

03;12

Автоколебания напряжения и динамика фазового разделения в тонком слое слабопроводящей феррожидкости при периодически возникающих электрогидродинамических течениях

© В.М. Кожевников, И.Ю. Чуенкова, М.И. Данилов, С.С. Ястребов

Северо-Кавказский государственный технический университет,
355029 Ставрополь, Россия
e-mail: kvm@stv.runnet.ru

(Поступило в Редакцию 22 мая 2007 г.)

Показано, что на электродах плоскопараллельной ячейки, заполненной коллоидной системой, состоящей из стабилизированных наночастиц магнетита, диспергированных в слабопроводящей жидкости, при заданном постоянном токе возникают автоколебания напряжения, которые обусловлены свойствами приэлектродного слоя и периодически возникающими в слое коллоида электрогидродинамическими течениями. Рассмотрено влияние автоколебаний и периодических электрогидродинамических течений на процесс фазового разделения в коллоидной системе. При этом обнаружено формирование новых динамических образований, представляющих собой области повышенной концентрации частиц магнетита, которые имеют форму лабиринтов размером несколько миллиметров.

Обнаружено возникновение отрицательной действительной части диэлектрической проницаемости слоя коллоида. Ее появление связывается с тем, что при возникновении стационарных электрогидродинамических течений нормальная составляющая напряженности внутреннего электрического поля, создаваемая объемными зарядами, становится сонаправленной с приложенным полем.

PACS: 45.70.Qj, 05.65.+b, 47.57.J-, 47.65.Cb, 47.65.-d

Несмотря на обширные исследования влияния электрического поля на процессы фазового разделения дисперсных систем [1–5] вопрос поведения систем с частицами нанометровых размеров требует дальнейшего развития. Важность подобных исследований обусловлена как чисто научными проблемами, связанными с пониманием общих принципов коллективного поведения больших ансамблей частиц, являющихся основой для будущих достижений нанонауки, так и практической необходимостью сборки и разделения простых и многокомпонентных микро- и наноразмерных ансамблей частиц во многих промышленных технологиях.

Исследования поведения металлических микрочастиц, помещенных в слабопроводящую жидкость, при воздействии сильных электрических полей [6–8] показали, что возможно формирование различных динамических образований, вызванных взаимодействием частиц с возникающими в жидкости электрогидродинамическими (ЭГД) течениями. Динамика поведения частиц [9–11] и образование агрегатов, вызванных ЭГД-течениями, в водных средах изучались в работах [12,13]. Исследование влияния электрического поля на процессы фазового разделения в дисперсных системах магнитных наночастиц в слабопроводящей жидкости проводились в работах [14,15]. Наблюдение за поведением таких систем в сильных электрических полях, выражающимся в формировании динамических образований при возникновении ЭГД-течений [16,17], показало, что ключевую роль в данных процессах играет приэлектродный слой и формирующийся объемный заряд [18]. Выявить влияние указанных эффектов на поведение наночастиц можно при исследовании тонкого слоя коллоидной системы.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования оптических и электрических свойств тонкого ($20\text{--}25\ \mu\text{m}$) слоя коллоидной системы, которая подвергается воздействию высоких электрических полей ($\sim 2000\ \text{kV/m}$) и состоит из наночастиц магнетита, стабилизированных олеиновой кислотой и диспергированных в слабопроводящей жидкости—керосине. Проводимость такой коллоидной системы обусловлена в основном примесными ионами, находящимися в дисперсионной среде [19], и составляет $\sigma_{\text{vol}} \sim 10^{-6}\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Частицы магнетита — полидисперсные ($2\text{--}30\ \text{nm}$), распределение частиц по размерам приведено в [20]. Исследуемая коллоидная система с объемной концентрацией твердой фазы $\varphi = 4\%$ помещалась в межэлектродное пространство плоскопараллельной ячейки. Electroды ячейки размером $30 \times 40\ \text{mm}$ представляют собой стеклянные пластины с односторонним оптически прозрачным проводящим покрытием $\text{In}_2\text{O}_5\text{SnO}_2$. Расстояние между электродами задавалось с помощью фторопластовой прокладки толщиной $d = 20\ \mu\text{m}$. На электроды ячейки подавалось постоянное $U_p = 0\text{--}30\ \text{V}$ и переменное синусоидальное напряжение с амплитудой $U_m = 0\text{--}30\ \text{V}$ и частотой $f = 3\text{--}100\ \text{Hz}$. Исследование коллоидной системы проводилось с помощью оптических наблюдений в проходящем и отраженном свете, также измерялись напряжение на ячейке и ток, протекающий через нее.

Проводимые исследования показали, что воздействие протекающего через ячейку постоянного тока, задаваемого от источника с внутренним сопротивлением $1.5\ \text{M}\Omega$ (источник тока), приводит к возникновению автоколебаний напряжения на электродах ячейки.

