

03;07

Вейвлет-анализ флуктуаций лазерного излучения при рассеянии межфазными границами в пористых средах

© П.В. Захаров, Д.А. Зимняков

Саратовский государственный университет,
E-mail: pЗахаров@mail.ru

В окончательной редакции 16 июля 2002 г.

Вейвлет-анализ применен к исследованию флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного слоем пористой среды (бумаги) при испарении летучей жидкости, насыщающей слой. В качестве базисной функции преобразования был использован вейвлет Морле. Полученные вейвлет-спектры отображают характерные особенности развития фронта испарения, соответствующие различным стадиям процесса нестационарного массопереноса в системе „пористый слой — летучая жидкость“.

В качестве одного из методов исследования процессов нестационарного массопереноса в гетерофазных системах (в частности, процесса испарения жидкой фазы из пористых сред) может быть предложен спектральный анализ флуктуаций интенсивности когерентного излучения, рассеянного системой. Роль динамических рассеивателей при этом играют движущиеся локальные границы раздела между жидкой и газообразной фазами в отдельных порах. Формируемая в процессе испарения „глобальная“ граница раздела обладает фрактальными свойствами [1–3], определяющими основные характеристики нестационарной рассеивающей системы (ансамбля локальных границ раздела фаз), в частности эффективное значение концентрации динамических рассеивателей в анализируемом объеме [4]. Развитие фронта испарения в слое пористой среды, насыщенной легко испаряющейся жидкостью, и его последующая деградация в результате распада области насыщенных жидкостью пор на отдельные кластеры сопровождается существенными изменениями статистических и спектральных характеристик регистрируемого сигнала динамического рассеяния [4]. Анализ подобных нестационарных сигналов может быть осуществлен, например, путем

вычисления фурье-спектров для фрагментов реализации сигнала, выделяемых с помощью скользящего окна заданного размера. При этом, для того чтобы обеспечить приемлемое временное разрешение, ширина окна должна быть выбрана меньше характерного времени изменения статистических и спектральных характеристик. Это может приводить к существенным искажениям формы „мгновенного“ спектра сигнала, вычисляемого для выборочных значений внутри скользящего окна малой ширины вследствие так называемого эффекта „утечки“ [5]. Альтернативными методами анализа подобных существенно нестационарных сигналов может служить исследование мгновенных значений частоты, амплитуды и фазы сигнала на основе преобразования Гильберта [6] или вейвлет-преобразования сигнала [7–11] с выбранными подходящим образом базисными вейвлет-функциями.

В данной работе исследуется возможность применения вейвлет-анализа сигнала динамического рассеяния света, наблюдаемого в процессе испарения летучих жидкостей из слоев пористой среды. Схема экспериментальной установки, используемой для регистрации флуктуаций интенсивности, порождаемых рассеянием когерентного излучения на движущихся локальных границах раздела фаз в слое пористой среды, приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использован одномодовый гелий-неоновый лазер, излучение которого фокусировалось на поверхность слоя длиннофокусной линзой; максимальные размеры светового пятна не превышали $200\ \mu\text{m}$. Мощность зондирующего излучения не превышала $0.5\ \text{mW}$, что исключало возможность дополнительного разогрева среды в процессе эксперимента. Детектирование прошедшего через слой пористой среды рассеянного излучения осуществлялось с помощью монохромной ПЗС-камеры (с прибором с зарядовой связью) типа EDC-1000L (Electrim Corp., США) без объектива, расположенной в дифракционной зоне за исследуемым образцом. Расстояние между слоем пористой среды и камерой в эксперименте равно $600\ \text{mm}$. В качестве образцов использовались слои бумаги различной толщины ($0.07 \div 0.14\ \text{mm}$) и пористости ($0.50 \div 0.85$), насыщаемые спиртом и ацетоном. В ходе эксперимента регистрировалась последовательность кадров, соответствующих различным реализациям наблюдаемых динамических спекл-полей; временной интервал между двумя последовательными кадрами выбирался существенно меньше, чем время корреляции флуктуаций интенсивности наблюдаемой спекл-картины.

