

УДК 536.7:54-148

## РЕЛАКСАЦИЯ И СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ПЕНАХ

А. В. Решетников, В. Н. Скоков, В. П. Коверда

Институт теплофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург  
E-mail: reshav@itp.uran.ru

Для установления связи между релаксационными характеристиками и спектром мощности пульсаций для случайного процесса исследована динамика пенообразования в растворе вода — глицерин. Пенообразование происходило при распаде газонасыщенного раствора и при барботаже раствора через пористый фильтр. Выявлены два типа релаксации пены — экспоненциальный и степенной. Степенной характер релаксации наблюдался при дополнительном воздействии ультразвуком. Установлена взаимосвязь характера релаксации с распределением низкочастотных пульсаций и спектрами мощности.

**Ключевые слова:** спектр мощности, низкочастотные пульсации, степенная релаксация, пенообразование.

В работах [1, 2] при теоретическом моделировании низкочастотных пульсаций в переходных режимах тепломассообмена с использованием системы двух нелинейных стохастических дифференциальных уравнений показано, что частотная зависимость спектров мощности пульсаций  $S(f)$  и функция распределения длительности экстремальных низкочастотных пульсаций  $P(\tau)$  имеют степенной вид. Установлено, что показатель  $\alpha$  частотной зависимости спектров мощности  $S(f) \sim 1/f^\alpha$  и показатель  $\beta$  распределения длительности низкочастотных пульсаций  $P(\tau) \sim 1/\tau^\beta$  связаны скейлинговым соотношением  $\alpha + \beta = 2$ .

В тех случаях, когда известна только частотная зависимость спектров мощности флуктуаций, соотношения между показателями позволяют получать информацию о распределениях крупномасштабных выбросов. В экспериментах спектры мощности пульсаций определяются точнее, чем функция распределения экстремальных амплитуд, поэтому скейлинговые соотношения могут использоваться при оценке опасных амплитуд.

Статистические характеристики стационарных случайных процессов, такие как функция распределения случайных выбросов и спектр мощности флуктуаций, зависят от типа релаксации в процессе установления стационарного состояния [3]. Согласно модельным расчетам в случае простейшего случайного процесса релаксация низкочастотных пульсаций динамической переменной  $\varphi$  со спектром мощности, обратно пропорциональной частоте, на начальном этапе описывается степенной зависимостью  $\varphi(t) \sim t^{-n}$  с показателем степени  $n \approx 1/2$ , а затем экспоненциальной зависимостью  $\varphi(t) \sim \exp(-t/\tau)$ . Однако однозначных скейлинговых соотношений, связывающих показатели релаксационной зависимости и статистические характеристики, получить не удалось. Поэтому представляет

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-08-00019-а) и в рамках Программы фундаментальных исследований, выполняемых в учреждениях УрО РАН совместно с организациями СО РАН (код проекта 12-С-2-1001).

© Решетников А. В., Скоков В. Н., Коверда В. П., 2012

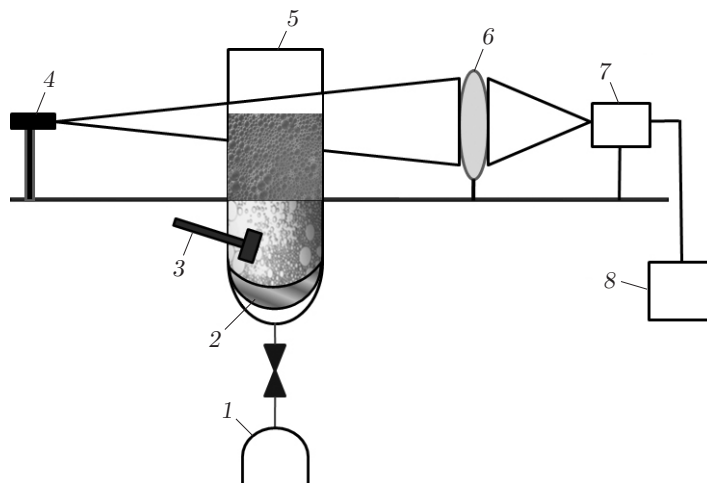


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, используемой для изучения релаксационных и спектральных характеристик пен при барботаже углекислого газа через водный раствор глицерина:

1 — баллон с газом; 2 — пористый фильтр; 3 — ультразвуковой излучатель; 4 — лазер; 5 — оптическая ячейка; 6 — собирающая линза; 7 — фотодиод; 8 — аналого-цифровой преобразователь и компьютер

интерес экспериментальное исследование связи релаксационных и спектральных характеристик случайных процессов.

