

Ф И З И К А

УДК 538.97:539.216:539.23

DOI: 10.31429/vestnik-17-4-57-67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА В ТОНКОМ СЛОЕ МАГНИТНОГО КОЛЛОИДА

Чеканов В. С., Коваленко А. В., Дискаева Е. Н., Кириллова Е. В.

MATHEMATICAL MODELING OF AUTOWAVE PROCESS IN A THIN LAYER OF MAGNETIC COLLOID

V. S. Chekanov^{1,2}, A. V. Kovalenko³, E. N. Diskaeva², E. V. Kirillova⁴¹ North Caucasian Federal University, Stavropol, 355000, Russia² MIREA – Russian Technological University branch in Stavropol, Stavropol, 355000, Russia³ Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia⁴ RheinMain University of Applied Sciences in Wiesbaden, Wiesbaden, 65197, Germany
e-mail: savanna-05@mail.ru

Abstract. At present, quite complex models of autowave processes have been developed that are suitable for their quantitative description. They are boundary value problems for systems of nonlinear partial differential equations, however, their solution and interpretation of the results are rather difficult. Therefore, it is relevant to construct simplified models of autowaves, which make it possible to study and analyze their basic properties.

The scientific novelty of the work is the developed new adequate mathematical 1D models of the autowave process. This process has been experimentally recorded in a thin layer of a magnetic colloid (magnetic fluid). In addition, the scientific novelty of this study lies in the fact that the authors obtained solutions in the environment of computer modeling of physical processes COMSOL Multiphysics 5.5. The predictive value of this model is the determination of the critical value of the potential jump, the determination of the time to establish the oscillation period and other characteristics of the process.

Keywords: autowaves, magnetic fluid, computer modeling, mathematical modeling, nonlinear processes, 1D model of an autowave process, particle recharge, COMSOL

Введение

Магнитная жидкость (МЖ) — это коллоидный раствор магнитных наночастиц в керосине, минеральных маслах, толуоле и других жидких диэлектриках. Тонкие приповерхностные слои с повышенной концентрацией дисперсных частиц (и микрокапельных агрегатов), которые образуются в магнитной жидкости в электрическом поле, являются причиной разнообразных приповерхностных эффектов (электроинтерференции, автоволнового процесса, неустойчивости Тонкса–Френкеля) [1–4], наблюдаемых экспериментально. Толщиной этих слоев можно управ-

лять электрическим полем. Кроме того, с образованием слоев изменяются характеристики ячейки с магнитной жидкостью: поверхностное натяжение, поляризационная емкость, сопротивление. Таким образом, ячейка с магнитной жидкостью представляет собой среду с электроуправляемыми свойствами. Такие среды в настоящее время находят широкое применение при решении многих технических задач в дефектоскопии, приборостроении, медицине и т.д., поэтому их исследование актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Приповерхностный слой магнитной жидкости имеет сложную структуру и исследо-

Чеканов Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Северо-Кавказского федерального университета, доцент кафедры информационных технологий филиала МИРЭА – Российского технологического университета в г. Ставрополь; e-mail: oranjejam@mail.ru.

Коваленко Анна Владимировна, канд. экон. наук, доцент, заведующая кафедрой интеллектуальных информационных систем Кубанского государственного университета; e-mail: savanna-05@mail.ru.

Дискаева Елена Николаевна, доцент кафедры промышленных технологий филиала МИРЭА – Российского технологического университета в г. Ставрополь; e-mail: diskavapes@mail.ru.

Кириллова Евгения Вадимовна, канд. физ.-мат. наук, профессор Университета прикладных наук Рейн Майн в г. Висбаден; e-mail: kirillova@web.de.

Исследование выполнено в рамках работы Международной лаборатории компьютерного и математического моделирования нелинейных процессов «Computer and mathematical modeling of nonlinear processes».

вать его свойства экспериментально часто не представляется возможным вообще или экспериментальные исследования трудоёмки и ресурсоёмки. Между тем, существует ряд задач, в том числе и технических, которые можно решить при помощи математического и компьютерного моделирования наблюдаемых процессов, одним из которых является автоволновой (АВП). Экспериментальное описание наблюдения автоволнового процесса подробно изложено в работе [3].

В настоящее время разработаны достаточно сложные модели автоволновых процессов, пригодные для их точного количественного описания. Они представляют собой краевые задачи систем дифференциальных уравнений в частных производных. И их решение и интерпретация результатов затруднительно [5–9]. Поэтому актуальным является построение упрощенных моделей автоволн, позволяющих достаточно просто и быстро исследовать их основные свойства. Можно предположить, что перезарядка частиц магнитной жидкости в областях пространственного заряда определяет возникновение и развитие автоволнового процесса в ячейке с магнитной жидкостью. При этом возникает вопрос о том, где распространяются автоволны: в узких областях локализации объемного заряда или во всем объеме ячейки.

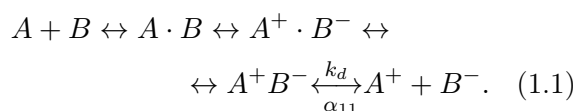
Научная новизна работы заключается в разработке простой математической модели автоволнового процесса, адекватной натурному эксперименту и в получении решения в среде COMSOL Multiphysics 5.5.

1. Электропроводность магнитной жидкости

В настоящее время сложилось устойчивое представление о механизмах электропроводности жидких диэлектриков [5–8], которое изложено в наиболее развернутом виде в обзорных статьях А.И. Жакина [7–9]. Эта теория получила убедительное подтверждение не только в объяснении электрогидродинамических (ЭГД) эффектов [9], но и процессов в приэлектродном слое таких сложных объектов, как МЖ.

Поэтому при построении математической модели будем основываться на теории возникновения автоволн в магнитной жидкости [7–9], основные положения которой заключаются в следующем.

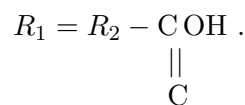
В углеводородах и их соединениях электрохимическая активность определяется группами стирьбенов $-\text{CH}=\text{CH}-$, толанов $-\text{CH}\equiv\text{CH}-$ и др. Активация усиливается при наличии электроноакцепторных групп, например, в ароматических углеводородах типа $R-B$, где R — бензольное кольцо, B — атом галогена (йод, бром и др.), или нитрогруппа в нитробензоле. Так как молекулы B обладают высокой электроотрицательностью (способностью присоединять электроны), то объемную ионизацию жидкого диэлектрика можно схематически представить в виде



Здесь A , B — молекулы несущей жидкости (жидкого диэлектрика) и электроноакцептора, $A \cdot B$ — молекулярный комплекс, $A^+ \cdot B^-$ — контактная ионная пара, $A^+ B^-$ — рыхлая ионная пара, A^+ , B^- — свободные ионы, обуславливающие проводимость жидкого диэлектрика, k_d — константа скорости диссоциации ионных пар $A^+ B^-$, α_{11} — коэффициент рекомбинации моноионов A^+ , B^- . Такой механизм электропроводности в инженерных приложениях часто называют примесным, а в научной литературе — диссоциационным.

