

УДК 532.5:537.5

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАРЯДА В ПОЛЯРНОЙ СЛАБОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Б. Л. Смородин, А. В. Тараут

Пермский государственный университет, 614990 Пермь

E-mail: smorodin@psu.ru

Изучены нестационарные процессы протекания тока и формирования структур заряда в слабопроводящей полярной жидкости, находящейся в электрическом поле горизонтального конденсатора. Предполагается, что свободные заряды в жидкости образуются только за счет униполярной инжекции с анода, которая возникает, когда напряженность поля на аноде превышает пороговое значение. Проанализировано пространственно-временное распределение заряда, а также зависимости плотности тока через конденсатор и напряженности поля на аноде от времени. Показано, что промежутки времени между двумя инъекциями заряда в переменном поле (периоды инъекции) могут варьироваться в зависимости от периода внешнего поля. Получены зависимости плотности тока через конденсатор от частоты и амплитуды внешнего поля.

**Ключевые слова:** слабопроводящая жидкость, униполярная инжекция, волны заряда, переменное поле.

**Введение.** Исследование процессов протекания тока через слабопроводящие жидкости представляет интерес при изучении поведения жидких диэлектриков, в частности, при анализе протекания тока в высоковольтных устройствах. В то же время знание законов, описывающих кинетику зарядов в многокомпонентных средах, находящихся в электрических полях, может быть использовано при конструировании немеханических переключателей.

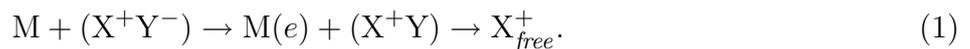
Колебания тока в постоянном поле конденсатора, заполненном слабопроводящей жидкостью, экспериментально наблюдались в случае, когда приложенное напряжение превышало некоторое критическое значение [1]. Один из возможных механизмов возникновения осцилляций тока в конденсаторе рассмотрен в работе [2]. В основе этого механизма лежит различие подвижности ионизированных примесей среды-носителя (собственных ионов) и инжектированных зарядов, а также пороговый характер инъекции ионов. Ионизация жидкого диэлектрика в приэлектродном слое происходит только в случае, когда напряженность электрического поля вблизи анода превышает некоторое критическое значение. В [2] обнаружены и изучены колебательные режимы прохождения тока через диэлектрик, находящийся в постоянном поле; проанализировано влияние отношения подвижностей инжектируемых и собственных ионов, а также порогового значения напряженности поля на динамику системы.

В данной работе изучены процессы протекания тока и существования автоволн заряда в плоском конденсаторе, заполненном полярной жидкостью, под действием постоянного

или переменного электрического поля. При этом в отличие от [2] предполагается, что на аноде и катоде параметры поверхностной рекомбинации инжектированных ионов различны. Кроме того, исследовано влияние внешнего переменного поля на распределение заряда в межэлектродном промежутке. Показано, что действие переменного внешнего поля приводит к нарушению периодичности инъекции заряда с поверхности анода, при этом сумма периодов инъекции равна периоду внешнего поля. Определено влияние амплитуды и частоты переменного поля на среднюю плотность тока в конденсаторе.

**1. Постановка задачи и метод решения.** Рассмотрим полярную слабопроводящую жидкость (бромбензол, йодбензол, хлорбензол), заполняющую плоский конденсатор толщиной  $L$  (ось  $x$  направлена перпендикулярно пластинам конденсатора, координата анода  $x = 0$ ). Жидкая среда состоит из нейтральных молекул диэлектрика и примесей. Растворенные примеси диссоциируют, создавая свободные заряды, обеспечивающие низкую собственную проводимость жидкости  $\sigma_0 \approx 10^{-11}$  См/м [3]. Кроме того, в результате сложных электрохимических процессов на поверхности анода возникают положительные ионы еще одного вида.

Возникновение заряда в приэлектродной области [4, 5] представляет собой процесс образования ионов в результате реакций следующего типа:



Здесь  $M$  — металл электрода, который захватывает электрон  $e$  от ионной пары  $(X^+Y^-)$ . Ионный компонент  $X^+$  называется инжектируемым, а проводимость, обусловленная реакцией (1), — инжекционной. Данная схема представляет собой классический пример униполярной инъекции: на аноде образуются положительные ионы. Отталкиваясь от анода, эти ионы распространяются в межэлектродном пространстве.

В зависимости от конкретных условий эксперимента можно использовать различные модели, описывающие инъекцию заряда в диэлектрической жидкости (см. [2, 5, 6]). В настоящей работе, как и в [2], предполагается, что инъекция возникает, когда напряженность поля в прианодной области превышает некоторое критическое значение. Отметим, что модель [2] используется для описания и объяснения различных экспериментальных данных: осцилляций тока в конденсаторе [1], люминесценции потоков жидких диэлектриков [7].

