

УДК 532.5
PACS 47.65.-d

Устойчивость слабопроводящей жидкости в электрическом поле при униполярной автономной инжекции заряда

В. А. Ильин*, Н. И. Задорожный

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь
*ilin1@psu.ru

В слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле плоского горизонтального конденсатора рассматривается модель автономной униполярной инжекции заряда с катода, согласно которой инжектируемая в жидкость плотность заряда имеет постоянное слагаемое и слагаемое прямо пропорциональное напряжённости электрического поля в конденсаторе. Используется электрогидродинамическое приближение. Описан случай невесомости в изотермической жидкости. Найдены равновесные распределения электрического потенциала и плотности заряда в предельном случае в аналитическом и численном видах. Проведено исследование линейной устойчивости слабопроводящей жидкости. Краевая задача решалась численно методом пристрелки с использованием процедуры интегрирования методом Рунге–Кутты–Фельберга. Получены нейтральные кривые. Определены критические параметры. Найдены зависимости порогов конвекции от двух параметров инжекции. При более интенсивной инжекции заряда – при увеличении по модулю любого из двух параметров инжекции – уменьшается порог возникновения электроконвекции, которая наступает при меньшем электрическом поле.

Ключевые слова: электроконвекция; слабопроводящая жидкость; инжекция заряда

Поступила в редакцию 21.07.2022; после рецензии 03.10.2022; принята к опубликованию 03.10.2022;

Stability of a poorly conductive liquid subjected to unipolar autonomous charge injection in an electric field

V. A. Il'in*, N. I. Zadorozhny

Perm State University, Perm, Russia
*ilin1@psu.ru

We study a model of autonomous unipolar charge injection from the cathode in a poorly conductive liquid in a steady electric field of a flat horizontal capacitor. According to this model, the charge density injected into the liquid has a constant term and a term directly proportional to the electric field strength in the capacitor. An electrohydrodynamic approximation is used. The case of weightlessness in an isothermal liquid is considered. The equilibrium distributions of the electric potential and charge density in the limiting case were found in analytical and numerical form. The linear stability of the poorly conductive liquid was studied. The boundary value problem was solved numerically by the targeting method using the Runge–Kutta–Fehlberg integration procedure. Neutral curves were obtained. Critical parameters were determined. The dependences of the convection thresholds on two injection parameters were found. With an increase in the modulus of either of the two injection parameters, the threshold for the occurrence of electroconvection decreases, it occurs with a smaller electric field.

Keywords: electroconvection; poorly conductive liquid; charge injection

Received 21 July 2022; revised 03 October 2022; accepted 03 October 2022

doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-27-33

1. Введение

Электроконвекция слабопроводящих жидкостей в электрическом поле вызывает интерес в связи тем, что представляет собой способ прямого преобразования энергии электрического поля в энергию движения. Электрическое поле может сильно изменить пороги тепловой конвекции и обеспечить эффективный способ управления движением жидкостей.

Влияние электрического поля на движение жидкости происходит благодаря действию специфических механизмов неустойчивости, связанных с различными способами возникновения заряда в жидкости [1]. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ остаются открытыми вопросы, связанные с возникновением и эволюцией электроконвективных движений [2]. Один из основных механизмов зарядообразования в жидкости – инжекционный. Он связан с инжекцией свободных зарядов с поверхности электрода.

Результаты решений электрогидродинамических задач можно использовать при проектировании различных устройств, строящихся на законах электрогидродинамических взаимодействий [3]: ЭГД-насосов, распылителей, фильтров и многих других.

В настоящей работе рассматривается инжекционный механизм образования зарядов в жидкости. Он связан с инжекцией свободных зарядов с поверхности электрода. Существуют разные механизмы инжекции [1, 2]. Нами описывается автономная униполярная инжекция, в которой плотность свободных зарядов, инжектируемых с катода, выражается зависимостью: $\rho_e = q_0 + aE_z$. Используется электрогидродинамическое приближение. Инжектируемые с поверхности катода заряды движутся через слой жидкости, изменяя в ней распределение электрического поля.