Второй тип электропроводности обусловлен контактными процессами на поверхностях электродов. Эти процессы называют инжекционными [4–9]. В сверхсильных полях порядка 200 МВ/см развивается холодная инжекция электронов с поверхности катода, а в средних высоковольтных полях порядка 20 КВ/см — электрохимическая инжекция, которая обуславливает ЭГД эффекты как в жидких диэлектриках, так и в МЖ.

Разберем подробнее процесс электрохимической инжекции на примере взаимодействия молекулы олеиновой кислоты с катодом. В силу высокой химической активности двойной связи вида $R_1 = R_2$ (R_1 , R_2 — углеводородные радикалы) молекулу ОК можно записать в виде



Причем головка олеиновой кислоты является электроотрицательной группой, способной присоединять электрон, а в электрохимическом процессе наиболее вероятно рвется двой-

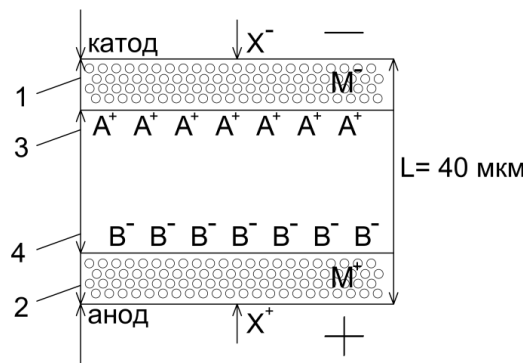
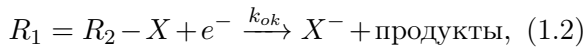


Рис. 1. Схема ячейки с магнитной жидкостью, где 1, 2 — плотные приэлектродные слои магнитных частиц, которые образуются в электрическом поле, 3, 4 — области пространственного заряда, A^+ и B^- — примесные ионы, M^+ и M^- — заряженные частицы магнитной жидкости, X^+ , X^- — инжектируемые ионы

ная связь, поэтому электрохимическую инжекцию зарядов на катоде можно схематически представить в виде



где X^- — электроотрицательная группа с захваченным с поверхности металла электрона e^- в ходе электрохимического акта, k_{ok} — константа скорости электрохимической реакции (1.2).

Примесные A^+ , B^- и инжектируемые X^- ионы рекомбинируют с образованием ионных пар A^+B^- , A^+X^- , что приводит к довольно сложной структуре распределения ионов вблизи электродов.

Таким образом, в прохождении тока в ячейке с магнитной жидкостью будут участвовать четыре типа ионов: A^+ , B^- и инжектируемые на электродах X^+ , X^- (рис. 1).

Рассмотрим, как образуются инжектируемые ионы вблизи анода. Так как экспериментально известно, что автоволновой процесс практически визуально не изменяется при смене полярности электродов, то можно предположить, что у анода образуются положительные ионы, например, за счет разрядки одного из ионов ионной пары A^+B^- .

Кроме примесных и инжекционных ионов в магнитной жидкости заряд переносят и магнитные частицы. Известно, что в отсутствие электрического поля магнитная частица не заряжена. При включении электрического поля в приэлектродных областях образуются области пространственного заряда, в которых магнитные частицы заряжаются, а процесс переноса заряда осуществляется также и за счет электрофореза частиц магнетита.

Необходимо отметить, что это справедливо при малых концентрациях дисперсной фазы (до 5 %), при больших концентрациях миграция заряженных частиц магнетита затруднена. Таким образом, в качестве носителей заряда в модели добавляются заряженные частицы магнетита M^+ и M^- (рис. 1).

2. Физическая модель автоволнового процесса в магнитной жидкости

При построении физической модели автоволнового процесса в магнитной жидкости будем использовать следующие предположения:

1. В приэлектродных областях ячейки с магнитной жидкостью в электрическом поле образуются области объемного пространственного заряда.

2. Частицы магнитной жидкости изначально не заряжены, их движение обусловлено броуновской диффузией, а заряжаются они, только попав в объемный заряд в приэлектродном пространстве.

3. В электрическом поле в ячейке с магнитной жидкостью образуются плотные приэлектродные слои, состоящие из частиц дисперсной фазы магнитной жидкости.

Обозначим толщину образовавшегося плотного слоя δ , ее величина была измерена в работах [13, 14], она составляет 100–200 нм в зависимости от напряжения на электродах. Толщина слоя будет увеличиваться до тех пор, пока энергия притяжения (U_{im}) не уравнивается тепловой энергией

$$U_{im}(\delta) = k_B T. \quad (2.1)$$

При контакте магнитных частиц и свободных молекул олеиновой кислоты с поверхностью электрода происходит электрохимическое взаимодействие молекулы олеиновой кислоты, например, на катоде по схеме (1.2). В результате отрицательные ионы инжектируются с катода в плотный слой частиц МЖ.

Ион X^- в плотном поверхностном слое имеет почти нулевую подвижность, что приводит к зарядке плотного слоя. Суммарный заряд Q , отнесенный к единице площади, индуцирует кулоновскую энергию отталкивания слоя (U_q), равную

$$U_q = Q\delta, \quad (2.2)$$

$$Q\delta > \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} U_{im}(z) dz. \quad (2.3)$$

Когда U_q превысит среднюю энергию притяжения U_{im} (2.3), происходит отрыв плотного слоя от электрода и электрохимический процесс (1.2) прекращается.

Таким образом, при выполнении условия $U_q > U_{im}$ в магнитной жидкости появляется волна. После разрушения слоя магнитных частиц, они опять попадают в область объемного пространственного заряда и процесс повторяется. Это обуславливает периодический процесс протекания тока в магнитной жидкости при постоянном напряжении на электродах.