Автоколебания возникают при постоянном напряжении $U_p = 9$ В (рис. 1, *a*). Под постоянным напряжением при автоколебаниях понимается постоянная составляющая напряжения на ячейке. Увеличение постоянного напря-

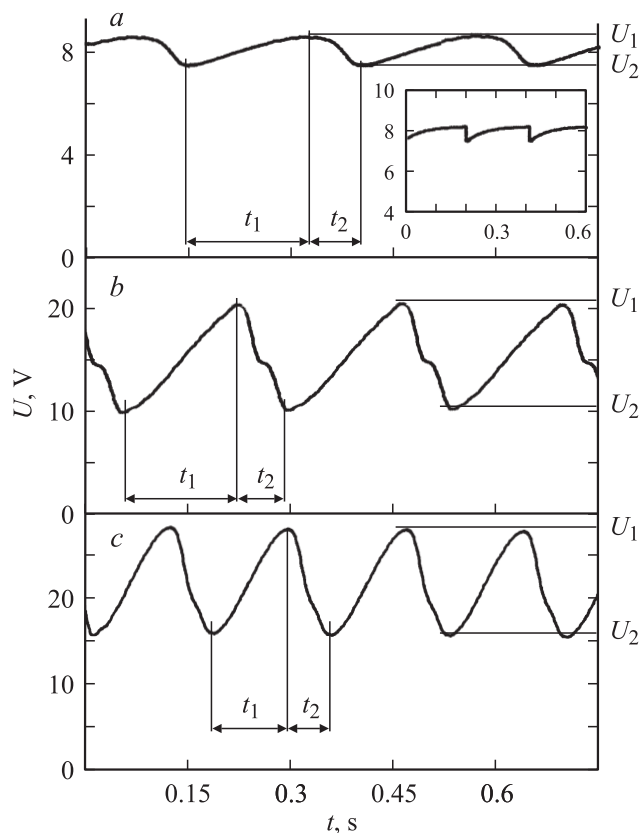


Рис. 1. Автоколебания напряжения на электродах ячейки при: *a* — $U_p = 9$, *b* — 15, *c* — 23 В. На вставке теоретически полученная кривая при: $\sigma_{\text{nbl}} = 10^{-9} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $\sigma_{\text{vol}} = 10^{-6} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $\epsilon_{\text{nbl}} = 4$, $\epsilon_{\text{vol}} = 2$, $\rho = q/2Sk^{-1} = 10^4 \text{ c/m}^3$, $d_{\text{nbl}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, $v = 10^{-7} \text{ m/s}$, $j = 0.021 \text{ A/m}^2$, $j_{\text{si}} = 0.019 \text{ A/m}^2$.

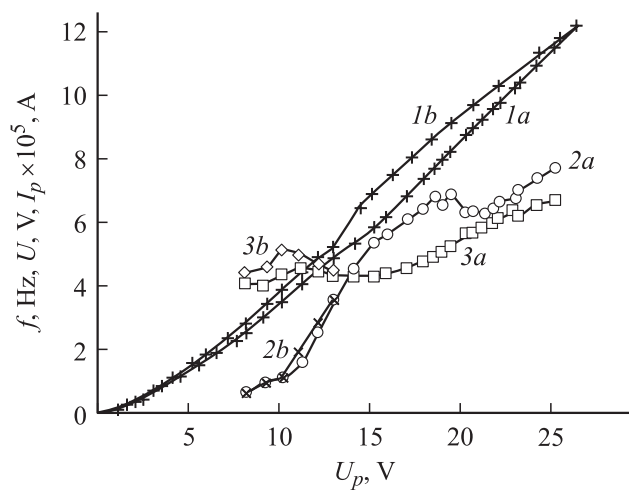


Рис. 2. Изменение в зависимости от постоянного напряжения: 1 — постоянного тока через ячейку; 2 — амплитуды автоколебаний; 3 — частоты автоколебаний. Кривые *a* относятся к повышению напряжения, *b* — к понижению напряжения.

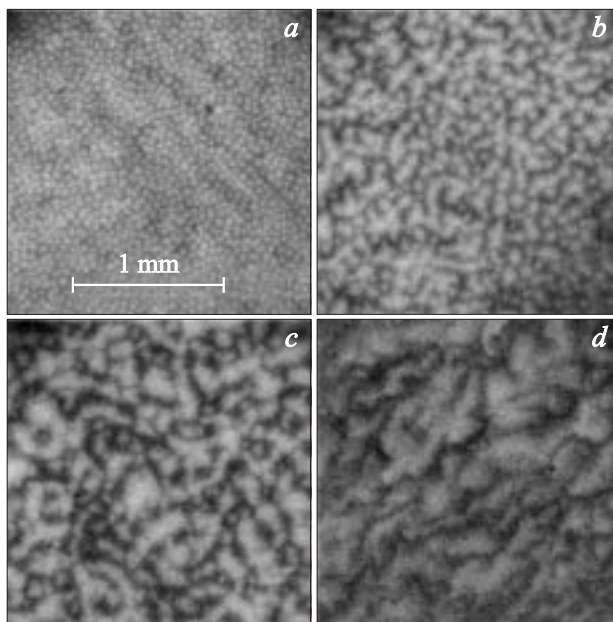


Рис. 3. Структурные образования в слое коллоида при совместном воздействии переменного ($U_m = 4$ В, $f = 6$ Гц) и постоянного напряжения: *a* — $U_p = 7$, *b* — 12, *c* — 18, *d* — 25 В.