В случае, когда $q_0 = 0$, модель инжекции использовалась ранее в работах [4–9]. В [4] были найдены равновесные распределения электрического потенциала и плотности заряда. В одномерном случае проведено исследование динамики переноса заряда в вязкой слабопроводящей жидкости в модулированном электрическом поле [5]. Была изучена линейная устойчивость слабопроводящей жидкости в горизонтальном конденсаторе в постоянном электрическом поле [6]. В работах [7–9] проведено исследование нелинейных режимов конвекции.

В случае, когда $q_0 \neq 0$, $a = 0$, автономная модель инжекции рассмотрена, в частности, в работе [10]. В настоящей работе учтён вклад в инжекцию обо-

их слагаемых и проведен линейный анализ устойчивости жидкости.

В работах [11, 12] изучены другие модели инжекции. В [13] рассмотрены разные механизмы электризации жидкости.

В статье [2] приведено обоснование при ряде условий использования линейного закона инжекции. Там также отмечается, что возможна ионная инжекция из ионитовых мембран в полярную жидкость, когда диэлектрическая проницаемость жидкости настолько высока, что ионы мембраны «вытягиваются» в объём жидкого диэлектрика. В этом случае концентрация инжектируемых ионов на мембране считают постоянной, а саму инжекцию называют автономной.

Проблема выбора граничных условий для заряда очень сложная, и до конца не ясны механизмы зарядообразования. В связи с этим в данной работе изучается совместный эффект действия двух рассмотренных ранее механизмов инжекции.

Диффузия заряда в задаче не учитывается, поскольку коэффициент диффузии заряда считается малым ($D = 10^{-9}$ м²/с или меньше) [14, 15].

2. Постановка задачи

Рассмотрим бесконечный плоский горизонтальный слой вязкой несжимаемой слабопроводящей жидкости в вертикальном постоянном электрическом поле в невесомости. Ось x направлена вдоль нижней границы слоя, ось z – перпендикулярна границам слоя. Два плоских электрода лежат в плоскостях $z = 0$ и $z = h$ (рис. 1), h – толщина слоя. Инжекция заряда происходит с нижней обкладки – катода. Электрическое поле направлено вниз.

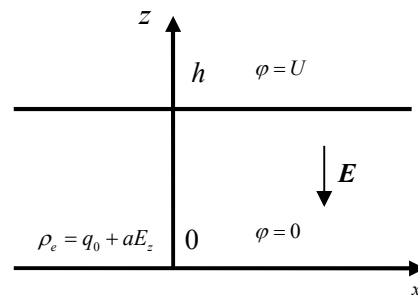


Рис. 1. Геометрия задачи

На катоде (нижнем электроде) потенциал равен нулю $\varphi(0) = 0$, на аноде (верхнем электроде) – $\varphi(h) = U$. Здесь U – напряжение электрического поля.

С катода происходит инжекция заряда. Плотность свободных зарядов у катода задаётся законом: $\rho_e = q_0 + aE_z$. Движение жидкости и свобод-

ных зарядов в слое описывается системой уравнений электрогидродинамики:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) &= -\nabla p + \rho v_0 \Delta \mathbf{v} + \rho_e \mathbf{E}, \\ \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_e \mathbf{v} - b \rho_e \mathbf{E}) &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \\ \operatorname{div}(\varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}) &= \rho_e, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – массовая плотность жидкости; \mathbf{v} – вектор скорости жидкости; p – превышение давления над гидростатическим; v_0 – коэффициент кинематической вязкости; ρ_e – плотность свободных зарядов; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная; b – подвижность зарядов; \mathbf{E} – напряженность, φ – потенциал поля.

Предполагается, что границы слоя непроницаемые, на них выполняются условия прилипания – скорость равна нулю.

На катоде при $z = 0$

$$\mathbf{v} = 0, \quad \varphi = 0, \quad \rho_e = q_0 + aE_z = q_0 - a \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (2)$$

на аноде при $z = h$

$$\mathbf{v} = 0, \quad \varphi = U. \quad (3)$$

Используем безразмерные переменные на основе масштабов: времени – время вязкой диссипации $[t] = h^2/v_0$, расстояния – расстояние между электродами $[r] = h$, скорости – $[\mathbf{v}] = v_0/h$, потенциала – $[\varphi] = U$, давления – $[p] = \rho v_0^2/h^2$, заряда – $[\rho_e] = \varepsilon \varepsilon_0 U/h^2$.