3. Одномерная математическая модель автоволнового процесса

Общая математическая модель описанного выше процесса достаточно сложна, поскольку должна содержать уравнения для шести заряженных частиц и химических реакций диссоциации — рекомбинации в областях пространственного заряда, возникающего у электродов. В связи с этим имеет смысл составить упрощенную математическую модель автоволнового процесса (АВП), которая позволит определить зависимость характеристик автоволн от исходных данных задачи, например, от скачка потенциала, геометрических размеров и т.д. Ниже предлагается такая модель, в которой учитывается перенос только положительно и отрицательно заряженных магнитных частиц с концентрациями и потоками C_1 , j_1 и C_2 , j_2 и скачком потенциала ϕ , считается, что отсутствуют химические реакции, а влияние примесных и инжектируемых

ионов учитывается косвенно. Основная идея построения модели заключается в исследовании вопроса, возникает ли волновое движение из-за перезарядки частиц магнитной жидкости, возле электродов или в областях локализации объемного заряда.

Обозначим $x = 0$ и $x = H$ условные точки в областях пространственного заряда, в которых происходит процесс зарядки частиц магнитной жидкости (в точке $x = 0$ первоначально может отсутствовать пространственный заряд), в частном случае это могут быть анод и катод. Будем считать, что есть первоначальное распределение нейтральных частиц магнитной жидкости с известной их концентрацией (начальное условие $C_1(0, x) = C_{10}(x)$ и $C_2(0, x) = C_{20}(x)$, определяемое диффузией). В электрическом поле в начальный момент времени $t = 0$, происходит зарядка частиц магнитной жидкости, причем в окрестности $x = H$ частицы магнитной жидкости заряжаются отрицательно, а в окрестности $x = 0$ — положительно. В итоге в электрическом поле отрицательно заряженные магнитные частицы начинают двигаться в сторону анода, а положительно заряженные — в сторону катода, у электродов образуются плотные слои [10].

Будем использовать одномерную нелинейную математическую модель, рассматривая классическую систему дифференциальных уравнений материального баланса, Нернста–Планка и Пуассона [15], не используя никаких упрощений и подгоночных параметров, которую мы будем называть 1D моделью АВП в магнитной жидкости (МЖ):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial j_i}{\partial x}, \quad i = 1, 2; \quad (3.1)$$

$$j_i = -\frac{F}{RT_0} z_i D_i C_i \frac{d\phi}{dx} - D_i \frac{dC_i}{dx}, \quad (3.2)$$

$$i = 1, 2;$$

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{F}{\varepsilon_r} (z_1 C_1 + z_2 C_2), \quad (3.3)$$

где C_i , j_i — концентрации и потоки заряженных частиц магнитной жидкости, z_i — зарядовые числа, ϕ — потенциал, ε_r — диэлектрическая проницаемость МЖ, F — постоянная Фарадея, D_i — коэффициенты диффузии заряженных частиц МЖ.

Поскольку в представленной модели рассматривается два типа заряженных магнитных частиц, то процесс перезарядки и соответствующие колебания происходят от одного до другого пространственного заряда.

Предположим, что процесс перезарядки волны заряженных частиц магнитной жидкости в точках $x = 0$ и $x = H$ происходит постепенно по мере подхода заряженных частиц к ним, например, отрицательно заряженные частицы, которые пришли к точке $x = 0$, получают положительный заряд и становятся положительно заряженными, а положительно заряженные частицы магнитной жидкости (если они есть) доходят до точки $x = H$ и заряжаются отрицательно (рис. 2б). Отметим, что этот процесс перезарядки описывается краевыми условиями при $x = 0$ (3.4) и (3.5) при $x = H$ с коэффициентами диффузии магнитной жидкости $9,34 \cdot 10^{-9}$ [м²/с], скачок потенциала, $\Delta\phi$, задается в виде (3.6)–(3.7)

$$\begin{aligned} \left(-\frac{F}{RT_0}D_1C_2\frac{d\phi}{dx} - D_1\frac{dC_2}{dx}\right)\Big|_{x=0} &= j_{1A}, \\ \left(\frac{F}{RT_0}D_2C_1\frac{d\phi}{dx} - D_2\frac{dC_1}{dx}\right)\Big|_{x=0} &= j_{2A}, \quad (3.4) \\ -\left(-\frac{F}{RT_0}D_1C_2\frac{d\phi}{dx} - D_1\frac{dC_2}{dx}\right)\Big|_{x=H} &= j_{1K}, \\ \left(-\frac{F}{RT_0}D_1C_1\frac{d\phi}{dx} - D_1\frac{dC_1}{dx}\right)\Big|_{x=H} &= j_{2K}, \quad (3.5) \\ \phi(t,0) &= \Delta\phi, \quad (3.6) \\ \phi(t,H) &= 0. \quad (3.7) \end{aligned}$$

Начальные условия ($t = 0$) определяют исходное состояние системы, а ее дальнейшая эволюция определяется уравнениями и краевыми условиями. Экспериментально известно, что тонкие приповерхностные слои образуются у обоих электродов, поэтому будем считать, что в начальный момент времени частицы магнитной жидкости сосредоточены у каждого из электродов (3.8)–(3.9)

$$C_1(0,x) = C_{10}(x), \quad (3.8)$$

$$C_2(0,x) = C_{20}(x). \quad (3.9)$$

Как будет показано ниже, такое начальное состояние приводит к появлению двух концентрационных волн, движущих навстречу друг другу. Причем эти волны взаимодействуют.

Для потенциала начальное условие можно взять нулевой функцией (3.10) или линейной функцией (3.11)

$$\phi(0,x) = \phi_0(x) = 0, \quad (3.10)$$

$$\phi(0,x) = \phi_0(x) = \frac{H-x}{H}\Delta\phi. \quad (3.11)$$

Результаты при этом практически не отличаются спустя доли секунд.

4. Результаты численного исследования

Параметры задачи: $H = 0,0005m$, расчет проведен для $t \in [0,5]$ секунд с шагом запоминания 0,01 с. Параметры сетки: $n = 10\,000$ элементов.

Ниже в расчетах принято некоторое начальное распределение концентрации магнитных частиц, соответствующее экспериментальным данным:

$$\begin{aligned} C_1(0,x) = C_{10}(x) &= \\ &= 0,0005 \cdot e^{-x/(0,01 \cdot H)} \text{ моль/м}^3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2(0,x) = C_{20}(x) &= \\ &= 0,0005 \cdot e^{-(H-x)/(0,01 \cdot H)} \text{ моль/м}^3, \end{aligned}$$

Как видно из этих формул, первоначально магнитные частицы распределены достаточно плотно у электродов.