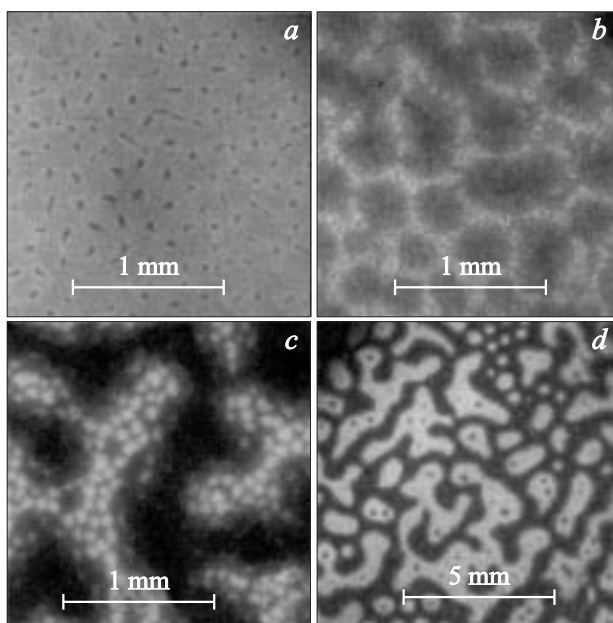


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для $U_m = 25$ В, $f = 6$ Гц; *a* — $U_p = 0$, *b* — 4, *c* — 11, *d* — 15 В.

жения приводит к изменению формы автоколебаний (рис. 1, *b, c*), их частоты и амплитуды (рис. 2). Автоколебания наблюдаются до $U_p = 27$ В, после чего они становятся неустойчивыми и резко исчезают. Возникновение автоколебаний происходит при уменьшении напряжения до $U_p = 14$ В.

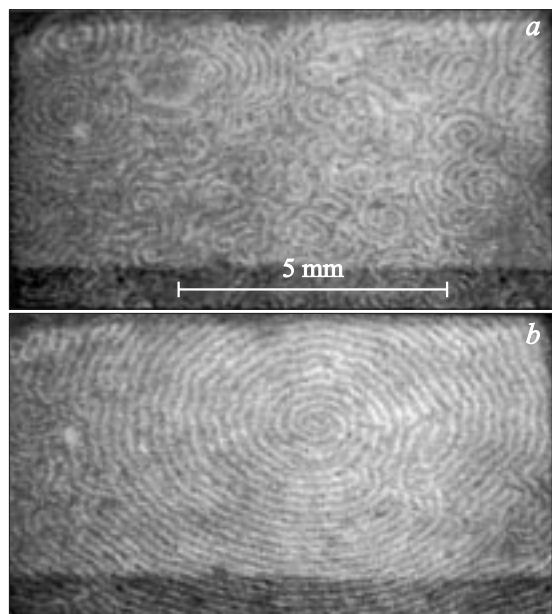


Рис. 5. Спиральные волны: a — $U_p = 27$, b — 18 V.

Оптические наблюдения слоя коллоида в проходящем свете показали, что при наличии напряжения на ячейке в нем формируются структурные образования, представляющие собой области повышенной концентрации частиц магнетита (рис. 3, 4). При постоянном напряжении $U_p \leq 6$ V слой остается макроскопически однородным. Далее в диапазоне 6–9 V наблюдается ячеистая структура, при этом средний размер ячеек увеличивается от 25 до 80 μm . Возникновение автоколебаний напряжения сопровождается изменением характера структурных образований, происходит переход от ячеистой структуры к лабиринтной, которая сохраняется до $U_p = 27$ V, при этом размер лабиринтной структуры увеличивается от 500 до 2000 μm . Переход от ячеистой структуры к лабиринтной является плавным, т.е. в определенном диапазоне постоянных напряжений 4–5 V сосуществуют оба вида структур. При напряжении $U_p \geq 27$ V одновременно с прекращением автоколебаний напряжения лабиринтная структура становится неустойчивой и переходит в движущуюся (рис. 3, d), представляющую собой области повышенной концентрации частиц твердой фазы, которые перемещаются в горизонтальной плоскости слоя коллоида. Размер, форма и скорость движения этих областей зависит от постоянного напряжения на ячейке. Переход от лабиринтной структуры к движущейся — пороговый. При уменьшении постоянного напряжения движущаяся структура сохраняется до $U_p = 14$ V, затем происходит возобновление автоколебаний напряжения на ячейке и восстановление лабиринтной структуры.

Наблюдения в отраженном свете показали, что при увеличении постоянного напряжения в диапазоне $U_p = 0$ –9 V изменяется спектр отраженного поверхностью слоя коллоида света от зеленого до ма-

линового. При возникновении автоколебаний спектр отраженного света также периодически изменяется синхронно с изменением напряжения на электродах ячейки. В диапазоне $U_p = 9$ –27 V в отраженном свете наблюдается та же лабиринтная структура, что и в проходящем свете, в отличие от ячеистой, которая в отраженном свете не наблюдается. При напряжении $U_p \geq 27$ V одновременно с прекращением автоколебаний происходит возникновение спиральных волн с периодом ~ 0.3 с (рис. 5, a) и прекращение периодического изменения спектра отраженного света. Спиральные волны сохраняются при уменьшении постоянного напряжения (рис. 5, b) до $U_p = 14$ V и возобновления автоколебаний.

Воздействие постоянного напряжения от источника с малым внутренним сопротивлением 100 Ω (источник ЭДС) не приводит к появлению автоколебаний тока через ячейку.

В ходе дальнейших исследований на электроды ячейки подавалось постоянное и переменное синусоидальное напряжение от источников ЭДС, что позволило воспроизвести амплитуду и частоту напряжения на электродах ячейки в автоколебательном режиме и определить диэлектрическую проницаемость и проводимость слоя коллоида в линейном режиме — когда переменная составляющая тока через ячейку имеет форму, близкую к синусоидальной (амплитуда высших гармоник составляет не более 10%).