Концентрацию ионов, инжектируемых в объем с поверхности анода, обозначим  $n_1$ , концентрации положительных и отрицательных ионов, возникающих в межэлектродном промежутке вследствие объемной диссоциации примесей, —  $n_2$  и  $n_3$  соответственно. Система уравнений, описывающих в одномерном случае поведение полей концентрации ионов и потенциала, включает уравнения эволюции ионов каждого сорта и уравнение Пуассона (потоки зарядов в объеме диэлектрика включают две составляющие: диффузионную и дрейфовую, при этом перенос заряда, обусловленный течением, отсутствует, диэлектрик в целом неподвижен):

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_1}{\partial t} + \frac{\partial (n_1 U_1)}{\partial x} &= -\beta n_1 n_3, & \frac{\partial n_2}{\partial t} + \frac{\partial (n_2 U_2)}{\partial x} &= w - \alpha n_1 n_3, \\ \frac{\partial n_3}{\partial t} + \frac{\partial (n_3 U_3)}{\partial x} &= w - \alpha n_2 n_3 - \beta n_1 n_3, \\ n_i U_i &= -D_i \frac{\partial n_i}{\partial x} - \text{sign}(e_i) b_i n_i \frac{\partial \varphi}{\partial x}, & i &= 1, \dots, 3, \\ \Delta \varphi &= -\frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0}, & q &= \sum_{i=1}^3 e_i n_i, & E &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, & e_{1,2} &> 0, & e_3 &< 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $e$  — заряд электрона;  $D_i$  и  $b_i = eD_i/(kT)$  — коэффициенты диффузии и подвижности ионов, характеризующие кинетические и транспортные свойства ионов сорта  $i$ ;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\varphi$  — электрический потенциал в жидком диэлектрике;  $E$  — напряженность электрического поля;  $q$  — плотность объемного заряда;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды. Для характеристики процессов в конденсаторе будем использовать полный заряд  $Q$  в конденсаторе и плотность полного тока  $J$ , включающего ток смещения:

$$Q(t) = \int_0^L q(x, t) dx, \quad J(t) = \sum_{i=1}^3 e_i n_i U_i + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}.$$

В теории электроконвекции жидких диэлектриков вопрос о граничных условиях на электродах, инжектирующих заряд, является одним из наиболее трудных. Анализ этой проблемы проведен в [4, 8]. Отметим лишь, что из-за отсутствия дальнего порядка в жидкостях описание перехода заряда на границе металл — жидкий диэлектрик при микроскопическом анализе значительно сложнее, чем в случае перехода заряда на границах электрод — вакуум, металл — металл или металл — полупроводник. При гидродинамическом описании процессов прохождения заряда в жидком диэлектрике используются различные феноменологические варианты граничных условий [2, 5, 8].

Следуя [2], запишем граничные условия для задачи (2) о распространении заряда в межэлектродном промежутке. На электродах происходит электрохимический процесс образования и исчезновения ионов. Это явление описывается с использованием балансового соотношения между полным потоком ионов из объема и разностью потоков ионов, образовавшихся и исчезнувших на электродах. Предполагается, что ионизация происходит только на аноде. На поверхностях электродов рекомбинируют ионы всех видов. Интенсивность потока инжектированных ионов определяется напряженностью электрического поля вблизи анода  $E_a$ , зависящей как от внешней разности потенциалов  $E_0$ , так и от распределения объемного заряда в межэлектродном пространстве. По мере накопления инжектированного заряда вблизи анода электрическое поле в прианодном слое ослабевает и при некотором критическом значении напряженности  $E_{cr}$  инжекция прекращается. С учетом перечисленных выше предположений граничные условия принимают следующий вид:

— на аноде ( $x_a = 0$ )

$$\varphi = \varphi_0, \quad n_1 U_1 = AE - K_1 n_1, \quad n_i U_i = -K_i n_i, \quad i = 2, 3,$$

$$E < E_{cr}: \quad A = 0, \quad E \geq E_{cr}: \quad A = \text{const};$$

— на катоде ( $x_c = L$ )

$$\varphi = 0, \quad n_i U_i = K_i n_i, \quad i = 1, \dots, 3$$

( $K_i, A$  — параметры, характеризующие поверхностные электрохимические процессы). Представление о характерных значениях  $K_i, A$  можно получить при анализе результатов измерений плотности тока электризации жидких диэлектриков в металлических трубках [9]. Константа скорости поверхностной рекомбинации  $K_i$  существенно зависит от свойств вещества, из которого изготовлены электроды. Для анода и катода значения этого параметра могут различаться. Коэффициент интенсивности инжекции  $A$  определяется свойствами системы электрод — жидкость, например поверхностной концентрацией ионных пар ( $X^+Y^-$ ) и скоростями окислительно-восстановительных реакций на электродах [2, 5]. В экспериментах в жидкость-носитель можно искусственно добавлять примесь (например, кристаллический йод [4]), что позволяет изменять уровень инжекции. Значение  $E_{cr}$  зависит от свойств системы электрод — жидкость, но определяется в основном характером обработки поверхности анода. Реальные поверхности электродов (например,