Скачок потенциала $\Delta\phi$ равен 4В.

4.1. Результаты моделирования для одиночной волны

На рис. 2а представлено состояние глубинных волн концентрации $C_1(0,x)$ в моменты времени: $t = 0,02, 0,6, 0,1, 0,14$ с. Предполагается, что первоначально нейтральные частицы магнитной жидкости распределены достаточно плотно у $x = 0$. В начальный момент времени $t = 0$ с. они полностью положительно заряжаются. Тогда положительно заряженные частицы магнитной жидкости начинают двигаться к $x = H$ (рис. 2б). Глубинные волны системы порождают поверхностные.

На рис. 2в и 2г представлены волны в тонком приповерхностном слое — поверхностные волны, которые наблюдаются в экспериментах. Поскольку процесс устанавливается достаточно быстро, а время влияния начальных условий мало (< 1 с), то можно считать, что колебания концентрации в тонком приповерхностном слое (поверхностные волны) обеспечиваются самой средой.

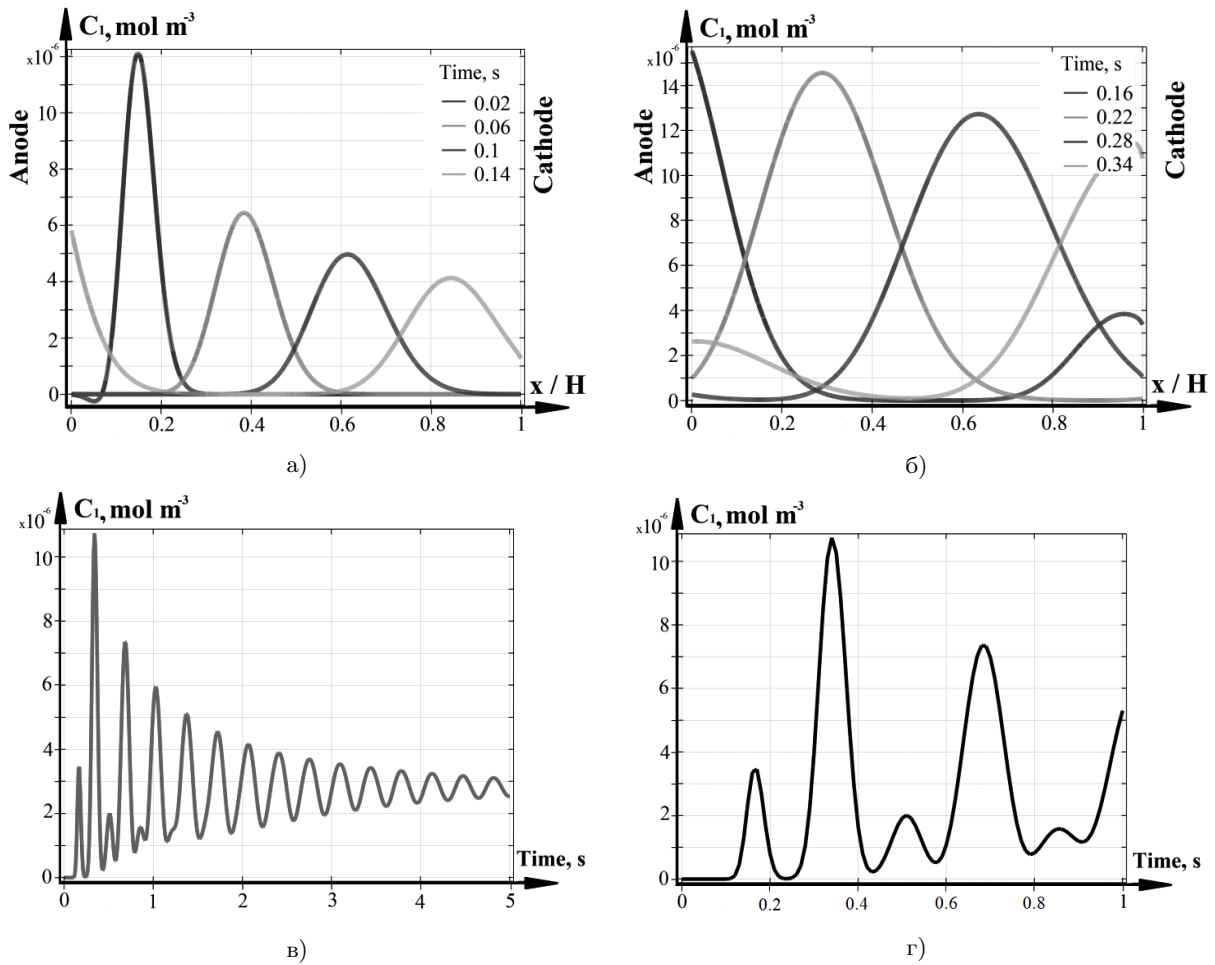


Рис. 2. Графики колебаний концентрации $C_1(t, x)$ внутри системы по x в различные моменты времени: а) $t = 0,02, 0,06, 0,1, 0,14$ с, б) $t = 0,16, 0,22, 0,28, 0,34$ с. Графики колебаний концентрации в тонком приповерхностном слое (поверхностные волны) $C_1(t, H)$ по t на катоде: в) — общий вид, г) — в начале изменений

4.2. Результаты численного анализа для двух волн

На рис. 2а представлено начальное состояние концентраций $C_1(0, x)$ и $C_2(0, x)$. Предполагается, что первоначально нейтральные частицы магнитной жидкости распределены плотно в области $x = 0$ и $x = H$. В начальный момент времени $t < 0,1$ с они все заряжаются. У $x = 0$ — положительно, у $x = H$ — отрицательно. Тогда положительно заряженные частицы магнитной жидкости начинают двигаться к $x = H$, а отрицательно заряженные магнитные частицы — к $x = 0$ (рис. 2б).

Две концентрационные волны движутся навстречу друг другу (рис. 3а–3г). Первоначально разные по амплитуде, затем они постепенно становятся равными по амплитуде (рис. 5б). Волна светло серого цвета (C_2) —

это отрицательно заряженные магнитные частицы, которые идут к положительно заряженному электроду (аноду), а волна темно серого цвета (C_1) — это положительно заряженные магнитные частицы, которые идут к отрицательно заряженному электроду (катоде). После того, как волны достигают соответствующих электродов — частицы перезаряжаются и приобретают знаки соответствующих электродов. Далее цикл повторяется.