После обезразмеривания система уравнений (1) с граничными условиями (2), (3) может быть приведена к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\nabla p + \Delta \mathbf{v} - \operatorname{Gr}_e \rho_e \nabla \varphi, \\ \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0, \quad \Delta \varphi + \rho_e = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \rho_e = B(\rho_e^2 - \nabla \varphi \cdot \nabla \rho_e).$$

При $z = 0$

$$\mathbf{v} = 0, \quad \varphi = 0, \quad \rho_e = q_0 - A \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (5)$$

при $z = 1$

$$\mathbf{v} = 0, \quad \varphi = 1. \quad (6)$$

Здесь введены безразмерные параметры: Gr_e – электрическое число Грасгофа, параметр подвижности зарядов B и параметр инжекции A :

$$\operatorname{Gr}_e = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{\rho v_0^2}, \quad B = \frac{bU}{v_0}, \quad A = \frac{ah}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (7)$$

3. Равновесное решение

У системы (4)–(6) есть равновесное стационарное решение ($\mathbf{v} = 0$), при нахождении которого были занулены производные по времени. Равновесное распределение потенциала и плотности заряда имеет вид

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \frac{2}{3C_1} (C_1 z + C_2)^{3/2} + C_3, \\ \rho_{e0} &= -\frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} = -\frac{1}{2} C_1 (C_1 z + C_2)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя эти решения в граничные условия, можно найти неизвестные константы. Эти константы зависят от значений параметров A и q_0 .

Решение искалось аналитически в предположении, что $|2AC_1/q_0^2| \ll 1$. Путем разложения в ряд Тейлора было получено аналитическое решение. Оказалось, что это решение справедливо в случае, когда выполняются неравенства: $3/4 \ll A/q_0 \ll 5/4$.

Из-за узких границ применимости аналитического решения, было использовано численное решение для неизвестных коэффициентов. Методом Пауэлла (модификацией метода градиентного спуска) были найдены равновесные решения φ_0 и ρ_{e0} для разных значений параметров инжекции A и q_0 .

Из проведенного анализа было выявлено, что изгиб зависимости $\varphi_0(z)$ зависит от величин модулей A , q_0 : чем они больше, тем сильнее выгибается кривая. На рис. 2 представлена эта зависимость при $A = 0.25$, $q_0 = 0$ и $q_0 = -100$. На рис. 3 представлена зависимость плотности заряда $\rho_{e0}(z)$ при $A = 0.25$, $q_0 = 0$ и $q_0 = -100$ (горизонтальная ось на графике начинается с $z = 0.005$). Полученные при $q_0 = 0$ результаты аналогичны такому же исследованию в работе [6].

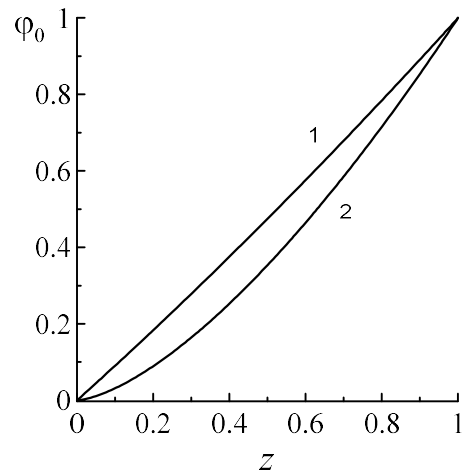


Рис. 2. Распределение потенциала $\varphi_0(z)$ при $A=0.25$: 1 – $q_0 = 0$, 2 – $q_0 = -100$