При переменном напряжении амплитудой $U_m = 4$ V и частотой $f = 6$ Hz в слое коллоида под действием постоянного напряжения происходит формирование и трансформация структурных образований, наблюдаемых в проходящем свете. Первоначально в диапазоне $U_p = 4$ –10 V наблюдается ячеистая структура (рис. 3, a), которая при $U_p > 10$ V переходит в лабиринтную (рис. 3, b, c). Начиная с напряжения $U_p \geq 18$ V лабиринтная структура переходит в движущуюся (рис. 3, d). Наблюдения в отраженном свете показали, что при переходе структуры от лабиринтной к движущейся происходит возникновение спиральных волн. До возникновения спиральных волн в отраженном свете наблюдается периодическое изменение спектра отраженного света синхронно с переменным напряжением на электродах. Переменное напряжение с заданными $U_m = 25$ V и $f = 6$ Hz приводит к формированию в слое коллоида микрокапельной структуры (рис. 4, a), которая при увеличении постоянного напряжения переходит (рис. 4, b) в структуру „больших“ лабиринтов с разделяющими их ячейками (рис. 4, c, d).

На фазовой диаграмме (рис. 6) отражены процессы образования структур в слое коллоида при совместном воздействии постоянного и переменного напряжения для частоты 6 Hz. Вид фазовой диаграммы сохраняется для диапазона частот 3–10 Hz. При увеличении частоты в этом диапазоне возрастает напряжение, при котором происходит переход от лабиринтной структуры к движущейся. Для $f = 6$ Hz этот переход показан сплошной линией между областью лабиринтной и движущейся

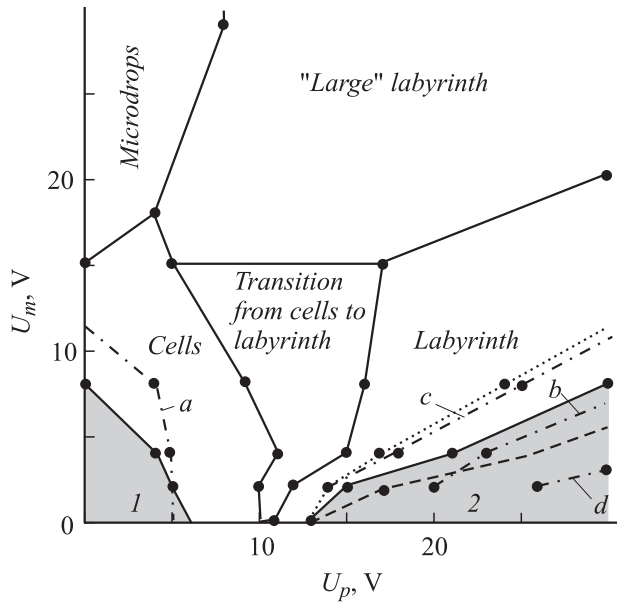


Рис. 6. Фазовая диаграмма структурных образований в слое коллоида при частоте переменного напряжения $f = 6$ Hz. Область 1 соответствует отсутствию структурных образований, 2 — движущейся структуре. Штрихпунктирные линии обозначают: a — линейный режим для $f = 6$ Hz, b — переход к линейному режиму с отрицательной ε' для $f = 6$, c — 3, d — 10 Hz.

структуры. Пунктирная линия показывает напряжения перехода для $f = 10$ Hz, а точечная — при $f = 3$ Hz. Штрихпунктирные линии (a, b) и оси координат ограничивают области значений постоянного и амплитуды переменного напряжения с частотой 6 Hz, в которых ячейка находится в линейном режиме. При $f > 10$ Hz и $U_m = 0-30$ V структуры в слое коллоида качественно подобны наблюдаемым при воздействии только постоянного напряжения [17] и отсутствует формирование микрокапельной структуры и „больших“ лабиринтов (рис. 6).

Исследования переменного тока через ячейку показали, что его форма и величина (рис. 7, 8) изменяются при воздействии постоянного напряжения. При отсутствии постоянного напряжения и $U_m = 4$ V форма переменного тока близка к синусоидальной (рис. 7, кривая 1) и ток опережает по фазе напряжение на ячейке. Увеличение постоянного напряжения $U_p > 8$ V приводит к тому, что переменный ток становится несинусоидальным — ячейка переходит в нелинейный режим (рис. 8, $a-c$), а при $U_p > 22$ V ток снова становится синусоидальным и отстает по фазе относительно переменного напряжения на ячейке (рис. 7, кривая 2).

По измерениям тока через ячейку в линейном режиме была определена комплексная диэлектрическая проницаемость слоя коллоида [21]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\sigma_\omega/\omega = -iI^*d/U^*\omega S. \quad (1)$$

Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости определялась по формуле

$$\varepsilon' = \text{Re}(-iI^*d/U^*\omega S\varepsilon_0), \quad (2)$$

где U^* — комплексное напряжение первой гармоники на ячейке, I^* — комплекс первой гармоники переменной составляющей тока через ячейку, S — площадь электродов ($S = 12 \text{ cm}^2$), d — расстояние между электродами