стальных) имеют шероховатости (микровыступы), на которых происходит значительное усиление поля, инициирующего электрохимические реакции образования ионов в диэлектрике с примесью [8]. Параметр  $E_{cr}$  характеризует эти процессы интегрально.

В полярных жидкостях молекулы примесей диссоциируют практически полностью. В отсутствие электрического поля межэлектродное пространство содержит только внутренние ионы  $n_2, n_3$ . Распределение ионов  $n_2, n_3$  однородно, поэтому диэлектрическая жидкость электрически нейтральна (суммарный заряд в объеме равен нулю). В присутствии электрического поля внутренние ионы мигрируют к электродам и выходят из конденсатора: происходит электрическая очистка от ионов примеси. Таким образом, полярная жидкость характеризуется системой уравнений (1) с коэффициентами  $\alpha = \beta = w = 0$ . В неполярных жидкостях, когда правые части системы отличны от нуля, механизм самоподдерживающихся колебаний заряда в межэлектродном промежутке в основном не меняется [2]. Далее объемные процессы рекомбинации и диссоциации ионов не рассматриваются.

Введем безразмерные переменные с использованием масштабов длины  $L$ , времени релаксации заряда  $t_r = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma_0$ , напряженности поля  $kT / (eL)$ , потенциала  $kT / e$ , плотности заряда  $en_0$ , концентрации  $n_0 = \sigma_0 / (2eb_0)$ . Систему уравнений эволюции заряда и граничные условия запишем в безразмерном виде:

$$\begin{aligned}
 R \frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} - \frac{\partial^2 n_{1,2}}{\partial x^2} - \frac{\partial n_{1,2}}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - n_{1,2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} &= 0, \\
 R \frac{\partial n_3}{\partial t} - \frac{\partial^2 n_3}{\partial x^2} + \frac{\partial n_3}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + n_3 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} &= 0, \\
 2R \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} &= -n_1 - n_2 + n_3, \\
 x = 0, \quad \varphi = F_0, \quad \frac{\partial n_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= A_1 E - B_1 n_1, \\
 \frac{\partial n_i}{\partial x} + \text{sign}(e_i) n_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= B n_i, \quad i = 2, 3, \\
 x = 1, \quad \varphi = 0, \quad \frac{\partial n_i}{\partial x} + \text{sign}(e_i) n_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= -B n_i, \quad i = 1, \dots, 3.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В систему (3) входят следующие безразмерные параметры: отношение времени релаксации заряда к диффузионному времени  $R = D_0 \varepsilon_0 \varepsilon / (L^2 \sigma_0)$ , параметры приповерхностных реакций:  $B_i = K_i L / D_0$ , коэффициент интенсивности инжекции  $A_1 = 2Ae / \sigma_0$  и безразмерный потенциал анода  $F_0 = e_0 \varphi_0 / (kT)$ .

Решение нестационарной нелинейной задачи (3) в постоянном и переменном поле находилось методом конечных разностей. Использовалась неявная по времени схема со сгущающейся вблизи электродов сеткой. Неравномерная сетка задавалась аналитически формулами

$$\begin{aligned}
 x_j &= \frac{1}{2} \frac{\exp(jC/N_j) - 1}{\exp(C/2) - 1}, \quad j = 0, \dots, N_j/2, \\
 x_j &= \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{\exp((N_j - j)C/N_j) - 1}{\exp(C/2) - 1} \right), \quad j = N_j/2 + 1, \dots, N_j,
 \end{aligned}$$

где  $C$  — параметр сгущения;  $N_j$  — число узлов сетки;  $j$  — номер узла. Поскольку наиболее существенные диффузионные граничные слои возникают вблизи электродов, в этих областях сетка выбиралась наиболее подробной. Число узлов в межэлектродном пространстве обычно составляло  $N_j = 100$ , при этом параметр сгущения менялся в интервале

$8 < C < 10$ . Таким образом, минимальный шаг равен  $\Delta x_j = 3,6 \cdot 10^{-4}$  (шаг в ядре  $\Delta x_j = 5 \cdot 10^{-2}$ ), что позволяет детально исследовать диффузионные граничные слои вблизи электродов.