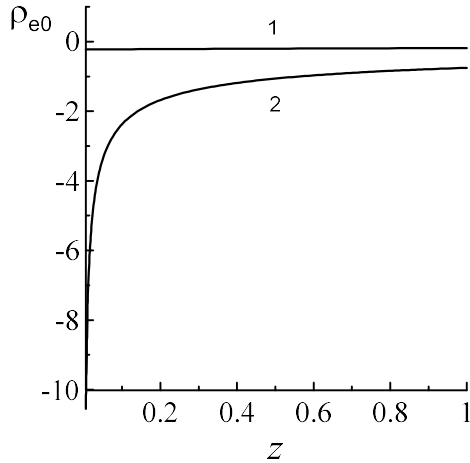


Рис. 3. Распределение плотности заряда $\rho_e(z)$ при $A=0.25$: 1 – $q_0 = 0$, 2 – $q_0 = -100$

При $q_0 = 0$ константы имеют значения: $C_1 = 0.4013$, $C_2 = 0.80269$, $C_3 = -1.19458$. При $q_0 = -100$: $C_1 = 2.24962$, $C_2 = 1.26513 \cdot 10^{-4}$, $C_3 = 4.21698 \cdot 10^{-7}$.

4. Линейный анализ устойчивости

Для исследования жидкости на устойчивость ищем решение системы (4)–(6) в виде малых отклонений от равновесного решения (8). Рассмотрим плоские возмущения $v = (u, 0, w)$ и $\partial/\partial y = 0$. Потенциал и плотность заряда заменим на сумму равновесной части и возмущения: $\varphi \rightarrow \varphi_0 + \varphi$, $\rho_e \rightarrow \rho_{e0} + \rho_e$. Тогда для амплитуд вертикальной компоненты скорости, потенциала и заряда получаем однородную систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} -\lambda(w'' - k^2 w) &= w^{IV} - 2k^2 w'' + k^4 w + \\ &+ Gr_e k^2 (\varphi'_0 \rho_e - \rho'_{e0} \varphi), \\ \varphi'' - k^2 \varphi + \rho_e &= 0, \\ -\lambda \rho_e + \rho'_{e0} w &= B(2\rho_{e0} \rho_e - \varphi'_0 \rho'_e - \rho'_{e0} \varphi'). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь зависимость решений от времени и горизонтальной координаты находим в виде $e^{-\lambda t} e^{ikx}$, где λ – декремент затухания; k – волновое число, связанное с периодом возмущений L соотношением $k = 2\pi/L$. Решения зависят только от вертикальной координаты. В уравнениях штрихами обозначены производные по вертикальной координате. Граничные условия запишутся в следующем виде (в скобках приведены значения вертикальной координаты):

$$\begin{aligned} w(0) = w(1) = 0, \quad w'(0) = w'(1) = 0, \\ \varphi(0) = \varphi(1) = 0, \quad \rho_e(0) = -A\varphi'(0). \end{aligned} \quad (10)$$

Эта краевая задача решалась численно методом пристрелки с использованием процедуры интегрирования методом Рунге–Кутты–Фельберга.

В работе [4] безразмерные параметры варьировались с учётом их зависимости от безразмерного напряжения F (F пропорционален размерной величине напряжения U):

$$Gr_e = 5000F^2, \quad B = 5F. \quad (11)$$

Связь безразмерного напряжения F с размерной величиной напряжения U можно описать следующим образом: $U = F \cdot 10^4 \text{ В} = F \cdot 10 \text{ кВ}$ ($F = U/10 \text{ кВ}$). То есть F является долей от 10 кВ. Для оценки параметров возьмём трансформаторное масло с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.2$, плотностью $\rho = 883 \text{ кг/м}^3$, вязкостью $\nu_0 = 22.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Нм}^2$, подвижность зарядов примем равной $b = 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Вс}$ [2]. Тогда получим, что $Gr_e = 4.4 \cdot 10^{-5} U^2 = 4.4 \cdot 10^3 F^2$, $B = 4.4 \cdot 10^{-4} U = 4.4F$. Эти величины близки к величинам, которые были использованы в работе [4]. Если поварьировать значениями диэлектрической проницаемости, плотности, вязкости жидкости и подвижности зарядов или рассмотреть другую связь F с U , то можно получить полное соответствие полученных соотношений для Gr_e и B со значениями, использованными в статье [4]. Будем искать решения относительно этой новой переменной F – безразмерного напряжения.