При экспериментальном исследовании связи релаксационных характеристик и спектра мощности флуктуаций удобно использовать пенообразующие жидкости. Пены — дисперсные системы, состоящие из пузырьков газа, разделенных пленками жидкости, — можно получить двумя способами: диспергационным и конденсационным [4]. При диспергационном способе пена образуется в результате интенсивного совместного диспергирования пенообразующего раствора и воздуха. В частности, диспергирование осуществляется при прохождении струй газа через жидкость (барботаж). При конденсационном способе пена образуется в результате физико-химических процессов в жидкости, сопровождающихся выделением газообразных продуктов.

В настоящей работе использовались оба способа получения пен. В качестве пенообразующего раствора выбран водный раствор глицерина. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, предназначенной для изучения релаксации и спектральных характеристик пульсационных процессов при пенообразовании с использованием барботажа. Для осуществления барботажа через пористый фильтр, расположенный на дне стеклянной ячейки с пенообразующим раствором, пропускался углекислый газ. При использовании конденсационного способа герметичная емкость с раствором вода — глицерин насыщалась углекислым газом под давлением  $60 \cdot 10^6$  Па. При последующем сбросе давления раствор вспенивался и через клапан поступал в измерительную ячейку. Приведенные ниже результаты получены с помощью обоих способов получения пены.

После прекращения подачи газа происходила релаксация пены, вызванная разрушением газовых пузырьков. Методом лазерной фотометрии с использованием линейно распределенного источника исследовалась динамика поверхности пены. Измерялись флуктуации мощности лазерного луча, прошедшего через оптическую стеклянную ячейку с пеной. Установлено, что релаксация имела преимущественно экспоненциальный характер. На рис. 2 приведена типичная релаксационная кривая. Для выявления характера релаксации эта кривая приведена в полулогарифмических координатах. Видно, что релаксация имеет экспоненциальный характер:  $x(t) \sim \exp(-t/\tau)$ .

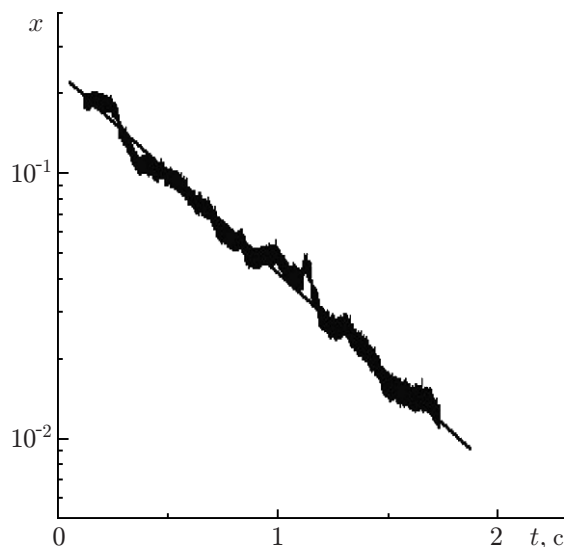


Рис. 2

Рис. 2. Релаксация пены по экспоненциальному закону

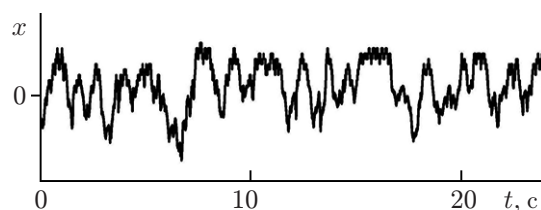


Рис. 3

Рис. 3. Реализация флуктуаций поверхности пены

Путем регулирования расхода газа достигалась стационарность процесса, при этом пена стабилизировалась и ее поверхность флуктуировала в окрестности среднего положения. На рис. 3 приведена реализация флуктуаций поверхности стабилизированной пены. Функция распределения таких флуктуаций имела вид гауссовой функции.