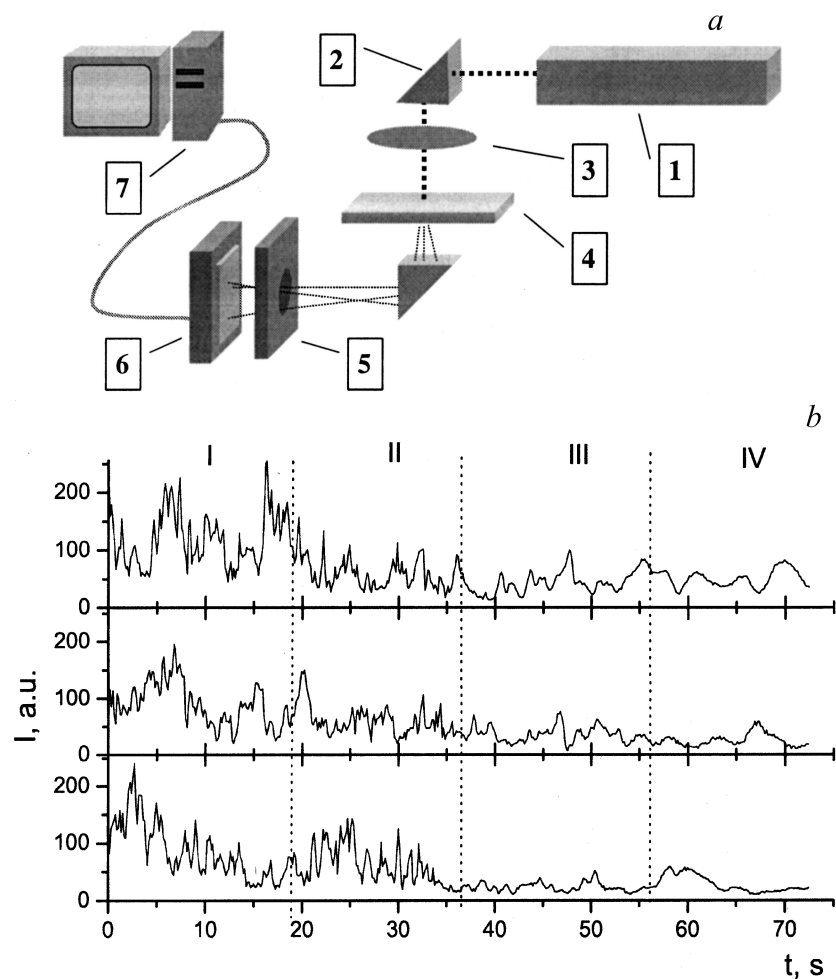


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки для исследования динамического рассеяния света в пористых средах в процессе нестационарного массопереноса; 1 — одномодовый He-Ne лазер; 2 — поворотная призма; 3 — фокусирующая линза; 4 — исследуемый образец; 5 — диафрагма; 6 — монохромная ПЗС-камера; 7 — компьютер; *b* — примеры реализаций флуктуаций интенсивности рассеянного излучения для различных точек плоскости наблюдения.

На рис. 1 также приведен типичный пример зависимости интенсивности рассеянного излучения в произвольно выбранной точке зоны детектирования в зависимости от времени испарения жидкой фазы, полученной в результате предварительной обработки последовательности полученных изображений.

Дальнейшая обработка временных рядов значений интенсивности $I_n = I(n\tau)$, $n = 0.1, \dots, N$ производилась путем вычисления вейвлет-коэффициентов:

$$W_\psi(f, t) = |a(f)|^{-1/2} \tau \sum_{n=0}^N I_n \psi * \left[\frac{n\tau - t_0}{a(f)} \right], \quad (1)$$

где $W_\psi(f, t_0)$ — значение вейвлет-коэффициента на частоте f Hz в момент t_0 , s; τ — период дискретизации регистрируемых значений интенсивности спекл-поля, N — число значений в выборке; ψ — базисная функция вейвлет-преобразования, символ $*$ соответствует комплексному сопряжению; $a(f) = k_0/f$ — масштабирующий параметр, определяющий зависимость от частоты, коэффициент k_0 определяет взаимосвязь масштабов во временной и частотной областях.

