

08;12

Акустическое излучение при электрогидродинамической неустойчивости в нематическом жидком кристалле

© *Е.Г. Аксельрод, А.Н. Кузьмин, В.И. Крюк,
В.А. Добрин, К.Л. Швамм*

Уральская государственная лесотехническая академия, Екатеринбург

Поступило в Редакцию 4 ноября 2000 г.

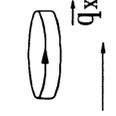
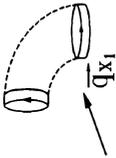
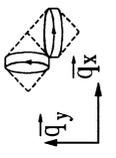
Экспериментально показано, что нестационарное движение конвективных роллов в нематике сопровождается генерацией звуковых волн. Обнаружена корреляция информативных параметров акустической эмиссии с типом, морфологией и динамикой диссипативных структур, возникающих в ячейке с большим аспектным отношением при росте надкритичности. Обоснована принципиальная возможность количественного описания хаотической динамики диссипативных структур в пространстве параметров регистрируемого акустического излучения.

Существующие методы теоретического описания самоорганизации при структурных превращениях в жидких кристаллах (ЖК) во внешних полях применимы в основном к модельным и низкоразмерным системам с ограниченным числом степеней свободы (малыми аспектными отношениями Γ) и при слабых надкритичностях [1]. Актуальными задачами являются разработка и реализация экспериментальных методов исследования динамики диссипативных структур (ДС) и сценария перехода к хаотическому режиму в реальной ЖК системе с распределенными параметрами. В этой связи представляет интерес акустоэмиссионная (АЭ) спектроскопия, основанная на регистрации

волн упругих напряжений, возникающих при динамических локальных изменениях структуры ЖК, и анализе взаимосвязи АЭ с движением линейных дефектов, доменных и межфазных границ. Природа АЭ и условия ее проявления в мезогенах исследованы недостаточно, сведения об АЭ активности жидкокристаллических ДС отсутствуют [2]. В настоящей работе впервые экспериментально показано, что образование и эволюция ДС при электроконвективной неустойчивости в ЖК системе с большим аспектным отношением сопровождаются генерацией акустического излучения, анализ которого позволил обосновать принципиальную возможность описания хаотической динамики поля директора n , связанного с движением элементов ДС, в пространстве параметров потока импульсов АЭ.

Использованная в работе экспериментальная установка обеспечивает возможность регистрации ряда информативных параметров АЭ с одновременным измерением оптических и морфологических свойств ЖК текстуры. Методика эксперимента изложена в [3]. Термосониметрическая камера, включающая "сэндвич"-ячейку с жидким кристаллом МББА ($\Gamma = 250$) и контактный пьезодатчик, располагалась на столике поляризаторного микроскопа, снабженного фотоэлектронным умножителем и видеокамерой. В каналах измерения акустического и оптического откликов использован принцип аналогового линейного детектирования спектральной компоненты излучения. Основные метрологические характеристики тракта регистрации АЭ: полоса частот ($0.5 \div 20$) kHz; суммарный коэффициент усиления 130 dB; уровень собственных шумов, приведенных ко входу предусилителя, не более $4 \mu\text{V}$; динамический диапазон измеряемых амплитуд 42 dB, интервалов времени между импульсами ($5 \div 500$) ms; пороговая мощность регистрации событий АЭ $\sim 0.1 \text{ pW}$. Реализованы аппаратные решения, позволившие выделить слабый квазипериодический АЭ-сигнал из шума: запись временных рядов АЭ в оперативную память многомерного анализатора импульсов, группирование каналов анализатора, суммирование когерентных замеров с последующими поканальным вычитанием фона и цифровой обработкой. Измерения АЭ-эффекта проводились как для стационарных ДС (постоянная разность потенциалов U на ячейке), так и при переходах между ДС (линейная развертка U со скоростью $\beta = 1 \div 10 \text{ V/min}$). Электроконвекция в мезофазе сопровождается возникновением ряда ДС, последовательность, тип, характерные размеры которых и отвечающие им пороговые напряжения (см. таблицу) согласуются с данными [4].