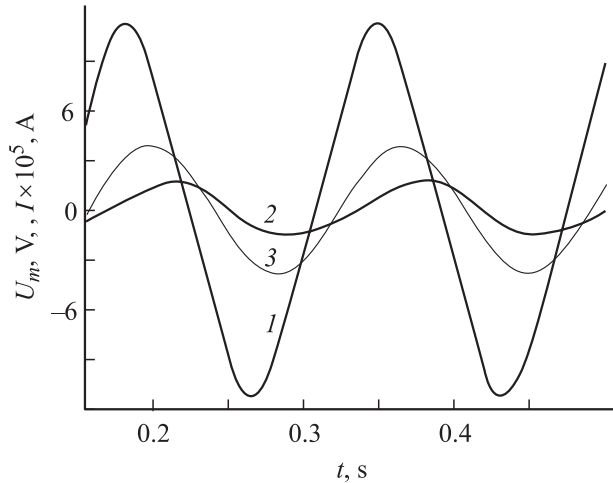


Рис. 7. Форма переменной составляющей тока через ячейку при воздействии переменного ($U_m = 4$ V, $f = 6$ Hz) и постоянного напряжения: 1 — $U_p = 0$, 2 — 25 V, 3 — переменное напряжение на ячейке.

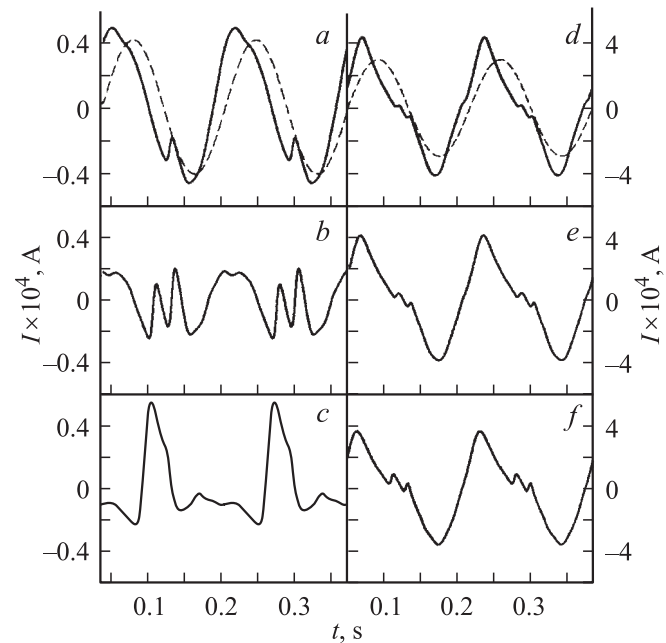


Рис. 8. Форма переменной составляющей тока через ячейку при совместном воздействии постоянного и переменного ($f = 6$ Hz) напряжения: a — $U_m = 4$, $U_p = 7$; b — 4, 12; c — 4, 18; d — 25, 8; e — 25, 11; f — 25, 15 V. Пунктиром показано переменное напряжение на ячейке.

($d = 20 \mu\text{m}$), $\omega = 2\pi f$, σ_ω — проводимость слоя коллоида на частоте ω .

Выявлено, что воздействие постоянного напряжения приводит к появлению отрицательной действительной части относительной диэлектрической проницаемости (рис. 9, кривая 1). Переход от положительного значения ϵ' к отрицательному происходит в диапазоне $U_p = 7-23 \text{ V}$, в котором ячейка находится в нелинейном режиме. Линейный режим, в котором наблюдается отрицательная ϵ' , появляется в частотном диапазоне 3–8 Hz при постоянном напряжении выше определенного значения, которое пропорционально амплитуде и частоте переменного напряжения (рис. 6, штрихпунктирные линии *b, c, d*). Кроме того, было обнаружено, что удельная проводимость слоя коллоида зависит от постоянного напряжения, а также от частоты переменного напряжения на ячейке (рис. 10).

Основной наблюдаемых явлений в слое коллоида является формирование при воздействии напряжения приэлектродных слоев, представляющих собой области с высокой концентрацией частиц дисперсной фазы (~ 30%), толщина которых зависит от напряжения на ячейке [18]. Проводимость этого слоя на три порядка меньше проводимости коллоидной системы и составляет $\sigma_{\text{nbl}} \sim 10^{-9} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Формирование приэлектродного слоя приводит к накоплению заряда на границе раздела „приэлектродный слой–объем коллоида“ из-за разных значений их диэлектрической проницаемости ϵ и про-

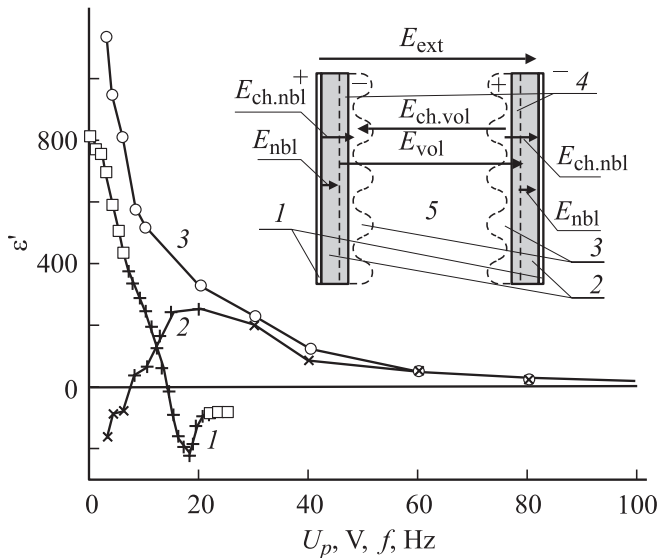


Рис. 9. Зависимости действительной части диэлектрической проницаемости слоя коллоида при переменном напряжении $U_m = 4 \text{ V}$: 1 — от постоянного напряжения на ячейке ($f = 6 \text{ Hz}$); 2, 3 — от частоты при $U_p = 25 \text{ V}$ и $U_p = 0$ соответственно. На вставке показана модель исследуемой системы: 1 — электроды; 2 — приэлектродный слой; 3, 4 — неоднородный и однородный объемный заряд, 5 — объем коллоида. Направление напряженностей соответствует режиму с отсутствием ЭГД-течений.