Во время 0,18 (рис. 4б) образовался положительный фронт магнитных частиц слева. Один цикл полностью завершился (рис. 4в), начался следующий цикл (рис. 4г) и т.д. Почти все положительно заряженные магнитные частицы ушли от анода в момент времени $t = 0,3$ с (рис. 4д) и отрицательно заряженные частицы в этот момент времени все преобразо-

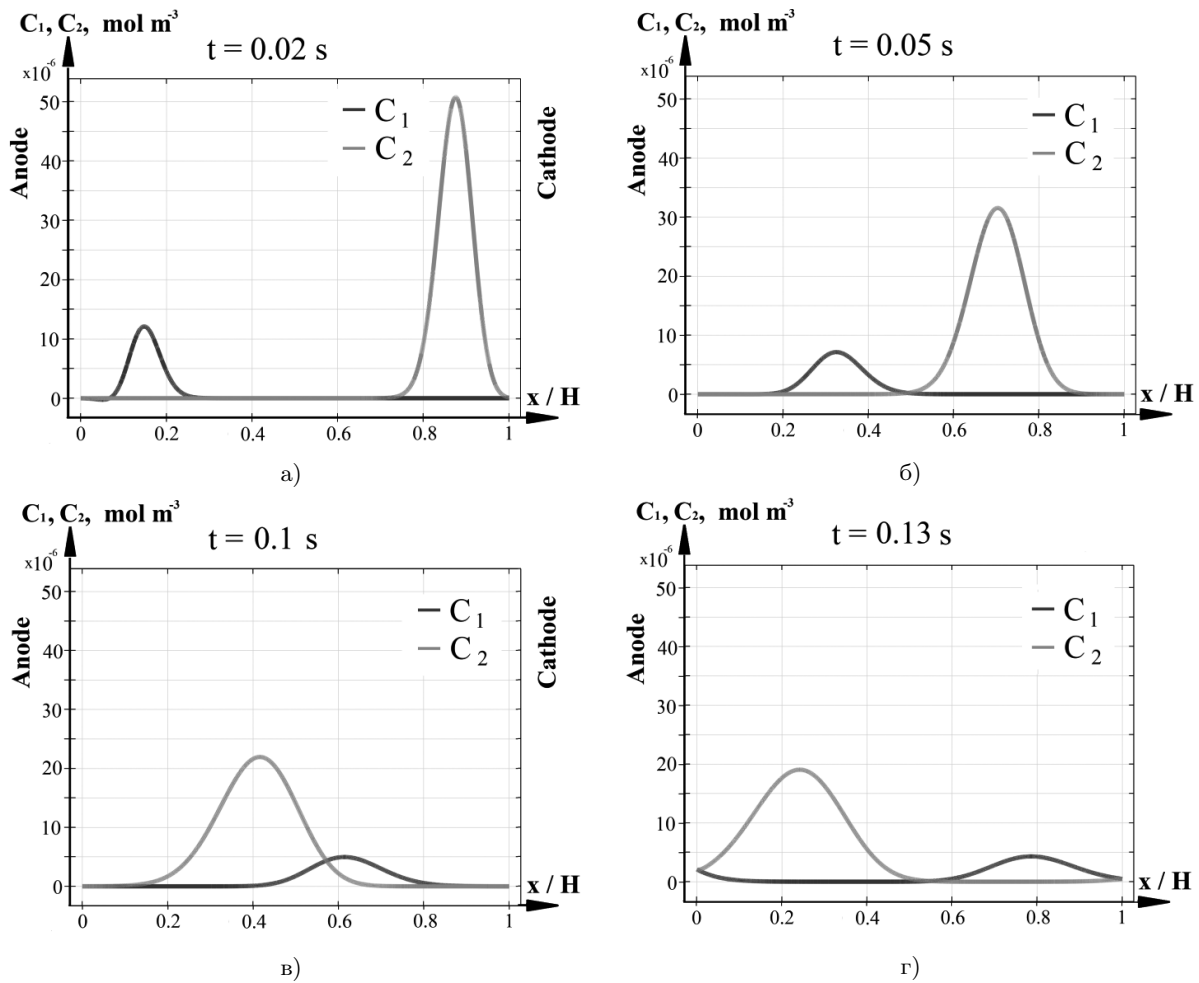


Рис. 3. Графики концентраций C_1 и C_2 в моменты времени:
 а) $t = 0,02$ с, б) $t = 0,05$ с, в) $t = 0,1$ с, г) $t = 0,13$ с

вались. В момент времени $t = 0,35$ с (рис. 4е) нет ни положительных, ни отрицательных частиц, виден четкий ноль у мембран слева и волна положительно заряженных магнитных частиц пошла вправо, а волна отрицательно заряженных частиц идет ей на встречу.

Во время $t = 0,4$ (рис. 5а) справа — почти ноль, затем положительно заряженные магнитные частицы начинают подходить к катоду. У анода амплитуда волны максимально выросла (рис. 5б) и дальше начнет падать (рис. 5в).

Таким образом, частицы двигаются от одного электрода к другому и обратно (рис. 5г). Перезарядка происходит на электродах. Это явление называется межэлектродная осцилляция [11, 12].

Период колебания в численном эксперименте варьируется от 0,05 до 0,12 с, что согласуется с экспериментом.

Рис. 6а иллюстрирует колебания концентрации в тонком приповерхностном слое (поверхностные волны) у катода, порожденные внутренними волнами системы рис. 3–5. Экспериментально измеренный период волны (колебаний) равен $\sim 0,3$ с (рис. 7), в вычисленном эксперименте составляет 0,29 с.