Для изучения процессов, происходящих в конденсаторе, выбирались следующие значения параметров: расстояние между обкладками  $L = 0,002$  м, потенциал анода  $\varphi_0 = 260$  В. Если в качестве диэлектрика рассматривать предварительно очищенные йодбензол или бромбензол, то можно использовать следующие физико-химические характеристики диэлектрика: остаточная проводимость жидкости  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-11}$  См/м, соответствующая концентрация носителей  $n_0 = 2 \cdot 10^{15}$  м<sup>-3</sup>, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 4,4$ , температура  $T = 300$  К, коэффициент диффузии  $D_0 = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. В данном случае время релаксации объемного заряда  $t_r \approx 2$  с, при этом  $R = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_0 = 10^4$ . Кроме того, при моделировании выбирались значения коэффициента интенсивности инжекции  $A_1 = 10^5$  и коэффициентов поверхностной рекомбинации  $B_1 = 5 \cdot 10^3$ ,  $B = 5 \cdot 10^4$ , соответствующие случаю колебаний жидкости в постоянном поле [2].

**2. Постоянное поле.** Рассмотрим случай постоянного внешнего поля. Важное с физической точки зрения отличие данной работы от случая, изученного в [2], заключается в том, что коэффициенты поверхностной рекомбинации инжектированных ионов на катоде и аноде различны:  $B_1 \neq B$ . Это может быть достигнуто при использовании электродов с различными физико-химическими свойствами.

Рассмотрим продвижение волны заряда между электродами конденсатора в постоянном поле (рис. 1). Критическое напряжение  $E_{cr}$ , при котором возникает инжекция, принято равным  $0,9E_0$  ( $E_0 = F_0/L$  — напряженность поля в конденсаторе без диэлектрика (будем называть его внешним полем)).

Представленные результаты качественно близки к полученным в случае одинаковых коэффициентов поверхностных реакций, рассмотренном в [2]. В случае, когда приложенное напряжение незначительно превышает критическое, создаются условия для существования автоволн заряда в диэлектрической жидкости. Физический механизм, поддерживающий автоволны заряда, может быть описан следующим образом. После включения внешнего поля в течение небольшого промежутка времени происходит электрохимическая очистка: внутренние ионы достигают электродов и разряжаются на них, а в объем впрыс-

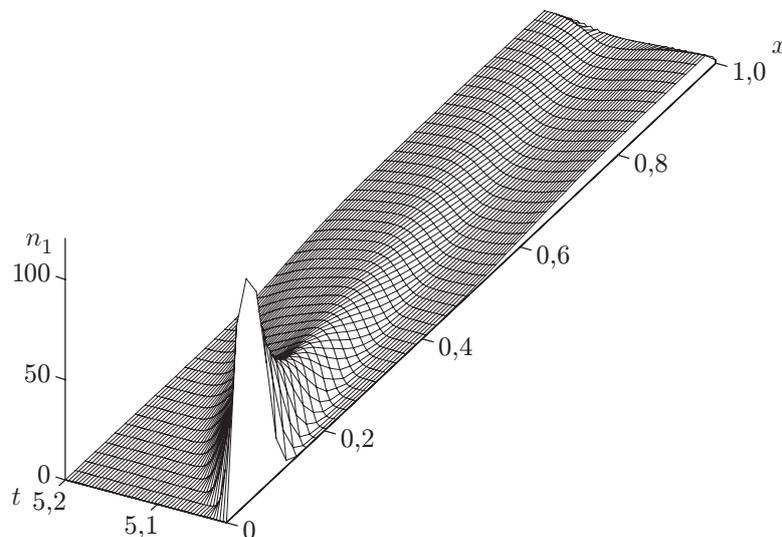


Рис. 1. Распределение заряда в постоянном поле конденсатора в различные моменты времени