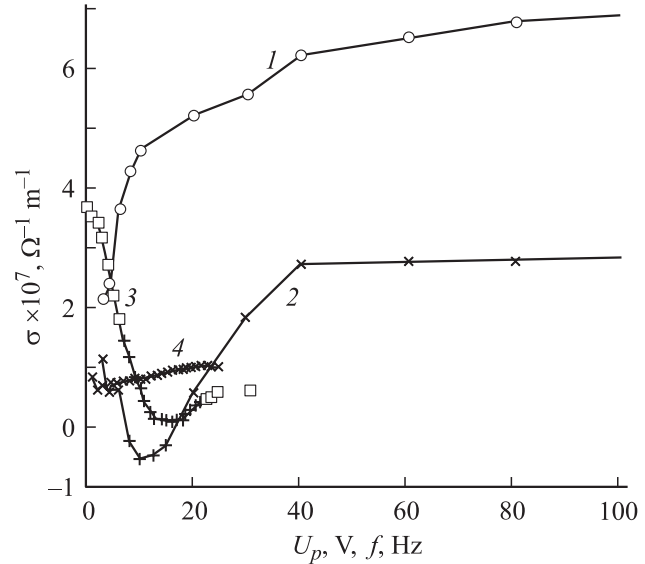


Рис. 10. Зависимости удельной проводимости слоя коллоида при $U_m = 4 \text{ V}$: 1 — от частоты при $U_p = 0 \text{ V}$, 2 — от частоты при $U_p = 25 \text{ V}$, 3 — от постоянного напряжения при $f = 6 \text{ Hz}$, 4 — на постоянном токе от U_p .

водимости σ :

$$\rho = \mathbf{j}\nabla\tau, \quad (3)$$

где ρ — объемная плотность заряда, \mathbf{j} — плотность тока, $\tau = \epsilon\epsilon_0/\sigma$ — время электрической релаксации среды. Объемный заряд, накапливаемый на границе раздела фаз, с учетом того что τ изменяется скачком, при известной плотности тока можно определить как [22]:

$$q = 2Sj_n(\tau_{\text{nbl}} - \tau_{\text{vol}}), \quad (4)$$

где j_n — нормальная составляющая плотности тока через границу раздела, $\tau_{\text{nbl,vol}} = \frac{\epsilon_{\text{nbl,vol}}\epsilon_0}{\sigma_{\text{nbl,vol}}}$ — постоянные времени, $\epsilon_{\text{nbl}}, \epsilon_{\text{vol}}$ — диэлектрические проницаемости приэлектродного слоя и объема коллоида соответственно. Заряд, рассчитанный по формуле (4), составляет $\sim 10^{-5} \text{ C}$. Определенный по току деполяризации заряд в ячейке $q = \int I_{\text{dep}}(t)dt$ имеет тот же порядок, что указывает на корректность представления слоя коллоида в виде трехслойной системы (вставка рис. 9). В измеренный заряд также входит часть, обусловливаемая ионами, обеспечивающими проводимость объема и приэлектродных слоев, которая составляет $\sim 10^{-7} \text{ C}$. Таким образом, измеренный заряд в основном локализован вблизи поверхности раздела фаз. Протяженность областей объемного заряда, в которых электронейтральность нарушается, можно оценить по радиусу дебаевского экранирования

$$k^{-1} = \sqrt{\epsilon_{\text{vol}}\epsilon_0 k_B T / 2e^2 n_{\text{vol}}}, \quad (5)$$

где $n_{\text{vol}} = \sigma_{\text{vol}} k_B T / 2e^2 D$ — концентрация ионов в объеме коллоида, k_B — постоянная Больцмана, T — температура, e — заряд электрона, D — коэффициент диффузии

ионов в объеме коллоида. В данных оценках принято допущение, что в объеме коллоида ионы одновалентные и число положительных равно числу отрицательных. Так, при проводимости $\sigma_{\text{vol}} \sim 10^{-6} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ и $D \approx 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ концентрация ионов $n_{\text{vol}} \sim 10^{20} \text{m}^{-3}$, что в свою очередь дает $k^{-1} \sim 10^{-7} \text{m}$.

В установившемся режиме и при медленном изменении напряжения на ячейке $\tau_{\text{nbl}} \ll t_{\text{inc}}$, где t_{inc} — время нарастания напряжения, заряд расположен на границе раздела со стороны объема коллоида. При быстром увеличении напряжения на ячейке $\tau_{\text{nbl}} \geq t_{\text{inc}}$ возможно существование объемного заряда в приэлектродном слое (область 4 на вставке рис. 9), так как при возрастании напряжения одновременно с процессом накопления заряда происходит увеличение толщины приэлектродного слоя за счет электрофореза частиц, приобретающих заряд в области объемного заряда. Увеличение скорости нарастания напряжения на ячейке приводит к большей скорости роста приэлектродного слоя, что при неизменном времени релаксации заряда в нем вызывает возрастание однородной части объемного заряда. Заряд, расположенный в приэлектродном слое, макроскопически однороден, так как распределен между плотноупакованными частицами. Увеличение толщины приэлектродного слоя вызывает наблюдаемое в экспериментах изменение спектра отраженного света от поверхности коллоида [18].