По измеренным реализациям методом фурье-преобразования определены спектры мощности флуктуаций. На рис. 4 в двойных логарифмических координатах показан спектр мощности флуктуаций, соответствующий реализации, приведенной на рис. 3. Полученный спектр мощности имел вид лоренцевой функции  $S \sim 1/(f_0 + f)^2$ : в диапазоне низких частот он описывался зависимостью  $S \sim 1/f_0^2$  (характерная горизонтальная “полка”), в диапазоне высоких частот — зависимостью  $S \sim 1/f^2$ .

Экспоненциальная релаксация является наиболее часто встречающимся типом разрушения пен. При изменении кратности пены (отношения объема пены к объему раствора, израсходованного на ее образование) характер релаксации может измениться [4]. Уменьшения кратности пены, происходящего при уменьшении доли крупных пузырей, можно добиться, применяя дополнительное диспергирование, в частности диспергирование ультразвуковым полем.

Для осуществления дополнительного диспергирования в стеклянную ячейку с пенообразующим раствором герметично вводился излучатель ультразвукового диспергатора. Воздействие ультразвуком в процессе пенообразования приводило к разрушению крупных пузырей и увеличению доли мелких. В этом случае характер релаксации на поверхности пены изменялся. На рис. 5 приведена релаксационная кривая, полученная при дополнительном воздействии ультразвука с частотой, равной 22 кГц. Для выявления характера релаксации эта кривая приведена в двойных логарифмических координатах. В отличие от рис. 2 на рис. 5 релаксация имеет степенной характер:  $x(t) \sim t^{-n}$  ( $n \approx 1/2$ ). Подобный закон релаксации справедлив для сильнообводненных пен с небольшой кратностью [4].

Как и в отсутствие ультразвукового воздействия, регулируя расход газа, можно достичь стационарности процесса, когда состояние пены стабилизируется и ее поверхность флуктурует в окрестности среднего уровня. Функции распределения, определенные по

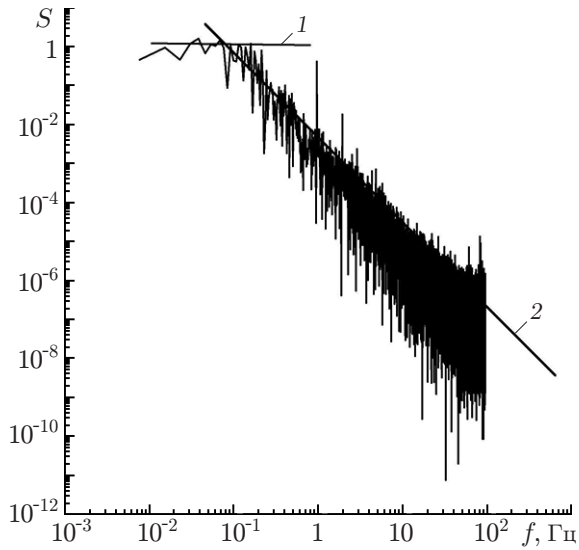


Рис. 4

Рис. 4. Спектр мощности флуктуаций поверхности пены в случае экспоненциальной релаксации:

$$1 - S \sim 1/f_0^2, \quad 2 - S \sim 1/f^2$$

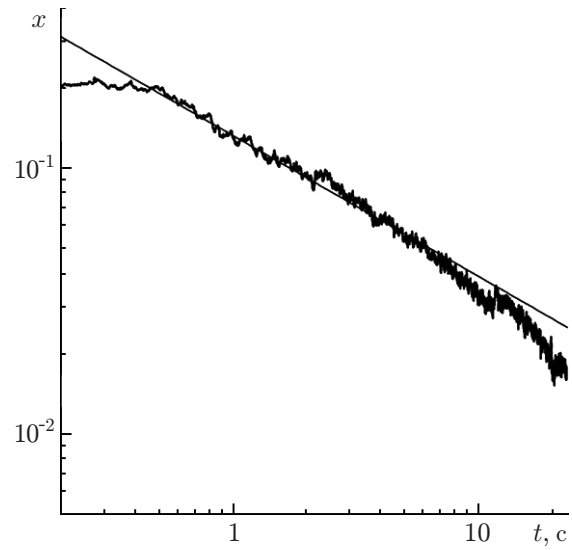


Рис. 5

Рис. 5. Релаксация пены по степенному закону (прямая линия — зависимость  $x(t) \sim t^{-0,52}$ )