Заключение

Научная новизна данного исследования состоит в построении математической и компьютерной 1D-модели автоволнового процесса, которое полностью отвечает натурному эксперименту. При повышении напряженности поля до определенного порогового значения возникает осцилляция частиц дисперсной фазы между электродом и границей объемного заряда. Это явление авторами связывается с зарядкой и перезарядкой частиц. В осно-

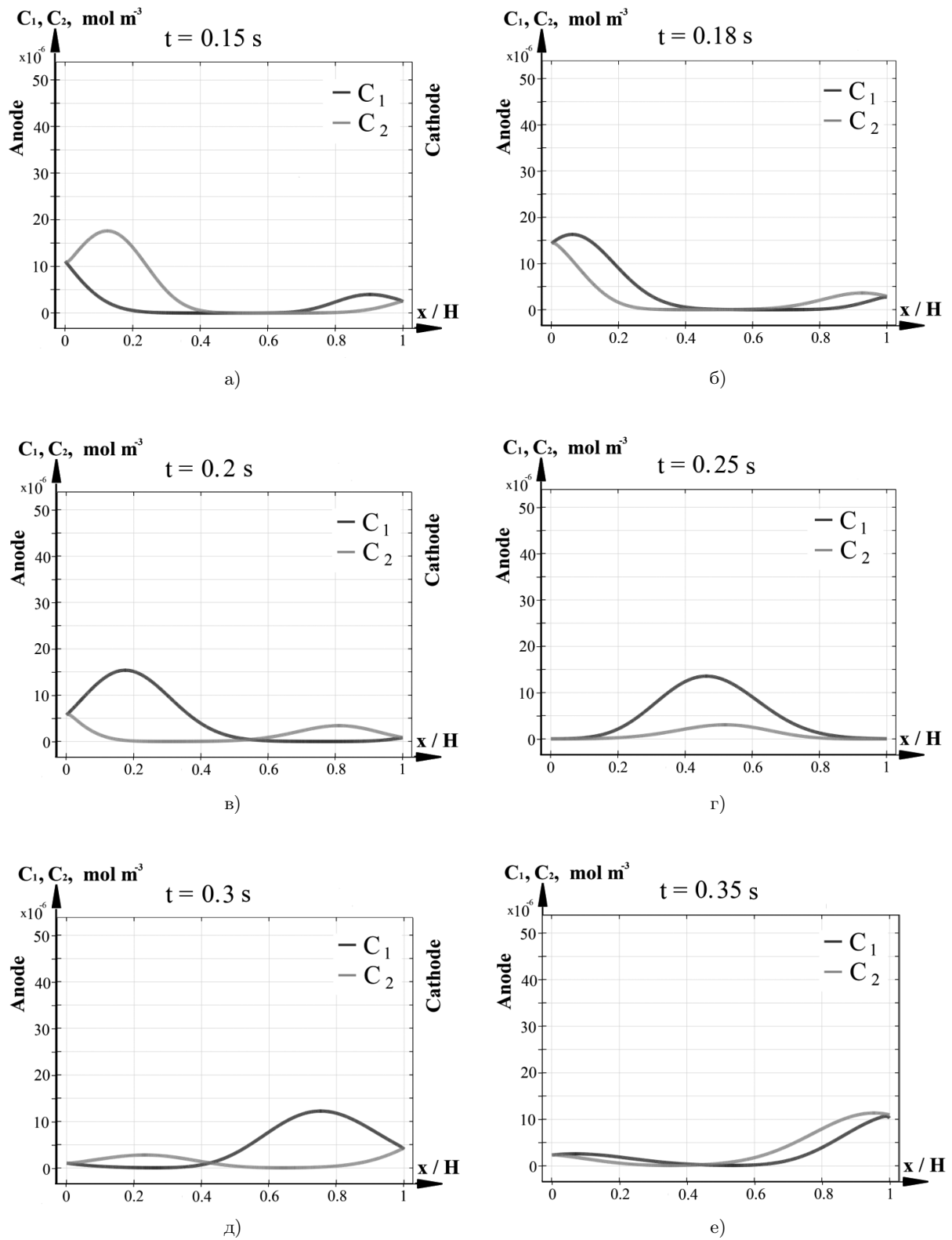


Рис. 4. Состояние концентраций C_1 и C_2 в момент времени:
 а) $t = 0,15$ с, б) $t = 0,18$ с, в) $t = 0,2$ с, г) $t = 0,25$ с, д) $t = 0,3$ с, е) $t = 0,35$ с