5. Результаты и обсуждение

Неустойчивость в этой задаче связана с монотонной модой [4]. В результате решения получены нейтральные кривые – границы устойчивости слабопроводящей жидкости, когда $\lambda = 0$. На рис. 4 приведены зависимости критического безразмерного напряжения – параметра F от волнового числа k при разных q_0 при параметре инъекции $A = 0.2$. Видно, что при увеличении q_0 по модулю равновесие в слое теряет устойчивость при меньших значениях поля F , порог возникновения конвекции уменьшается. При увеличении параметра инъекции A порог устойчивости жидкости также уменьшается.

Рассмотрим зависимости минимального значения параметра F_{min} от q_0 при разных значениях параметра инъекции A (рис. 5), а также зависимости от A при разных q_0 (рис. 6). Из представленных кривых видно, что при фиксированном значении A и увеличении значения параметра $|q_0|$, а также при фиксированном q_0 и увеличении A пороги конвекции уменьшаются.

Получается, что при увеличении инжекции, когда с катода впрыскивается большее количество заряда, пороги устойчивости нелинейным образом понижаются, стационарная электроконвекция начинается раньше.

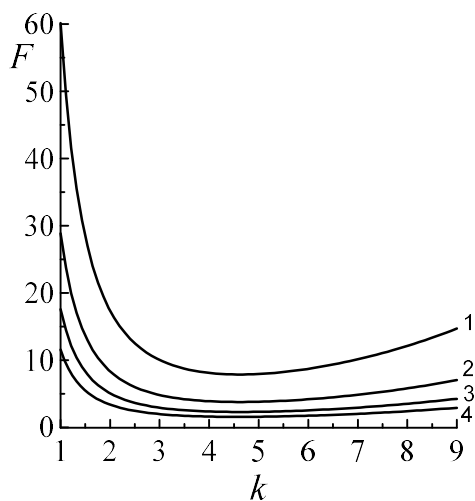


Рис. 4. Зависимость F от волнового числа k при параметре инжекции $A = 0.2$ и значениях q_0 : 1 – 0; 2 – -0.1; 3 – -0.2; 4 – -0.3

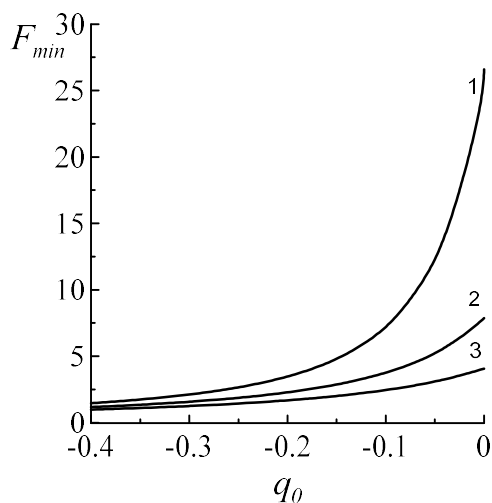


Рис. 5. Зависимость минимального значения F_{min} от q_0 при разных значениях параметра инжекции A : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.3

6. Заключение

В невесомости в изотермическом случае изучена линейная устойчивость слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле горизонтального конденсатора при автономной униполярной инжекции заряда с катода. Найдены аналитические и численные зависимости равновесных решений для электрического потенциала и плотности заряда для заданных параметров.

Найдены нейтральные кривые. Вычислены критические параметры в минимумах нейтральных кривых для различных значений параметров, опре-

деляющих инжекцию. При более интенсивной инжекции заряда – при увеличении по модулю любого из параметров инжекции – уменьшается порог возникновения электроконвекции, она наступает при меньшем электрическом поле.