Диссипативные структуры при электроконвекции в МБА

Тип стационарной ДС	Домены Вильямса, DW	Флуктуирующие домены Вильямса, FDW	Полосчатая текстура, GP1	Мода динамического рассеяния 1, DSM1	Мода динамического рассеяния 2, DSM2
Схема возмущения волнового вектора ДС					
Управляющее напряжение; U, V	10	15	20	25	30
Характерный масштаб; $d, \mu m$	72	36	21	13	6
Время корреляции, s	28	48	24	173	21
Модуляция в системе конвективных роллов	Переход 2D-3D конвекция		Переход DSM1-DSM2		
	Область 1		Область 2		

1* Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 13

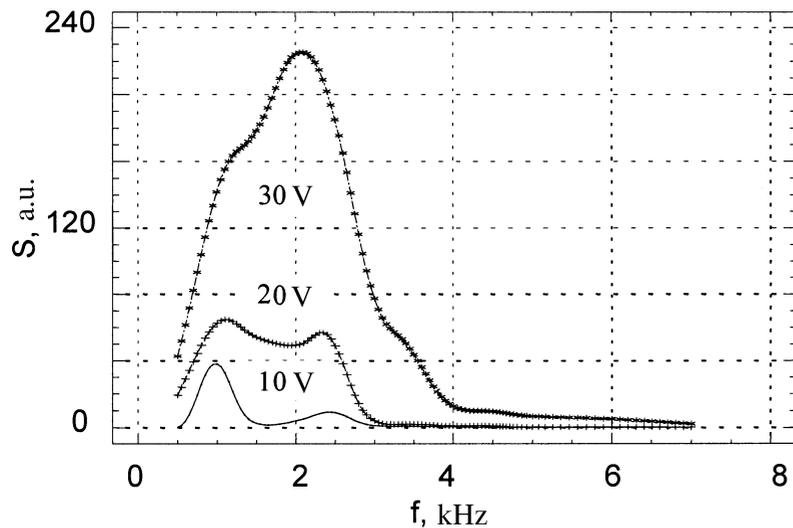


Рис. 1. Спектры мощности акустической эмиссии стационарных ДС при различных уровнях управляющего напряжения.

Принципиальным является вопрос оптимального выбора частоты регистрации АЭ. Ориентационные возмущения n возникают, когда число Эриксона $Er = \gamma \cdot \rho \cdot d \cdot V / K$ ($\rho \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$ — плотность, $\gamma \sim 1 \text{ сП}$ — вращательная вязкость ЖК, $K \sim 10^{-12} \text{ Н}$ — модуль Франка) принимает критическое значение ~ 1 , которое достигается при скорости конвективного потока $V \sim (1 \div 100) \mu\text{m/s}$. Соответственно характерная частота f пульсаций скорости при генерации звука, определяемая числом Струхала $Sh = f \cdot V / d$, составляет $(10^{-1} \div 10^1) \text{ kHz}$. Существенно, что для данного U распределения V и d являются весьма узкими, что указывает на ограниченную полосу частот акустической эмиссии стационарной ДС. Из рис. 1 видно, что при образовании ДС действительно имеет место АЭ эффект, основная мощность которого (до нескольких μW) приходится на полосу $(0.5 \div 7.0) \text{ kHz}$. При этом мощность излучения, генерируемого в указанной полосе структурными элементами ДС с характерным масштабом d : $W \propto d^2 \cdot V^p$, где скорость пропорциональна степени надкритичности $V \propto (U^2 - U_1^2)$, а масштаб ДС $d \propto U^{-1}$ (см. таблицу). Отсюда $W \propto (U^2 - U_1^2)^n$, $n = p - 2$.