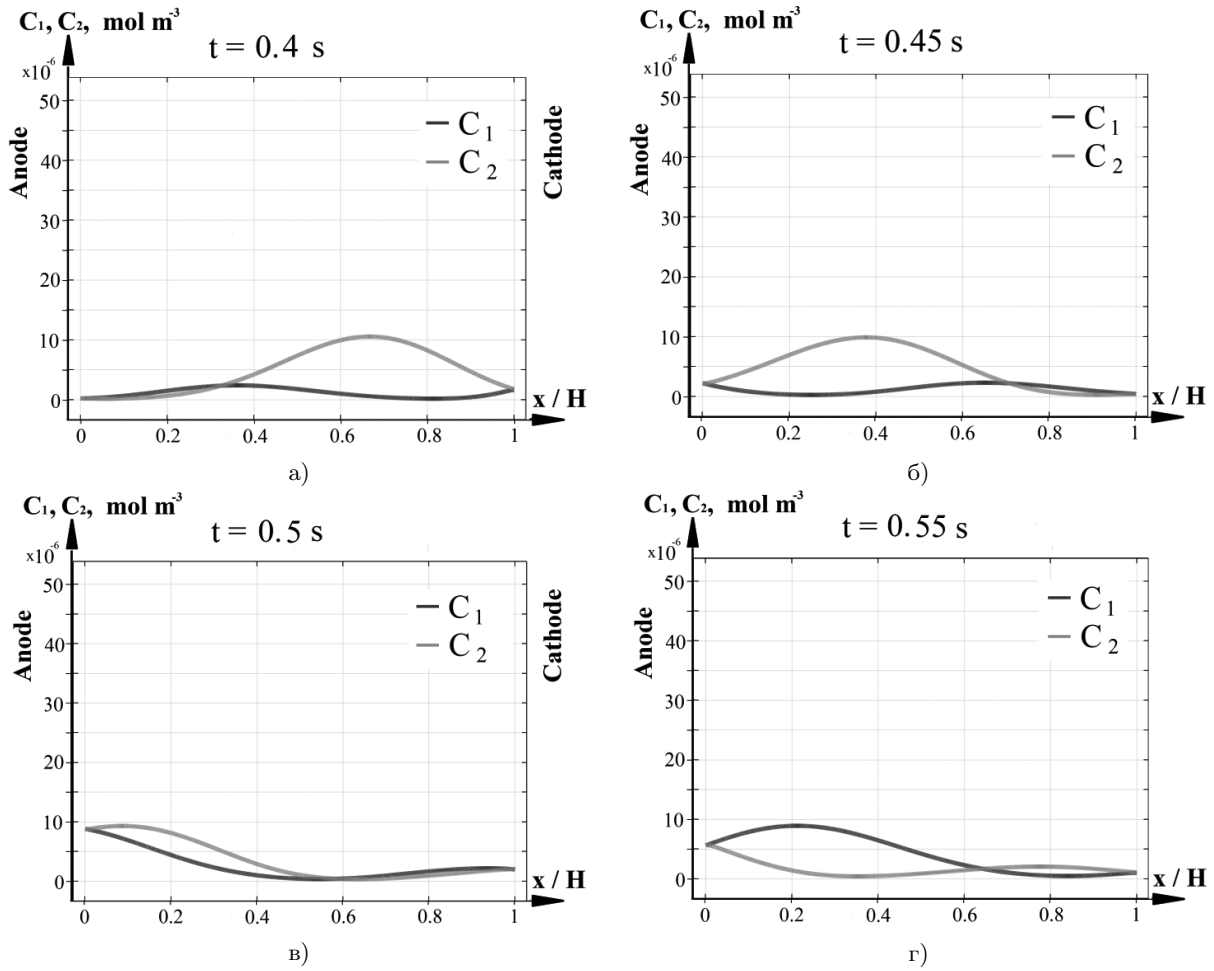


Рис. 5. Состояние концентраций C_1 и C_2 в момент времени:
 а) $t = 0,4$ с, б) $t = 0,45$ с, в) $t = 0,5$ с, г) $t = 0,55$ с

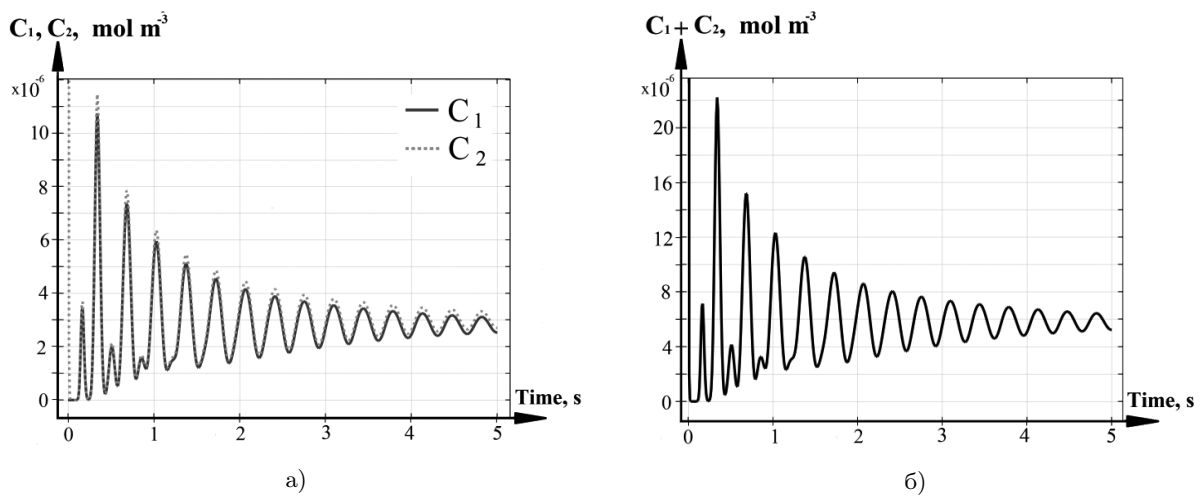


Рис. 6. Графики концентрации в тонком приповерхностном слое (поверхностные волны)
 а) $C_1(t, H)$, $C_2(t, H)$ на катоде по t , б) график суммарной концентрации $C_1(t, H) + C_2(t, H)$ на катоде по t

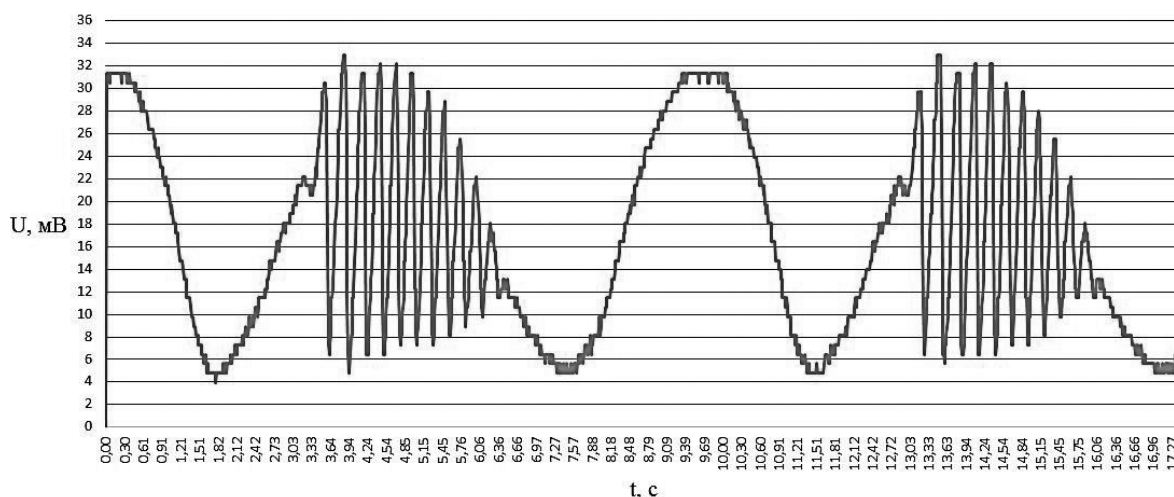


Рис. 7. Экспериментальная зависимость оптического отклика U при отражении от границы магнитной жидкости с электродом от времени t в электрическом поле

ве перезарядки лежат различные механизмы: во-первых, зарядка плотного слоя частиц инжектированными в результате электрохимических реакций ионами, во-вторых, перезарядка частиц в области объемного заряда, в-третьих, перезарядка частиц на противоположном электроде.

Показано, что периодический процесс перезарядки частиц магнитной жидкости обеспечивает возникновение и развитие автоволн. Амплитуда волны все время падает, потому что внешняя энергия постоянна, а диффузия со временем начинает подавлять электромиграцию.

Предсказательной ценностью данной модели являются возможность определения критического значения скачка потенциала, нахождения времени установления периода колебаний и других характеристик процесса.