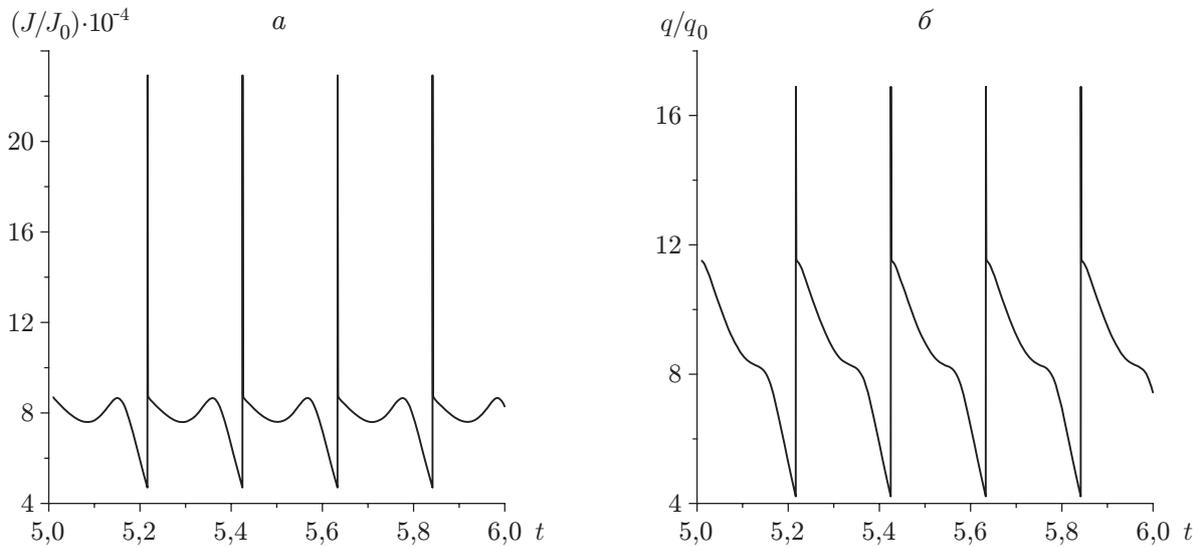


Рис. 2. Зависимости плотности полного тока (а) и заряда в конденсаторе (б) от времени в постоянном поле

квивается только инжектированный заряд. Возникший на аноде положительный инжектированный заряд не успевает оттекать, создает свое электрическое поле, компенсирующее внешнее поле в прианодной области. Когда накапливается достаточно большой заряд, напряженность поля перестает превышать критическое значение и инжекция прекращается. Часть образовавшегося вблизи анода заряда исчезает вследствие реакций поверхностной рекомбинации. Оставшийся заряд под действием электрического поля начинает двигаться в межэлектродном пространстве. По мере приближения этого заряда к катоду поле на аноде усиливается. В некоторый момент напряженность поля вновь превышает критическое значение, приводя к очередной инжекции ионов.

Изменение со временем плотности полного тока на аноде и объемного заряда в конденсаторе представлено на рис. 2 ( $J_0 = \sigma_0 kT / (eL)$ ). Пики на кривых соответствуют моментам инжекции заряда. После инжекции происходит резкий отток ионов через анод, который ослабляется по мере уменьшения заряда в прианодной области. Затем группа ионов отделяется от анода с последующим распространением их в конденсатор. При движении ионов через межэлектродное пространство заряд в системе остается практически неизменным: вблизи электродов концентрация ионов небольшая и реакции поверхностной рекомбинации отсутствуют (пологий участок кривой зависимости плотности объемного заряда от времени). В этот момент увеличивается напряженность электрического поля и как следствие плотность тока. Когда заряд достигает катода, за счет поверхностной рекомбинации суммарный заряд и плотность тока уменьшаются, что приводит к еще большему усилению поля вблизи анода. При достижении критического значения напряженности процесс повторяется. На рис. 2 видно, что инжекция ионов происходит с постоянным периодом  $T_0 = 0,2$ .

**3. Переменное поле.** Рассмотрим случай модулированного внешнего поля:

$$\varphi = F_0(1 + \eta \sin(2\pi t/T)).$$

Здесь  $\eta$ ,  $T$  — амплитуда и период модуляции внешнего поля соответственно.

Пусть период внешнего поля совпадает с периодом инжекции:  $T = T_i$ . Изменение напряженности поля в прианодной области  $E_a = E|_{x=0}$  в установившемся регулярном режиме показано на рис. 3,а. В тот момент, когда напряженность поля на аноде достигает