Рассмотрим случай, когда плотность тока через ячейку задается источником тока $j = \text{const}$. Напряжение на ячейке можно выразить

$$U = 2E_{\text{nbl}}d_{\text{nbl}} + E_{\text{vol}}d_{\text{vol}}, \quad (6)$$

где E_{nbl} — напряженность поля в приэлектродном слое, d_{nbl} — толщина приэлектродного слоя, E_{vol} — напряженность поля в объеме коллоида, d_{vol} — толщина объема коллоида. Напряженность поля можно определить из условия равенства плотности полного тока через слой коллоида [23]:

$$\sigma_{\text{nbl}}E_{\text{nbl}} + \varepsilon_{\text{nbl}}\varepsilon_0 \frac{dE_{\text{nbl}}}{dt} = \sigma_{\text{vol}}E_{\text{vol}} + \varepsilon_{\text{vol}}\varepsilon_0 \frac{dE_{\text{vol}}}{dt} = j. \quad (7)$$

Решением уравнения (7) является выражение (8):

$$E_{\text{nbl,vol}}(t) = \frac{j}{\sigma_{\text{nbl,vol}}} - \frac{j - j_{\text{st}}}{\sigma_{\text{nbl,vol}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{nbl,vol}}}\right), \quad (8)$$

где j_{st} — плотность тока в начальный момент времени ($t = 0$). Возрастание напряжения на ячейке описывается уравнениями (6) и (8). При этом за время t_1 происходит накопление заряда, достаточного для возникновения ЭГД-течений, что приводит к появлению конвективной составляющей ρv в выражении (7), тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{nbl}}E_{\text{nbl}} + \varepsilon_{\text{nbl}}\varepsilon_0 \frac{dE_{\text{nbl}}}{dt} + \rho v = \sigma_{\text{vol}}E_{\text{vol}} \\ + \varepsilon_{\text{vol}}\varepsilon_0 \frac{dE_{\text{vol}}}{dt} + \rho v = j, \end{aligned} \quad (9)$$

v — скорость жидкости. Конвективная составляющая является функцией пространства и времени, вид которой

на нашем уровне описания неизвестен. Для качественного описания влияния ЭГД-течений на напряжение на ячейке приняли $\rho v = \text{const}$. При этом решение (9) будет иметь вид

$$E_{\text{nbl,vol}}(t) = \frac{j - \rho v}{\sigma_{\text{nbl,vol}}} - \frac{j - j_{\text{st}} - \rho v}{\sigma_{\text{nbl,vol}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{nbl,vol}}}\right). \quad (10)$$

Из (10) и (6) видно, что конвективная составляющая приводит к уменьшению напряжения на ячейке. С помощью (6), (8) и (10) была получена временная зависимость напряжения на ячейке (вставка на рис. 1). Время накопления заряда, используемое в расчетах, определено экспериментально как t_1 .

При малом постоянном токе, когда напряжение на ячейке $U_p < 6 \text{V}$ и слой коллоида однороден, накапливаемый заряд, вероятно, однороден в плоскости, параллельной электродам. При увеличении тока ($U_p = 6-9 \text{V}$) формируется ячеистая структура, не наблюдаемая в отраженном свете, так как она локализована в объеме слоя и является следствием возникновения неоднородности объемного заряда, причем, вероятно, при этом существуют две части заряда — однородная и неоднородная. Дальнейшее увеличение плотности постоянного тока ($U_p = 9-27 \text{V}$) вызывает возрастание объемного заряда и возникновение ЭГД-течений, обусловленных неоднородной частью заряда, приводящей к непараллельности векторов $\nabla\rho$ и E_{vol} [22]. Прекращение течений обусловлено уменьшением объемного заряда и его неоднородности вследствие переноса в объем коллоида. Кроме того, течения уменьшают толщину приэлектродного слоя, содержащую однородную часть заряда. Периодически возникающие ЭГД-течения приводят к формированию лабиринтной структуры, которая наблюдается в проходящем и отраженном свете вследствие различного уменьшения толщины приэлектродного слоя течениями в структурных образованиях и окружающем их объеме коллоида. Увеличение плотности тока в режиме периодических ЭГД-течений приводит к большему объемному заряду, переносимому течениями, вследствие чего происходит возрастание амплитуды автоколебаний напряжения. При большей плотности тока количество образующегося объемного заряда становится достаточным для поддержания стационарных ЭГД-течений, приводящих к возникновению движущейся структуры, а также появлению спиральных волн, наблюдаемых в отраженном свете. Стационарные ЭГД-течения прекращаются при меньшей плотности тока, чем возникают, вследствие того что они уменьшают толщину приэлектродного слоя, содержащую однородный объемный заряд, после чего он становится неоднородным и участвует в ЭГД-течениях.

При воздействии на ячейку постоянного напряжения от источника ЭДС автоколебания тока через ячейку не наблюдаются. Это связано с тем, что при малых напряжениях (до возникновения ЭГД-течений) ток через ячейку уменьшается с течением времени вследствие накопления заряда. При больших напряжениях в ячейке

возникают ЭГД-течения, которые уносят накопленный заряд, вследствие чего возрастает ток через нее, увеличивается скорость накопления заряда и прекращения ЭГД-течений не происходит.