Литература

1. Диканский Ю.И., Нечаева О.А., Закинян А.Р. Деформация микрокапель магниточувствительной эмульсии в магнитном и электрическом полях // Коллоидный журнал. 2006. Т. 68. № 2. С. 161–165.
2. Бутенко А.А., Ларионов Ю.А., Никитин Л.В., Тулинов А.А., Чеканов В.В. Оптическая и магнитная интерференция в тонком прозрачном электроде, граничащем с магнитной жидкостью // Изв. АН СССР. Серия физ. 1991. Т. 55. №6. С. 1141–1145.
3. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov V.S. Phase autowaves in the near-electrode layer in the electrochemical cell with a magnetic fluid // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. P. 38–41.
4. Чеканов В.В., Кандаурова Н.В., Чеканов В.С. Экспериментальное наблюдение изменения коэффициента отражения света от поверхности раздела сред «вода – магнитная жидкость» в электрическом поле, волновое движение и неустойчивость поверхности // Журнал технической физики. 2014. Вып. 9. Т. 84. С. 26–31.
5. Electrodynamics. CISM Courses and Lectures. No. 380. Udine. Italy, 1998. 363 p.
6. Zhakin A.I. Electrohydrodynamics: Basic Concepts, Problems and Applications. Kursk: University press, 1998. 132 c.
7. Жакин А.И. Ионная электропроводность и комплексообразование в жидких диэлектриках // УФН. 2003. Т. 173. № 1. С. 51–68.
8. Жакин А.И. Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках // УФН. 2006. Т. 176. № 3. С. 289–310.
9. Жакин А.И. Электродинамика // УФН. 2012. Т. 182. № 5. С. 495–520.
10. Диканский, Ю.И., Нечаева, О.А. Структурные превращения в магнитной жидкости в электрическом и магнитных полях // Коллоидный журнал. 2003. Т. 65. № 3. С. 338–342.
11. Остроумов Г.А. Межэлектродная осцилляция частиц дисперсной фазы. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 319 с.
12. Шлюв В.Н., Дейнега Ю.Ф. К теории эффектов межэлектродной циркуляции, межэлектродного сжатия дисперсной фазы в неводных дисперсных системах // Коллоидный журнал. 1969. Т. 31. С. 908–912.
13. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov

- V.S. Calculation of the membrane thickness of magnetite nanoparticles on the surface of the transparent conductive electrode in the electric field // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015. Vol. 7. Iss. 4, Part 1. P. 04041–04043.
14. Chekanov V.V., Kandaurova N.V., Chekanov V.S. Thickness Calculation of thin transparent conductive membrane on the border with a magnetic fluid // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2016. Vol. 8. Iss. 4. P. 04045–04048.
15. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир, 1977. 463 с.
6. Zhakin, A.I. *Electrohydrodynamics: basic concepts, problems and applications*. University press, Kursk, 1998.
7. Zhakin, A.I. Ionnaya elektroprovodnost' i kompleksobrazovanie v zhidkikh dielektrikakh [Ionic conductivity and complexation in liquid dielectrics]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2003, vol. 173, no. 1, pp. 51–68. (In Russian)
8. Zhakin, A.I. Near-electrode and transient processes in liquid dielectrics. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2006, vol. 176, no. 3, pp. 289–310. (In Russian)
9. Zhakin, A.I. Electrohydrodynamics. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2012, vol. 182, no. 5, pp. 495–520. (In Russian)
10. Dikansky, Yu.I., Nechaeva, O.A. Strukturnye prevrashcheniya v magnitnoy zhidkosti v elektricheskom i magnitnykh polyakh [Structural transformations in a magnetic fluid in electric and magnetic fields]. *Colloid journal* [Kolloidnyy zhurnal], 2003, vol. 65, no. 3, pp. 338–342. (In Russian)
11. Ostroumov, G.A. *Mezhelektrodnaya ostsillyatsiya chastits dispersnoy fazy. Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interelectrode oscillation of dispersed phase particles. Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Nauka, Moscow, 1979. (In Russian)
12. Shilov, V.N., Deynega, Yu.F. K teorii effektiv mezhelektrodnoy tsirkulyatsii, mezhelektrodnogo szhatiya dispersnoy fazy v nevodnykh dispersnykh sistemakh [On the theory of the effects of interelectrode circulation, interelectrode compression of the dispersed phase in non-aqueous dispersed systems]. *Colloid journal* [Kolloidnyy zhurnal], 1969, vol. 31, pp. 908–912. (In Russian)
13. Chekanov, V.V., Kandaurova, N.V., Chekanov, V.S. Calculation of the membrane thickness of magnetite nanoparticles on the surface of the transparent conductive electrode in the electric field. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015, vol. 7, iss. 4, part 1, pp. 04041–04043.
14. Chekanov, V.V., Kandaurova, N.V., Chekanov, V.S. Thickness Calculation of thin transparent conductive membrane on the border with a magnetic fluid. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2016, vol. 8, iss. 4, pp. 04045–04048.
15. Newman, J. *Elektrokhimicheskie sistemy* [Electrochemical systems]. Mir, Moscow, 1977. (In Russian)

References

1. Dikansky, Yu.I., Nechaeva, O.A., Zakinyan, A.R. Deformatsiya mikrokapel' magnitochuvstvitel'noy emul'sii v magnitnom i elektricheskom polyakh [Deformation of the microcapsule of the magnetic emulsion in the magnetic and electric poles]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloidal Journal], 2006, vol. 68, no. 2, pp. 161–165. (In Russian)
2. Butenko, A.A., Larionov, Yu.A., Nikitin, L.V. et al. Opticheskaya i magnitnaya interferentsiya v tonkom prozrachnom elektrode, granichashchem s magnitnoy zhidkost'yu [Optical and magnetic interference in a thin transparent electrode bordering a magnetic fluid]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya fizicheskaya* [Izvestiya USSR Academy of Sciences. Series of physical]. 1991, vol. 55, no. 6, pp. 1141–1145. (In Russian)
3. Chekanov, V.V., Kandaurova, N.V., Chekanov, V.S. Phase autowaves in the near-electrode layer in the electrochemical cell with a magnetic fluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 431, pp. 38–41.
4. Chekanov, V.V., Kandaurova, N.V., Chekanov, V.S. Eksperimental'noe nablyudenie izmeneniya koeffitsienta otrazheniya sveta ot poverkhnosti razdela sred "voda–magnitnaya zhidkost'" v elektricheskom pole, volnovoe dvizhenie i neustoychivost' poverkhnosti [Experimental observation of the change in the reflection coefficient of light from the interface between the "water-magnetic fluid" media in an electric field, wave motion, instability of the surface]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2014, vol. 84, iss. 9, pp. 26–31. (In Russian)
5. *Electrohydrodynamics*. CISM Courses and Lectures. No. 380. Undine. Italy, 1998.