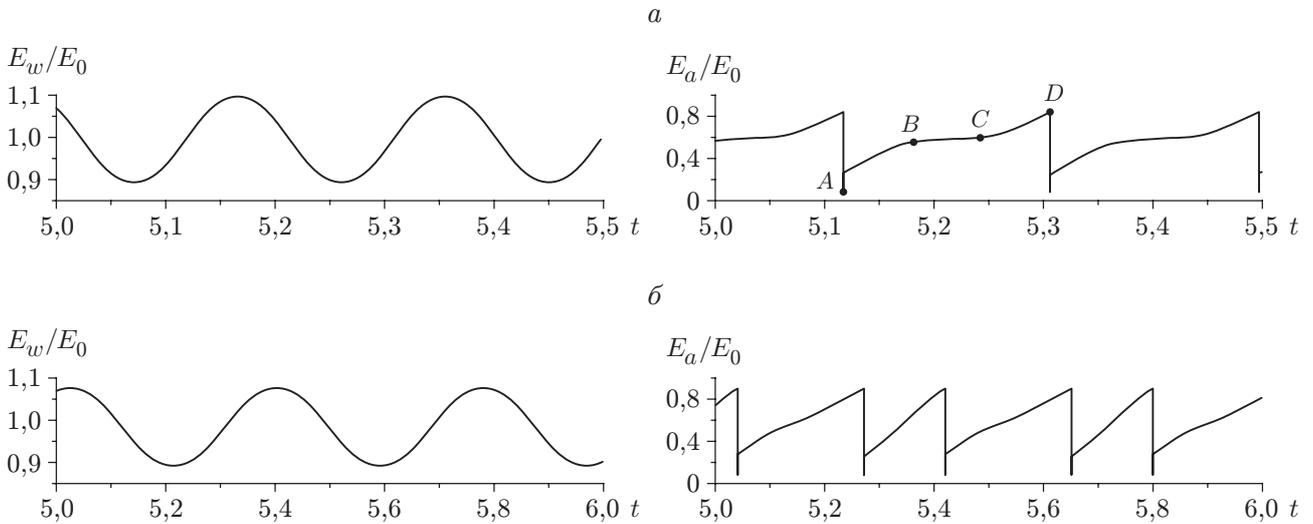


Рис. 3. Изменение напряженности внешнего поля  $E_w$  и поля на аноде  $E_a$  ( $\eta = 0,1$ ):  
 а —  $T = T_i$ ; б —  $T = 2T_i$

критического значения, происходит инжекция: вблизи анода образуется большое количество ионов. В момент инжектирования напряженность поля в прианодной области резко уменьшается, достигая минимального значения (точка  $A$  на рис. 3,а). В дальнейшем увеличение напряженности поля вблизи анода (участки  $AB$  и  $CD$  на рис. 3,а) определяется увеличением напряженности внешнего поля. Появление пологого участка  $BC$  на кривой зависимости  $E_a(t)$  (см. рис. 3,а) обусловлено тем, что уменьшение внешнего поля компенсируется полем заряда, распространяющегося в конденсаторе. Объемный заряд в конденсаторе и плотность полного тока изменяются с периодом внешнего поля  $T$ .

Рассмотрим случай  $T = 2T_i$  (рис. 3,б). За это время инжекция ионов происходит трижды, причем промежуток времени между первой и второй инжекциями (первый период  $T_1$ ) всегда меньше промежутка времени между второй и третьей инжекциями (второй период  $T_2$ ):  $T_1 < T_2$ . При этом выполняется следующее соотношение:  $T = 2T_i = T_1 + T_2$ . Меньший период  $T_1$  соответствует интервалу, на котором напряженность внешнего поля растет. Увеличение  $T_2$  по сравнению  $T_1$  объясняется тем, что этому промежутку времени соответствует изменение напряженности внешнего поля вблизи своего минимума.

В отличие от случая постоянного внешнего поля (или совпадения его периода с периодом инжекции) в переменном поле при  $T = 2T_i$  суммарный заряд в конденсаторе и плотность тока на интервалах  $T_1$  и  $T_2$  разные (рис. 4). С физической точки зрения это объяснимо. В течение первого (короткого) периода времени  $T_1$  далеко не все ионы успевают достичь катода и рекомбинировать на нем до момента, когда с анода в систему добавляется новый заряд. В течение второго, более длительного периода инжекции  $T_2$  в межэлектродном пространстве остается малый заряд. Его минимум меньше минимума заряда в постоянном поле из-за достаточно длительного процесса поверхностной рекомбинации ионов, достигших катода, и отсутствия инжекции новых ионов. В случае  $T = 3T_i$  происходит три инжекции ионов:  $T = T_1 + T_2 + T_3$ . Наибольший период  $T_2$  совпадает с промежутком времени, в течение которого внешнее напряжение уменьшается.

Зависимость средней за период плотности тока через конденсатор  $\langle J \rangle$  от частоты внешнего поля имеет сложный характер (рис. 5): участки линейного роста плотности тока чередуются с интервалами ее уменьшения. Представленная зависимость существенно