стационарным реализациям, имели вид, близкий к гауссову, но отличались наличием выбросов в области больших амплитуд. При огрублении масштаба найденные функции распределения являлись масштабно-инвариантными. Процедура огрубления масштаба осуществлялась следующим образом. На основе экспериментально полученных реализаций создавались огрубленные реализации путем осреднения по некоторому масштабу времени  $T$  (параметр  $T$  называется также коэффициентом масштабного преобразования) в соответствии с выражением

$$y_j^{(T)} = \frac{1}{T} \sum_{i=Tj}^{T(j+1)-1} x_i, \quad 0 \leq j \leq \frac{N}{T},$$

где  $x_i$  — измеряемая флуктуирующая переменная (в данном случае интенсивность лазерного излучения). Первый масштаб  $\{y^{(1)}\}$  является исходным масштабом. Количество точек, в которых измеряются флуктуации, уменьшается в  $T$  раз.

На рис. 6 приведены исходная реализация измерений флуктуации уровня поверхности пены (130 000 точек) и две огрубленные реализации с коэффициентами масштабных преобразований  $T = 100$  (1300 точек),  $T = 400$  (325 точек). Функции распределения в двух последних случаях практически одинаковы, что свидетельствует о масштабной инвариантности флуктуаций. Горизонтальные прямые линии на рис. 6 соответствуют среднему уровню поверхности стабилизированной пены. Исходная экспериментальная реализация пересекает соответствующую горизонтальную линию в большом количестве точек, что затрудняет выделение низкочастотных выбросов. Для огрубленных масштабно-инвариантных реализаций интервалы между соседними точками пересечения с горизонтальной линией определяют длительности крупномасштабных низкочастотных выбросов ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  на рис. 6). Найдены функции распределения таких временных интервалов.

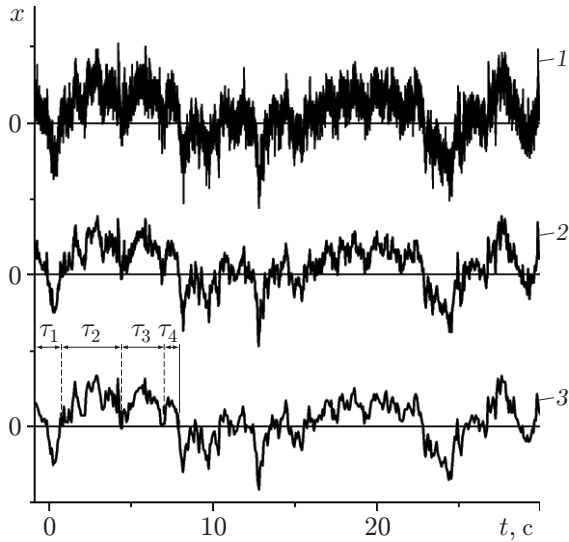


Рис. 6

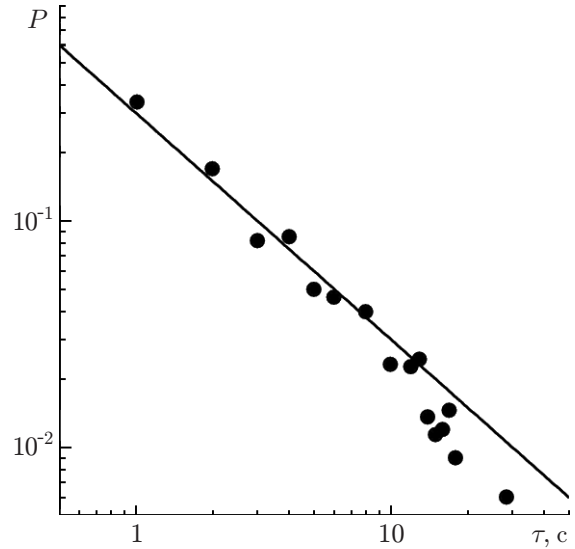


Рис. 7

Рис. 6. Исходная (1) и огрубленные (2, 3) экспериментальные реализации флуктуаций поверхности пены при дополнительном воздействии ультразвука: 2 —  $T = 100$ ; 3 —  $T = 400$