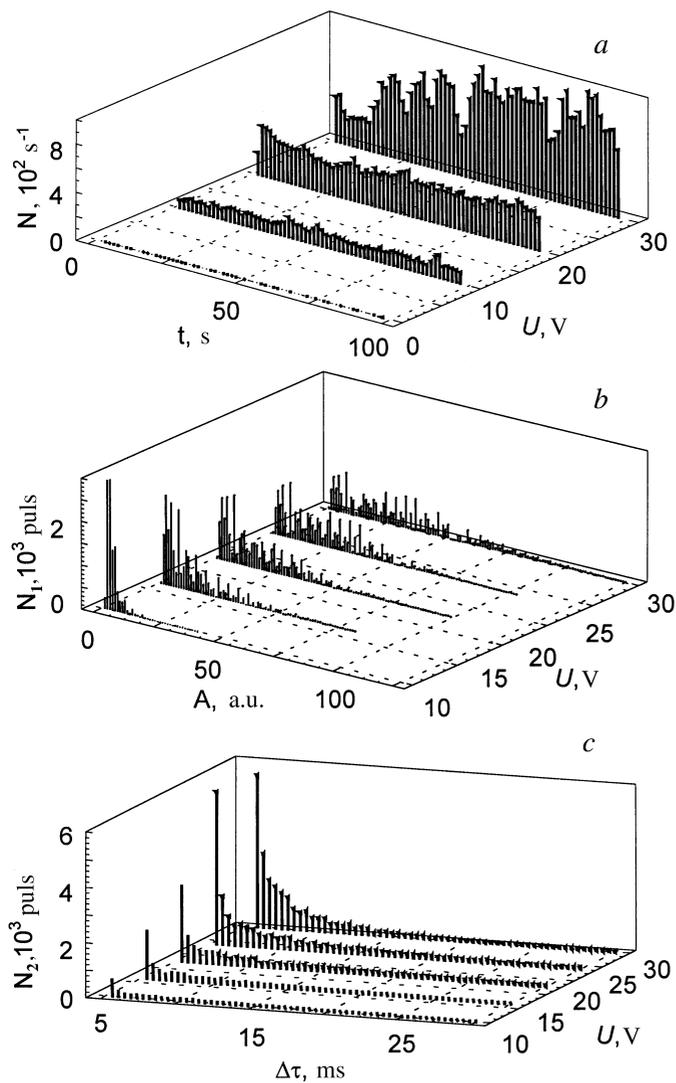


Рис. 2. Зависимость информативных параметров АЭ-потока от степени надкритичности: кинетика изменения активности (*a*); распределение амплитуд импульсов (*b*); распределение интервалов времени между импульсами (*c*). Частота фильтрации $(2.50 \pm 0.15) \text{ kHz}$.

В эксперименте $n \approx 3.9$, что свидетельствует о преимущественно дипольной природе источников АЭ [5], связанной соответственно с нестационарным движением конвективных роллов.

Совместный анализ акустического и оптического откликов ЖК на изменение управляющего параметра показывает, что амплитудные, частотные и временные параметры АЭ-потока коррелируют с типом, морфологией и динамикой ДС (см. рис. 2 и таблицу). Из рис. 2 следует, что после узкополосной фильтрации имеет место отклонение плотности вероятности частот следования и амплитуд импульсов АЭ от соответственно пуассоновского и нормального законов распределения. Это обусловлено несимметричным уширением и возникновением дополнительных высокоамплитудных пиков в результате появления в ДС низкочастотных пульсаций V . Последнее подтверждается расчетом автокорреляционных функций (АКФ) осцилляций скорости роллов. Время корреляции τ_c , отвечающее первому минимуму АКФ, экстремально возрастает в переходных областях 1 и 2 (см. таблицу), что, согласно [6], указывает на возникновение перемежаемости в потоке событий АЭ, развивающейся вследствие временных корреляций в работе элементарных источников. Есть основания полагать, что АЭ-активность стационарных ДС связана с коллективными пространственными модами, отвечающими формированию крупномасштабных когерентных структур. Дополнительная информация о корреляционных эффектах при нестационарном движении роллов получена из анализа функции распределения временных интервалов (ФРВИ) между импульсами АЭ. Из рис. 2, с видно, что с ростом надкритичности центр тяжести ФРВИ сдвигается в область малых $\Delta\tau$, величина смещения коррелирует с типом стационарной ДС. Для всех ДС имеет место зависящее от уровня управляющего напряжения U отклонение формы кривой $N(\Delta\tau)$ от экспоненциальной. Это отражает наличие в потоке событий АЭ ограниченного последствия, природа которого определяется степенью коррелированности в работе элементарных источников АЭ, резко возрастающей в условиях перемежаемости.