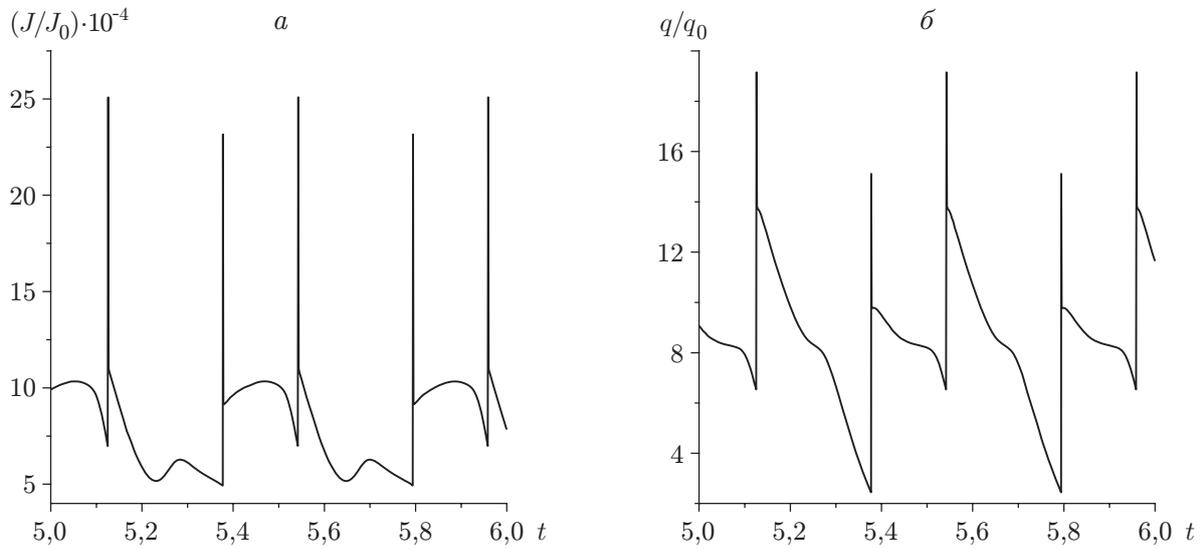


Рис. 4. Зависимости плотности полного тока (*а*) и заряда в конденсаторе (*б*) от времени в переменном поле при  $T = 2T_i$  ( $\eta = 0,1$ )

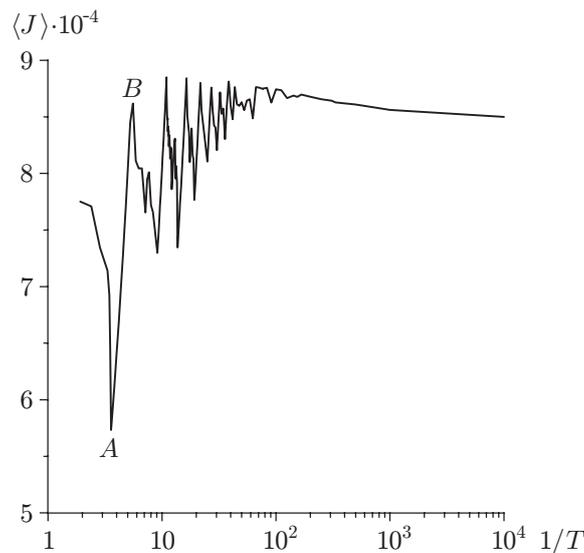


Рис. 5. Зависимость средней плотности тока от периода внешнего поля ( $\eta = 0,1$ )

отличается от кривых параметрического резонанса в переменном электрическом поле [10], что обусловлено изначально нелинейным характером рассматриваемых физических процессов, пороговым характером инжекции, взаимодействием электрических полей и полей концентрации. Качественно такую зависимость можно объяснить, анализируя поведение поля на аноде (рис. 6). На резко растущее поле между двумя последовательными инжекциями накладываются высокочастотные модуляции. На участках линейного роста средней плотности тока, например на участке *AB* (см. рис. 5), период модуляции внешнего поля уменьшается. При этом в точке *A* локального минимума среднего тока момент начала инжекции совпадает с моментом начала роста напряженности внешнего поля (рис. 6, *а*). В этом случае образовавшийся на электроде заряд движется с небольшой скоростью. Если момент начала инжекции совпадает с моментом достижения максимума напряженности