В качестве базисной функции ψ нами был выбран вейвлет Морле $\psi(\xi) = \exp(jk_0\xi) \exp(-\xi^2/2)$, обладающий следующими свойствами:

вейвлет-преобразование с базисной функцией Морле тесно связано с фурье-преобразованием анализируемого сигнала [7];

использование гауссовой огибающей обеспечивает высокую степень локализации скользящего окна, используемого для анализа нестационарного сигнала не только во временной, но и в частотной области, и минимизирует частотно-временную неопределенность по Габору [6];

также благодаря гауссовой огибающей в фурье-спектре базисной функции отсутствуют побочные максимумы, что исключает неоднозначность при интерпретации получаемых вейвлет-спектров [10].

Выбор коэффициента $k_0 = 6$ был произведен на этапе предварительной обработки, исходя из критерия максимально возможного разрешения в частотной области при минимальном допустимом уровне шумовых флуктуаций (увеличение k_0 приводит к улучшению разрешающей способности при одновременном возрастании уровня шумов).

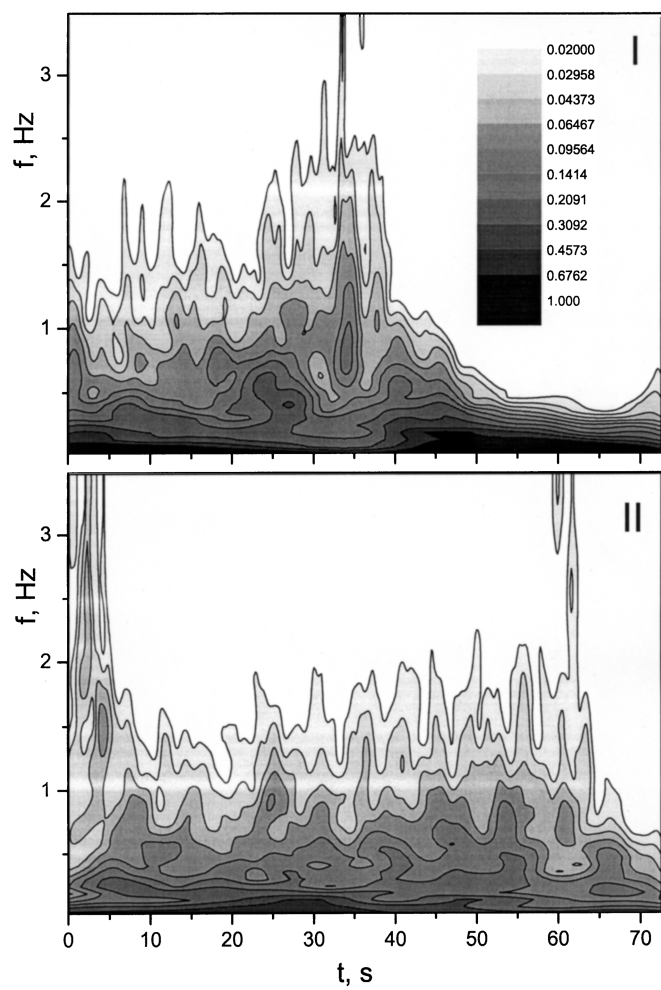


Рис. 2. Локальные спектры энергии флуктуаций $E(f, t_0)$ интенсивности рассеянного зондирующего излучения; образец I — толщина $88 \mu\text{m}$, пористость 0.56; образец II — толщина $135 \mu\text{m}$, пористость 0.84; насыщающая жидкость — ацетон.

Из значений комплексных вейвлет-коэффициентов может быть вычислен локальный энергетический спектр [10]:

$$E(f, t_0) = |W(f, t_0)|^2 = \text{Re}^2[W(f, t_0)] + \text{Im}^2[W(f, t_0)], \quad (2)$$

характеризующий распределение энергии процесса по частотам в различные моменты времени. Анализ временной зависимости $E(f, t_0)$ позволяет исследовать динамику перераспределения энергии процесса между различными частотными областями.

Локальные спектры флуктуаций интенсивности E_i , получаемые для каждой из ячеек i ПЗС-матрицы, усреднялись по всему ансамблю $i = 0 \dots 753$.