Корреляция между частотными, амплитудно-временными распределениями импульсов АЭ и осцилляциями скорости V позволяет использовать АЭ-данные для описания динамики самоорганизации при возникновении и эволюции ДС, в частности детерминированного хаоса, связанного с осцилляциями V , образом которых в фазовом пространстве является стохастический аттрактор. Его топологическая структура характеризуется рядом параметров: корреляционной размерностью D_c , наибольшим

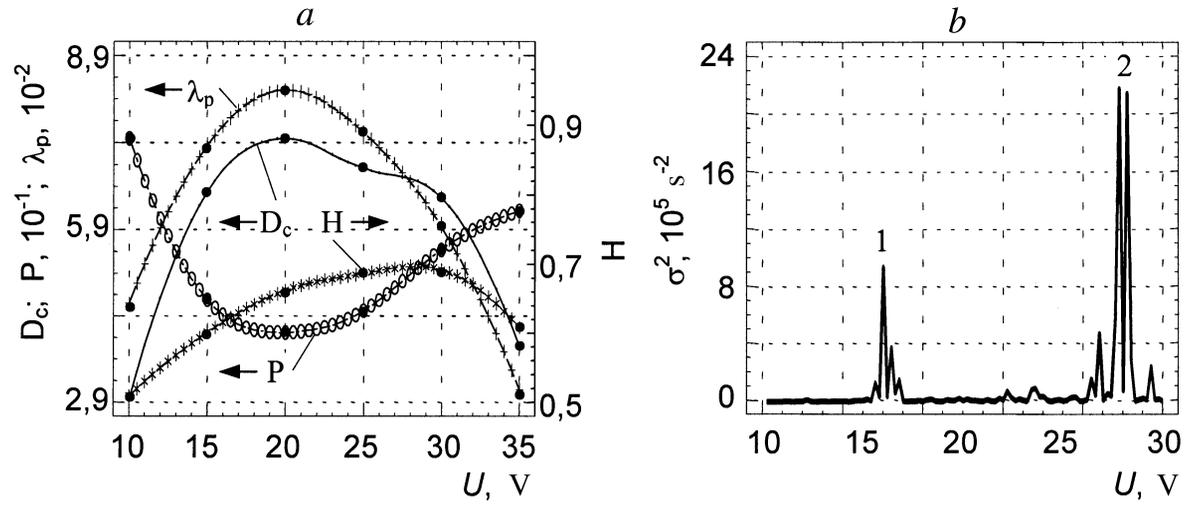


Рис. 3. Хаотическая динамика системы в пространстве параметров акустической эмиссии: anomalous changes in characteristics of deterministic chaos (a) and dispersion of activity AE (b) during transitions between DC with increasing supercriticality. Explanations in the text.

показателем Ляпунова λ_p и уровнем порядка P . Значения D_c , λ_p оценивались по временным реализациям одной из координат фазового пространства на основе теоремы Такенса [1]. При этом в распределенной ЖК-системе возникает проблема выбора измеряемого АЭ-параметра, связанного с существенной динамической переменной. Из рис. 2, а, с следует, что в наибольшей степени особенности хаотической динамики ДС, связанные с перемежаемостью (пространственно-временными корреляциями), проявляются в изменении уровня АЭ-активности \dot{N} . Соответственно для определения фрактальной структуры аттрактора использованы временные ряды $\dot{N}(t)$. В качестве количественного критерия степени стохастичности динамики ДС при развитии перемежаемости и временных корреляций в движении роллов (переходные области 1, 2) использован уровень порядка $P = (m - D_c) / (m - 1)$, где m — размерность вложения аттрактора. Отклонение статистики динамической системы от гауссовой характеризовалось показателем Херста H , определяемым по АЭ-наблюдаемой $\dot{N}(t)$. Величина H описывает персистентные свойства АЭ-потока, увеличиваясь с развитием перемежаемости и последствием.