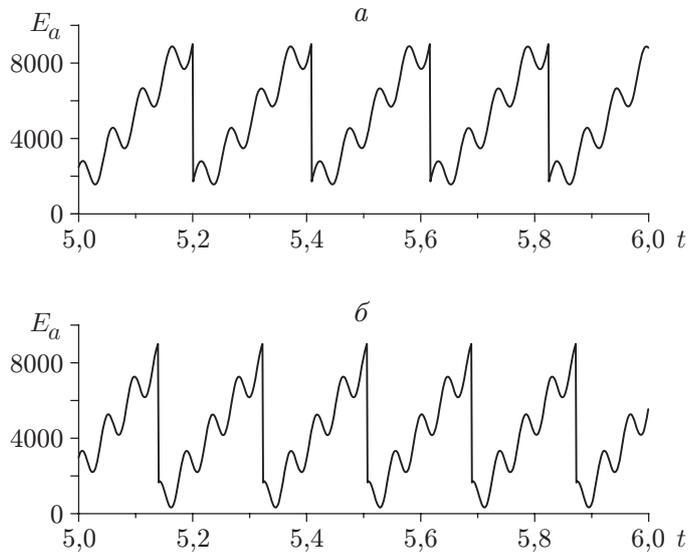


Рис. 6

Рис. 6. Изменение поля на аноде в точках локального минимума (*a*) и локального максимума (*б*) зависимости среднего тока от частоты внешнего поля:  
*a* —  $T = 0,0520$ ; *б* —  $T = 0,0458$

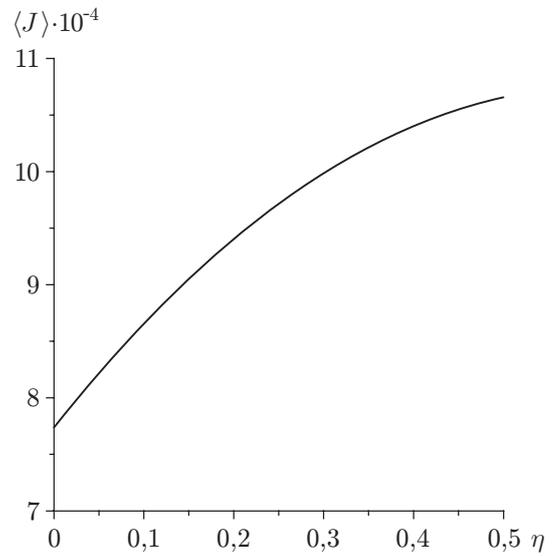


Рис. 7

Рис. 7. Зависимость средней плотности тока от амплитуды модуляции внешнего поля при  $T = T_i/32$

внешнего поля (рис. 6, *б*), то впрыснутый в конденсатор заряд за то же время разгоняется до больших скоростей, в результате чего достигается максимум средней за период плотности тока (точка *B* на рис. 5). В высокочастотной области средняя плотность тока изменяется монотонно. В течение периода инжекции  $T_i$  внешнее поле меняется многократно, время разгона инжектированного заряда вблизи электрода резко уменьшается и динамика системы определяется осредненными полями. При таком высокочастотном воздействии плотность тока, протекающего через конденсатор, существенно зависит от амплитуды внешнего воздействия и изменяется приблизительно на 40 % (рис. 7).

**Заключение.** В работе изучены процессы распространения инжектированного с анода заряда в постоянном или модулированном поле конденсатора, заполненного жидким диэлектриком. В постоянном поле обнаружены режимы существования автоволн при различной степени поверхностной рекомбинации на электродах. В случае гармонической модуляции внешнего поля при  $T > T_i$  обнаружено несколько периодов инжекции, которые в сумме составляют период внешнего поля  $T$ . Получены зависимости средней плотности тока от частоты и амплитуды модуляции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Malrison B., Atten P. Chaotic behaviour of instability due to unipolar injection in a dielectric liquid // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 723–726.
2. Polyansky V. A., Pankrat'eva I. L. Electric current oscillations in low-conducting liquids // J. Electrostat. 1999. V. 48. P. 27–41.
3. Жакин А. И. Ионная электропроводность и комплексообразование в жидких диэлектриках // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173, № 1. С. 51–68.

4. **Стишков Ю. К.** Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках / Ю. К. Стишков, А. А. Остапенко. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1989.
5. **Pontiga F., Castellanos A.** Physical mechanism of instability in a liquid layer subjected to an electric field and a thermal gradient // Phys. Fluids. 1994. V. 6. P. 1684–1701.
6. **Панкратьева И. Л., Полянский В. А.** Моделирование электрогидродинамических течений в слабопроводящих жидкостях // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 4. С. 36–44.
7. **Панкратьева И. Л., Полянский В. А.** Образование сильных электрических полей при течении жидкости в узких каналах // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 5. С. 619–622.
8. **Жакин А. И.** Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках // Успехи физ. наук. 2006. Т. 176, № 3. С. 289–310.
9. **Prybylov V. N.** Experimental study of electrization current of dielectric liquids in cylindrical pipe // Colloid. J. 1996. V. 58. P. 524–527.
10. **Сморodin Б. Л.** Возникновение конвекции слабопроводящей жидкости в модулированном тепловом поле // Журн. эксперим. и теорет. физики. 2001. Т. 120, вып. 6. С. 1421–1429.

*Поступила в редакцию 31/V 2006 г.,  
в окончательном варианте — 31/I 2007 г.*

---