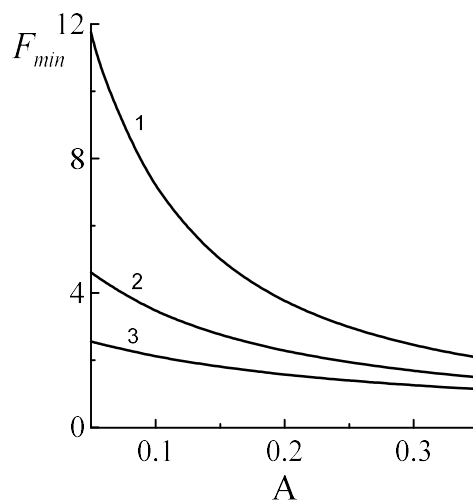


Рис. 6. Зависимость минимального значения F_{min} от параметра инжекции A и значениях q_0 : 1 – -0.1; 2 – -0.2; 3 – -0.3

Список литературы

1. Болога М. К., Гросу Ф. П., Кожухарь И. А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 176 с.
2. Жакин А. И. Электродинамика // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. С. 495–520. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495
3. Афанасьев С. Б., Стишков Ю. К. Электрофизические процессы в жидкостях и газах. Раздел 4. ЭГД-устройства: учеб.-метод. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. 87 с.
4. Верещага А. Н. Унарная электроконвекция в плоском слое. // Гидродинамика и процессы переноса. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1989. С. 42–47.
5. Ильин В. А., Петров Д. А. Исследование динамики переноса заряда через слабопроводящую жидкость в модулированном электрическом поле // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2009. Вып. 1. С. 26–30.
6. Ильин В. А., Петров Д. А. Линейный анализ устойчивости слабопроводящей жидкости в электрическом поле при униполярной инжекции заряда // Вестник Пермского университета. Серия: Физика. 2011. Вып. 1. С. 31–35.
7. Ильин В. А., Александрова В. Н. Волновые режимы электроконвекции слабопроводящей жидкости при униполярной инжекции заряда в постоянном электрическом поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 157. Вып. 2. С. 349–356. DOI: 10.31857/S0044451020020133

8. Ильин В. А., Чигорина Т. И. Стационарные режимы электроконвекции слабопроводящей жидкости при униполярной инжекции заряда в постоянном электрическом поле // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2021. № 5. С. 3–13. DOI: 10.31857/S0568528121050042
9. Мордвинов А. Н., Смородин Б. Л. Электроконвекция при инжекции с катода и нагреве сверху // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т. 141. Вып. 5. С. 997–1005. DOI: 10.1134/S1063776112030181
10. Lacroix J. C., Atten P., Hopfinger E. J. Electroconvection in a dielectric liquid layer subjected to unipolar injection // J. Fluid Mech. 1975. Vol. 69. N. 3. P. 539–563. DOI: 10.1017/S0022112075001553
11. Pontiga F., Castellanos A. Physical mechanisms of instability in a liquid layer subjected to an electric field and a thermal gradient // Physics of Fluids. 1994. Vol. 6. No. 5. P. 1684–1701. DOI: 10.1063/1.868231
12. Тараут А. В., Смородин Б. Л. Электроконвекция при наличии автономной униполярной инжекции и остаточной проводимости // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т. 142. Вып. 2. С. 403–412. DOI: 10.1134/S1063776112070187
13. Панкратьева И. Л., Полянский В. А. Основные механизмы электризации слабопроводящих многокомпонентных сред // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 5. С. 15–22. DOI: 10.7868/S0568528117050024
14. Смородин Б. Л., Тараут А. В. Влияние модуляции электрического поля на распространение заряда в полярной слабопроводящей жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 1. С. 3–12. DOI: 10.1007/s10808-008-0001-y
15. Смородин Б. Л., Тараут А. В. Динамика волновых электроконвективных течений в модулированном электрическом поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 145. Вып. 1. С. 180–188. DOI: 10.1134/S1063776114010178
- Section 4. EHD devices. Study guide.]. St. Petersburg, 2007. 87 p. (In Russian).
4. Vereshchaga A. N. Unarnaia elektrokonvektsiia v ploskom sloe [Unary electroconvection in a planar layer). *Fluid Dynamics and Heat and Mass Transfer Processes*. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences. Sverdlovsk, 1989, pp. 42–47. (In Russian)
5. Il'in V. A., Petrov D. A. Issledovanie dinamiki perenosa zariada cherez slaboprovodiashchuiu zhidkost' v modulirovannom elektricheskom pole [Investigation of the dynamics of charge transfer through a weakly conductive liquid in a modulated electric field]. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2009, no. 1, pp. 26–30 (In Russian)
6. Il'in V. A., Petrov D. A. Lineinyi analiz ustoichivosti slaboprovodiashchei zhidkosti v elektricheskom pole pri unipoliarnoi inzhetsii zariada [Linear analysis of the stability of a weakly conductive liquid in an electric field with unipolar charge injection]. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2011. no. 1, pp. 31–35 (In Russian).
7. Il'in V. A., Aleksandrova V. N. Wave regimes of electroconvection of a low conducting liquid under unipolar injection of a charge in a steady electric field. *JETP*, 2020, vol. 130, no. 2, pp. 293–300. DOI: 10.1134/S1063776120010045
8. Il'in V. A., Chigorina T. I. Stationary regimes of electric convection of a low-conductivity fluid in the case of unipolar charge injection in a constant electric field. *Fluid Dynamics*, 2021, vol. 56, no. 5, pp. 601–611. DOI: 10.1134/S0015462821050049
9. Mordvinov A. N., Smorodin B. L. Electroconvection under injection from cathode and heating from above. *JETP*, 2012, vol. 114, no. 5, pp. 870–877. DOI: 10.1134/S1063776112030181
10. Lacroix J. C., Atten P., Hopfinger E. J. Electroconvection in a dielectric liquid layer subjected to unipolar injection. *J. Fluid Mech.*, 1975, vol. 69, no. 3, pp. 539–563. DOI: 10.1017/S0022112075001553
11. Pontiga F., Castellanos A. Physical mechanisms of instability in a liquid layer subjected to an electric field and a thermal gradient. *Physics of Fluids*, 1994, vol. 6, no. 5, pp. 1684–1701. DOI: 10.1063/1.868231
12. Taraut A. V., Smorodin B. L. Electroconvection in the presence of autonomous unipolar injection and residual conductivity. *JETP*, 2012, vol. 115, no. 2, pp. 361–369. DOI: 10.1134/S1063776112070187
13. Pankrat'eva I. L., Polyanskii V. A. Basic mechanisms of electrification of weakly conductive multicomponent media. *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 5. pp. 610–616. DOI: 10.1134/S0015462817050027

