–502. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2012.0437>
17. Durian D.J., Weitz D.A., Pine D.J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics // *Science*. 1991. V. 252. N 5006. P. 686–688. <http://doi.org/10.1126/science.252.5006.686>
18. Koehler S.A., Stone H.A., Brenner M.P., Eggers J. Dynamics of foam drainage // *Physical Review E*. 1998. V. 58. N 2. P. 2097–2106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.2097>
19. Kraynik A.M. Foam drainage: Internal Report. 1983. 83-0844.
20. Schmiedeberg M., Miri M.F., Stark H. Photon channelling in foams // *European Physical Journal E*. 2005. V. 18. N 1. P. 123–131. <http://doi.org/10.1140/epje/i2005-10034-6>
21. Koehler S.A., Hilgenfeldt S., Stone H.A. A Generalized view of foam drainage: experiment and theory // *Langmuir*. 2000. V. 16. N 15. P. 6327–6341. <https://doi.org/10.1021/la9913147>
22. Cantat I., Cohen-Addad S., Elias F., Graner F., Höhler R., Pitois O., Rouyer F., Saint-Jalmes A. *Foams: Structure and Dynamics*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 278 p.
23. Onaka S. Superspheres: Intermediate shapes between spheres and polyhedra // *Symmetry*. 2012. V. 4. N 3. P. 336–343. <https://doi.org/10.3390/sym4030336>
24. Зимняков Д.А., Ювченко С.А., Исаева А.А., Исаева Е.А., Ушакова О.В. Анизотропия рассеяния света вспененными жидкостями // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 125. № 5. С. 699–707. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.11.46846.99-18>
6. Ngadiman N.H.A., Yusof N.M., Idris A., Fallahiazouard E., Kurniawan D. Novel processing technique to produce three dimensional polyvinyl alcohol/maghemite nanofiber scaffold suitable for hard tissues. *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 4, pp. 353. <https://doi.org/10.3390/polym10040353>
7. Seo S.J., Mahapatra C., Singh R.K., Knowles J.C., Kim H.-W. Strategies for osteochondral repair: Focus on scaffolds. *Journal of Tissue Engineering*, 2014, vol. 5, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1177/2041731414541850>
8. Hokmabad V.R., Davaran S., Ramazani A., Salehi R. Design and fabrication of porous biodegradable scaffolds: a strategy for tissue engineering. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2017, vol. 28, no. 16, pp. 1797–1825. <https://doi.org/10.1080/09205063.2017.1354674>
9. Langer R., Vacanti J.P. Tissue engineering. *Science*, 1993, vol. 260, no. 5110, pp. 920–926. <https://doi.org/10.1126/science.8493529>
10. Celikkin N., Rinoldi C., Costantini M., Trombetta M., Rainer A., Świąszkowski W. Naturally derived proteins and glycosaminoglycan scaffolds for tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, vol. 78, pp. 1277–1299. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.016>
11. Laube T., Weisser J., Berger S., Börner S., Bischoff S., Schubert H., Gajda M., Bräuer R., Schnabelrauch M. In situ foamable, degradable polyurethane as biomaterial for soft tissue repair. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, vol. 78, pp. 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.061>
12. O'Brien F.J. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *Materials Today*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 88–95. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70058-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70058-X)
13. Maitz M. Applications of synthetic polymers in clinical medicine. *Biosurface and Biotribology*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2015.08.002>
14. Dehghani F., Annabi N. Engineering porous scaffolds using gas-based techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, vol. 22, no. 5, pp. 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.04.005>
15. Quirk R.A., France R.M., Shakesheff K.M., Howdle S.M. Supercritical fluid technologies and tissue engineering scaffolds. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004, vol. 8, no. 3-4, pp. 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.12.004>
16. Loh Q.L., Choong C. Three-dimensional scaffolds for tissue engineering applications: Role of porosity and pore size. *Tissue Engineering Part B: Reviews*, 2013, vol. 19, no. 6, pp. 485–502. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2012.0437>
17. Durian D.J., Weitz D.A., Pine D.J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics. *Science*, 1991, vol. 252, no. 5006, pp. 686–688. <http://doi.org/10.1126/science.252.5006.686>
18. Koehler S.A., Stone H.A., Brenner M.P., Eggers J. Dynamics of foam drainage. *Physical Review E*, 1998, vol. 58, no. 2, pp. 2097–2106. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.2097>
19. Kraynik A.M. *Foam drainage*. Internal Report, 1983, 83-0844.
20. Schmiedeberg M., Miri M.F., Stark H. Photon channelling in foams. *European Physical Journal E*, 2005, vol. 18, no. 1, pp. 123–131. <http://doi.org/10.1140/epje/i2005-10034-6>
21. Koehler S.A., Hilgenfeldt S., Stone H.A. A Generalized view of foam drainage: experiment and theory. *Langmuir*, 2000, vol. 16, no. 15, pp. 6327–6341. <https://doi.org/10.1021/la9913147>
22. Cantat I., Cohen-Addad S., Elias F., Graner F., Höhler R., Pitois O., Rouyer F., Saint-Jalmes A. *Foams: Structure and Dynamics*. Oxford, Oxford University Press, 2013, 278 p.
23. Onaka S. Superspheres: Intermediate shapes between spheres and polyhedra. *Symmetry*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 336–343. <https://doi.org/10.3390/sym4030336>
24. Zimnyakov D.A., Yuvchenko S.A., Isaeva A.A., Isaeva E.A., Ushakova O.V. Anisotropy of light scattering by foamed liquids. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 125, no. 5, pp. 795–802. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18110371>

Авторы

Исаева Анна Андреевна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, isanna.1987@mail.ru

Authors

Anna A. Isaeva — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2925-2733>, isanna.1987@mail.ru

Исаева Елена Андреевна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, [sc 54884743700](https://orcid.org/0000-0003-0407-312X), <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, 27isaevaea@mail.ru

Пантюков Алексей Викторович — аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>, alex.pantukoff@yandex.ru

Elena A. Isaeva — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, [sc 54884743700](https://orcid.org/0000-0003-0407-312X), <https://orcid.org/0000-0003-0407-312X>, 27isaevaea@mail.ru

Aleksey V. Pantukov — PhD Student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6422-501X>, alex.pantukoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.04.2022
Одобрена после рецензирования 03.10.2022
Принята к печати 16.11.2022

Received 15.04.2022
Approved after reviewing 03.10.2022
Accepted 16.11.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»