При совместном воздействии от источника ЭДС постоянного и переменного напряжения с $U_m < 8 \text{ В}$ динамические образования аналогичны тем, которые наблюдаются при воздействии от источника тока. Это связано с тем, что диапазон U_m и f переменного напряжения совпадает с автоколебаниями напряжения на ячейке. При больших U_m и той же частоте наблюдается режим с периодически возникающими ЭГД-течениями, приводящими к формированию „больших“ лабиринтов. При этом не происходит формирования стационарных ЭГД-течений, вследствие того что в течение каждого периода напряжение на ячейке понижается ниже порога существования ЭГД-течений даже при максимальном значении U_p .

Наблюдаемая в экспериментах нелинейность переменного тока обусловлена периодически возникающими ЭГД-течениями, так как они вызывают увеличение плотности тока через слой коллоида вследствие появления конвективной составляющей ρv . При возникновении стационарных ЭГД-течений одновременно с процессом накопления заряда происходит его перенос, возле границы раздела появляется объемный заряд обоих знаков — переносимый течениями и накаливаемый за счет миграции ионов в объеме коллоида. Это приводит к тому, что общий заряд на границе раздела имеет знак, противоположный накапливаемому в процессе миграционной поляризации, при этом нормальная составляющая напряженности внутреннего электрического поля, создаваемая объемными зарядами $E_{\text{ch.vol}}$, становится сонаправленной с приложенным полем.

Проведенные исследования позволили обнаружить автоколебания напряжения на ячейке, заполненной слабопроводящей жидкостью с диспергированными в ней наночастицами магнетита, появление которых обусловлено периодически возникающими ЭГД-течениями. Возникновение течений обусловлено формированием объемного заряда на границе раздела сред „приэлектродный слой—объем коллоида“, обладающих различной проводимостью. Показано, что в слое коллоида возможно существование двух режимов ЭГД-течений — периодически возникающих и стационарных. Выявлено, что неоднородный объемный заряд и периодически возникающие ЭГД-течения приводят к фазовому разделению слоя коллоида, представляющего собой формирование различного вида структур: микрокапельной, ячеистой, лабиринтной, а также к нелинейному режиму, выражающемуся в несинусоидальности переменного тока, протекающего через слой коллоида. Возникновение стационарных ЭГД-течений приводит к образованию движущейся структуры, спиральных волн и появлению линейного режима с отрицательной диэлектрической проницаемостью слоя коллоида в частотном диапазоне 3–8 Hz. Обнаруженная отрицательная диэлектрическая проницаемость слоя коллоида, вероятно, вызвана переносом объемных зарядов стационарными ЭГД-течениями.

Список литературы

- [1] Trau M., Sankaran S., Saville D.A., Aksay I.A. // Nature. 1995. Vol. 374. N 6521. P. 437.
- [2] Trau M., Saville D.A., Aksay I.A. // Langmuir. 1997. Vol. 13. P. 6375.
- [3] Aranson I.S., Blair D., Kalatsky V.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 3306.
- [4] Aranson I.S., Meerson B., Sasorov P.V., Vinokur V.M. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 88. P. 204 301.
- [5] Aranson I.S., Tsimring L.S. // Rev. Mod. Phys. 2006. Vol. 78. P. 641.
- [6] Sapozhnikov M.V., Tolmachev Y.V., Aranson I.S., Kwok W.K. // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90. P. 14 301.
- [7] Aranson I.S., Sapozhnikov M.V. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. P. 234 301.
- [8] Sapozhnikov M.V., Aranson I.S., Kwok W.K., Tolmachev Y.V. // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. P. 084 502.
- [9] Ramos A., Morgan H., Green N.G., Castellanos A. // Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol. 31. P. 2338.
- [10] Green N.G., Morgan H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. Vol. 31. P. L25.
- [11] Castellanos A., Ramos A., Gonz'alez A. et al. // Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 2584.
- [12] Yeh S.-R., Seul M., Shraiman B.I. // Nature. 1997. Vol. 386. N 6620. P. 57.
- [13] Ristenpart W.D., Aksay I.A., Saville D.A. // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 69. P. 021 405.
- [14] Ivanov A.O. // Colloid J. 1997. Vol. 59. N 4. P. 446.
- [15] Dikanskii Yu.I., Nechaeva O.A. // Colloid J. 2003. Vol. 65. N 3. P. 305.
- [16] Kozhevnikov V.M., Chuenkova I.Yu., Danilov M.I. et al. // Magnetohydrodynamics. 2005. Vol. 41. N 1. P. 53.
- [17] Кожевников В.М., Чуенкова И.Ю., Данилов М.И., Ястребов С.С. // ЖТФ. 2006. Т. 79. Вып. 7. С. 129.
- [18] Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Дискаева Е.Н. // Вестн. Ставропольского гос. ун-та, 2005. № 43. С. 85.
- [19] Гордеев Г.М., Матусевич Н.П., Ржелская С.П., Феррман В.Е. // Физические свойства магнитных жидкостей. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. С. 98.
- [20] Диканский Ю.И. // Магнитная гидродинамика. 1984. № 1. С. 123.
- [21] Духин С.С., Шилов В.Н. // Диэлектрические явления и двойной слой в полиэлектролитах и дисперсных системах. Киев: Наук. думка, 1972. Гл. 1. С. 20.
- [22] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь А.И. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. Ч. 1. С. 20–169.
- [23] Сканава Г.И. Физика диэлектриков (Область слабых полей). М.-Л.: РИТТЛ, 1949. С. 12.