На рис. 2 приведены типичные локальные спектры $E(f, t_0)$ для флуктуаций интенсивности в процессе испарения жидкости из слоя, полученные для двух различных образцов с существенно различающимися значениями пористости и толщины. Образец I — принтерная бумага среднего качества с относительно гладкой поверхностью и плотностью 80 g/m^3 , образец II — фильтровальная бумага с существенно более шероховатой поверхностью и более высокой пористостью.

Оценки характерной полосы частот $\Delta f_{0.5}$ флуктуаций интенсивности рассеянного излучения (проведенные путем определения частотного интервала, соответствующего значению 0.5 от полной мощности флуктуаций) в зависимости от времени испарения t показывают резкое уменьшение $\Delta f_{0.5}$ на начальной стадии процесса испарения (для $0 < t < 5 \text{ s}$). Предположительно данный эффект обусловлен переходом от режима поверхностного испарения жидкой фазы к объемному в процессе разрушения пленки жидкой фазы на поверхности слоя и формирования фронта испарения в объеме пористой среды. Более широкая полоса частот флуктуаций интенсивности рассеянного излучения на начальной стадии для образца II обусловлена более развитым поверхностным фронтом испарения жидкости, формируемым на более шероховатой поверхности.

На последующей стадии наблюдается развитие фронта испарения в процессе его распространения в глубину пористого слоя, сопровождающееся возрастанием ширины фронта и, как следствие, увеличением числа динамических рассеивателей (локальных границ раздела между жидкой и газообразными фазами в отдельных порах) на единицу эффективной поверхности фронта испарения [4]. В условиях многократного рассеяния зондирующего излучения в слое пористой среды

это приводит к возрастанию ширины спектра флуктуаций рассеянного излучения. Соответственно для спектральной плотности наблюдается увеличение $\Delta f_{0,5}$ до максимального значения, соответствующего максимальному развитию фронта испарения (при $t_{\max} \approx 34$ s для образца I и $t_{\max} \approx 53$ s для образца II). На заключительной стадии происходит разрушение фронта испарения вследствие прогрессирующего распада области пористой среды, насыщенной жидкостью, на отдельные кластеры и быстрого уменьшения общего числа динамических рассеивателей в зоне рассеяния зондирующего лазерного пучка. Подобный процесс сопровождается быстрым убыванием значения $\Delta f_{0,5}$ (рис. 2).

Таким образом, вейвлет-анализ флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного пористыми средами, содержащими жидкую и газообразную фазы, позволяет проводить анализ эволюции „глобальной“ границы раздела фаз в процессе нестационарного массопереноса. Для количественных оценок параметров рассеивающей системы (например, ширины фронта испарения для различных стадий процесса испарения, плотности локальных межфазных границ в зоне испарения и т.д.) может быть использовано, например, сопоставление результатов вейвлет-анализа флуктуаций интенсивности с результатами статистического моделирования процессов необратимого роста для неупорядоченных решеток с использованием моделей, аналогичных модели Идена [12].

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 01-02-17493) и АФГИР (грант # REC-006).

Список литературы

- [1] *Фракталы в физике* / Под ред. Л. Пьетронеро и Э. Тозатти. М.: Мир, 1988. (*Fractals in Physics* / Eds L. Pietronero and E. Tozatti. Elsevier Science Publishers, 1986).
- [2] *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1990. (*Feder J. Fractals*. New York: Plenum, 1988).
- [3] *Shaw T.M.* // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 1671.
- [4] *Зимняков Д.А., Захаров П.В., Трифонов В.А.* и др. // *Письма в ЖЭТФ.* 2001. Т. 74. С. 237–243.
- [5] *Steven W. Smith* *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.* California Technical Publishing, 1999.

- [6] *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983.
- [7] *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. РХД, 2001.
- [8] *William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery.* Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1992.
- [9] *Goupillaud P., Grossmann A., Morlet J.* // *Geoexploration.* 1984–1985. V. 23. P. 85–102.
- [10] *Астафьева Н.М.* // *УФН.* 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
- [11] *Воробьев В.И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлет-преобразований. ВУС, 1999.
- [12] *Eden M.* Proceedings of the Fourth Berkeley Symposium on Mathematical Statistica and Probabilities / Ed. F. Newman. Univ. of California Press, Berkeley, 1961. IV. P. 233.