Рис. 7. Распределения длительностей низкочастотных выбросов (сплошная линия — зависимость  $P(\tau) \sim 1/\tau$ )

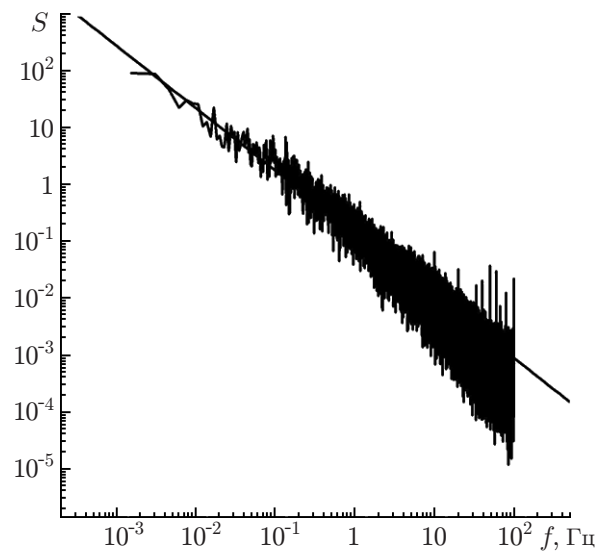


Рис. 8. Спектр мощности флуктуаций поверхности пены, соответствующий степенной релаксации (прямая линия — зависимость  $S(f) \sim 1/f$ )

Для масштабно-инвариантных реализаций распределение временных интервалов имело степенной вид  $P(\tau) \sim 1/\tau$  (рис. 7).

На рис. 8 представлен спектр мощности флуктуаций, соответствующий реализации, приведенной на рис. 6. Видно, что на протяжении почти четырех десятичных порядков изменения частоты спектр мощности изменяется обратно пропорционально частоте ( $1/f$ -спектр).

Воздействие ультразвукового поля приводит к дополнительному диспергированию пузырьков и соответственно к увеличению обводненности (уменьшению кратности) пены. Степенной характер релаксации в сильнообводненных пенах отмечался в [4, 5], что согласуется с результатами настоящей работы. Связь степенного характера релаксации с низкочастотной расходимостью спектров мощности аналогична связи, полученной в результате численного моделирования  $1/f$ -флуктуаций системой двух нелинейных стохастических дифференциальных уравнений [3].

Таким образом, экспериментальное исследование процессов пенообразования и релаксации пен позволяет выявить взаимосвязь характера релаксации и спектров мощности флуктуаций. Экспоненциальному типу релаксации соответствуют лоренцевы спектры мощности, а степенному —  $1/f$ -спектры мощности флуктуаций с низкочастотной расходимостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Skokov V. N., Koverda V. P., Reshetnikov A. V., et al.**  $1/f$  noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and mass transfer // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 1879–1883.
2. **Koverda V. P., Skokov V. N.** Statistics of avalanches in stochastic processes with a  $1/f^\alpha$  spectrum // Physica A. 2009. V. 388. P. 1804–1812.
3. **Коверда В. П., Скоков В. Н.** Релаксация при установлении стационарного стохастического процесса с  $1/f$ -спектром и статистика низкочастотных выбросов // Журн. техн. физики. 2007. Т. 77, вып. 11. С. 1–6.
4. **Тихомиров В. К.** Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983.
5. **Jacobi W., Woodcock K., Grove C.** Theoretical investigation of foam drainage // Industr. Engng Chem. 1956. V. 48, N 11. P. 2046–2051.

*Поступила в редакцию 3/II 2012 г.,  
в окончательном варианте — 4/IV 2012 г.*