Согласно рис. 3, а, параметры D_c , P , λ_p , H также связаны с типом стационарной ДС и претерпевают аномальные изменения с ростом надкритичности. Дробные значения D_c означают, что в условиях электроконвекции динамика ДС в ячейке с большим аспектным отношением имеет фрактальную природу. Существенно, что величина $D_c = 2.9$ (текстура FDW) согласуется со значением $D_c = 2.6$ для ячейки с $\Gamma = 2 \div 4$ [7], а D_c моды динамического рассеяния совпадает с $D_c \approx 5.4$, полученной в изотропной среде ($\Gamma = 1$) при сильной униполярной инжекции [8]. Однако в отличие от изотропных распределенных систем, где с увеличением надкритичности размерность аттрактора монотонно возрастает, величина D_c в мезогенной среде не только на полтора порядка меньше, но и падает при $U \geq 20$ V. При этом число основных гармоник Фурье-спектра квадрата осцилляций V совпадает с m . Следовательно, в фазовом пространстве ДС возникает низкоразмерный стохастический ($\lambda_p > 0$) аттрактор, которому отвечает ограниченное число динамических переменных, управляющих движением ансамбля роллов. Это свидетельствует о том, что хаотическая динамика ДС действительно определяется относительно небольшим числом независимых крупномасштабных возбуждений, остальные жестко связаны с ними, т. е. образуют когерентные структуры.

При циклической развертке управляющего напряжения возникают две области надкритичности 1 и 2, в которых информативные

параметры АЭ и соответствующие статистические моменты высших порядков испытывают экстремальные изменения (рис. 3, *b*). Данные переходы сопровождаются резким увеличением времени корреляции и персистентности в потоке событий АЭ (см. таблицу и рис. 3, *a*), появлением локального максимума ФРВИ (рис. 2, *c*), уменьшением числа действующих мод и низкочастотным сдвигом в спектре мощности АЭ (рис. 1). Указанные эффекты обусловлены качественными изменениями фрактальной структуры аттрактора, отражающими осуществление сценария перехода между ДС через интермиттенс "хаос-хаос" [9]. Таким образом, нестационарное движение конвективных роллов в ЖК ячейке с большим аспектным отношением является источником низкочастотного и узкополосного акустического излучения дипольной природы. Возникновение коллективных возбуждений и отвечающих им дипольных источников звука при переходах между ДС определяет аномально высокие значения дисперсии и персистентности временных рядов активности АЭ, указывающих на развитие перемежаемости в поле скоростей конвективных роллов. Информативные параметры эффекта использованы для выявления сценария хаотизации, наблюдаемого в ансамбле роллов с ростом степени надкритичности.

Список литературы

- [1] Cross M.C., Hohenberg P.C. // Rev. Of Modern Phys. 1993. V. 65. N 3. P. 854–1112.
- [2] Капустин А.П., Капустина О.А. Акустика жидких кристаллов. М.: Наука, 1986. 247 с.
- [3] Axelrod E., Bespalov V., Kuzmin A. et al. // Molecular Crystal and Liquid Crystal. 1997. V. 302. N 3. P. 363–367.
- [4] Miike H., Ikemoto S., Ochiai K. et al. // Jap. J. of Appl. Phys. 1984. V. 23. N 6. P. L379–L381.
- [5] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [6] Зельдович Я.Б., Молчанов С.А., Рузмайкин А.А. // Успехи физ. наук. 1987. Т. 152. № 1. С. 3–32.
- [7] Hidaka Y., Orihara H., Ishibashi Y. // J. Phys. Soc. Jap. 1992. V. 61. N 11. P. 3950–3959.
- [8] Malraison B., Atten P., Berge P. // J. Phys. Let. 1983. V. 44. N 22. P. 897–902.
- [9] Анищенко В.С., Нейман А.Б. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 17. С. 1063–1066.