References

1. Bologna M. K., Grosu F. P., Kozhukhar' I. A. *Elektrokonvektsiia i teploobmen* [Electroconvection and Heat Exchange]. Kishinev: Shtiintsa Publ., 1977. 320 p. (In Russian).
2. Zhakin A. I. Electrohydrodynamics. *Physics-Uspokhi*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 465–488. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495
3. Afanas'ev S. B., Stishkov Iu. K. Elektrofizicheskie protsessy v zhidkostiakh i gazakh. Razdel 4. EGD-ustroistva. Uchebno-metodicheskoe posobie [Electrophysical Processes in Liquids and Gases.

14. Smorodin B. L., Taraut A. V. Effect of electric field modulation on charge propagation in a low-conducting polar liquid. *JAMTP*, 2008, vol. 49, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1007/s10808-008-0001-y
15. Smorodin B. L., Taraut A. V. Dynamics of electroconvective wave flows in a modulated electric field. *JETP*, 2014, vol. 118, no. 1, pp. 158–165. DOI: 10.1134/S1063776114010178

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ильин В. А., Задорожный Н. И. Устойчивость слабопроводящей жидкости в электрическом поле при униполярной автономной инъекции заряда // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 27–33. doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-27-33

Please cite this article in English as:

Ilin V. A., Zadorozhny N. I. Stability of a poorly conductive liquid subjected to unipolar autonomous charge injection in an electric field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2022, no. 4, pp. 27–33. doi: 10.17072/1994-3598-2022-4-27-33

Сведения об авторах

1. *Владимир Алексеевич Ильин*, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики фазовых переходов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.
2. *Никита Игоревич Задорожный*, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.

Author information

1. *Vladimir A. Il'in*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Physics of Phase Transitions, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia.
2. *Nikita I. Zadorozhny*, Student, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia.