

Справочник. / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1971. – 375с.

4. **Плехов, О.** Экспериментальное исследование закономерностей диссипации энергии при динамическом деформировании нанокристаллического титана [Текст] / О. Плехов, В. Чудинов, В. Леонтьев и др. // Письма в ЖТФ, 2009. – Т. 35. – Вып. 2. – С. 82 – 89.

5. **Веселовский, В.Б.** Решение задач теплопроводности для определения долговечности элементов конструкций, разогревающихся вследствие циклического нагружения [Текст] / В.Б.Веселовский, Н.И. Войцеховский // Гидрогазомеханика и теплообмен летательных аппаратов. К.: Наук.думка, 1988. – С.142 – 149.

6. **Федоров, В.В.** Термодинамические представления о прочности и разрушении твердого тела [Текст] / В.В. Федоров// Проблемы прочности. – 1971. – №11. – С. 32 – 34.

7. **Веселовский, В. Б.** Разогрев ограниченного стержня при высокочастотном нагружении [Текст] / В. Б. Веселовский, В. Ю. Клим // Вісн. ДНУ. Сер.: Механіка. – 2002.– Вип. 6.– Т. 2. – С.27 – 34.

8. **Клим, В. Ю.** Математическая модель разогрева элементов конструкций при циклическом деформировании [Текст] / В. Ю. Клим // Вісн. ДНУ. Сер.: Механіка. – 2010. – Вип. 14(1). –Т. 18. – № 5. – С. 181 – 191.

9. **Клим, В. Ю.** Диссипативный разогрев стержневых элементов конструкций при высокочастотном циклическом деформировании [Текст] / В. Ю. Клим // Вісн. ДНУ. Сер.: Механіка. – 2014. – Вип. 18(1). – Т.22.– № 5. – С. 78 – 86.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 532.516

В.И.Елисеєв, Ю.П.Совит

Днепро́вский национальный университет имени Оле́ся Гонча́ра

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕНИСКА

В работе представлены результаты исследований в одном из важнейших направлений современной науки, к которому относятся поверхностные и приповерхностные физико-химические явления. Определена основная проблема в задачах электрокапиллярности: на границах сред вследствие поляризации различной физической и химической природы возникают разности электрических потенциалов. Рассмотрены сравнительно простые задачи ионообмена в слое жидкости с плоским мениском при наличии приложенного внешнего напряжения, действующего вдоль капилляра. В качестве объекта численного исследования взята область, состоящая из различных подобластей, имеющих различные электрофизические характеристики. В работе показано, что такое рассмотрение является необходимым ввиду того, что условия на контактных поверхностях являются чрезвычайно важными для получения величин потенциалов на этих границах, по которым возможно оценить электрические силы, действующие на слой жидкого электролита. Расчеты проведены с использованием метода введения искусственного релаксационного коэффициента в уравнение для потенциала. В результате решения стационарных и нестационарных задач массообмена выявлены особенности распределения потенциалов как внутри областей, так и на границах. Показано, что даже для электропроводящих стенок капилляра при диффузии компонентов, отличающихся друг от друга коэффициентами диффузии, возникают участки свободных поверхностей со сравнительно большими потенциалами, которые могут быть использованы для управления менисками в капиллярных трубках. Сделан вывод о том, что в случае, если стенками

капілляра являється діелектрик, возникает необходимость в более тщательной разработке метода определения потенциала в окрестности соединения трех областей.

Ключевые слова: плоский мениск, капилляр, численное исследование, контактная поверхность, потенциал, электропроводящая стенка капилляра, диэлектрическая стенка капилляра.

В роботі наведено результати досліджень в одному з найважливіших напрямків сучасної науки, до якого відносяться поверхневі та приповерхневі фізико-хімічні явища. Визначено основну проблему в задачах електрокапілярності: на межах середовищ внаслідок поляризації різної фізичної та хімічної природи виникають різниці електричних потенціалів. Розглянуто достатньо прості задачі про іонообмін у шарі рідини з плоским меніском за наявності прикладеного зовнішнього напруження, що діє уздовж капіляра. В якості об'єкта чисельного дослідження обрано область, що складається з різних підобластей, які мають різні електрофізичні характеристики. В роботі показано, що такий підхід є необхідним з огляду на те, що умови на контактних поверхнях є надзвичайно важливими для подальшого отримання величин потенціалів на цих межах, за якими можливо оцінити електричні сили, що діють на шар рідкого електроліту. Розрахунки проведено з використанням методу введення штучного релаксаційного коефіцієнта в рівняння для електричного потенціалу. В результаті розв'язання стаціонарних і нестаціонарних задач масообміну виявлені особливості розподілу потенціалів як всередині областей, так і на межах. Показано, що навіть для електропровідних стінок капіляра при дифузії компонентів, що відрізняються один від одного коефіцієнтами дифузії, виникають ділянки вільних поверхонь з порівняно великими потенціалами, які можуть бути використані для керування менісками в капілярних трубках. Зроблено висновок про те, що у випадку, коли стінками капіляра є діелектрик, виникає необхідність в більш ретельній розробці методу визначення потенціалу в околі з'єднання трьох областей.

Ключові слова: плоский мениск, капіляр, чисельне дослідження, контактна поверхня, потенціал, електропровідна стінка капіляра, діелектрична стінка капіляра.

Results of research in the one of the important trends in modern science such as physic-chemical surface's and near-surface's process are presented. The main question in electrical capillary problems is observed: electric potential difference appears on the contact surface of continuums due to different physic and chemical polarization. We consider relatively simple problems of ion exchange in a liquid layer with a flat meniscus in the presence of an applied external stress acting along the capillary. The object of numerical investigation is an area consisting of various subareas that have different electrophysical characteristics. It is shown that such a consideration is necessary, since the conditions on the contact surfaces are extremely important for obtaining the potential values at these boundaries, which are necessary for evaluating the electric forces acting on the liquid electrolyte layer. Calculations were carried out using the method of introducing into the equation for the potential of the artificial relaxation coefficient. As a result of the solution of stationary and nonstationary mass transfer problems, the features of potential distribution are revealed, both within regions and at boundaries. It is shown that even for electrically conductive walls of the capillary, when diffusion of components differing by diffusion coefficients, regions of free surfaces with relatively large potentials arise that can be used to control menisci in capillary tubes. In the case that the walls of the capillary is a dielectric, there is a need for a more thorough development of a method for determining the potential in the vicinity of the connection of three regions.

Key words: flat meniscus, capillary, numerical investigation, contact surface, potential, electroconductive wall of capillary, dielectric wall of capillary.

Введение. Одним из важнейших направлений современной науки является поверхностные и приповерхностные физико-химические явления. На границах сред, вследствие поляризации различной физической и химической природы, возникают разности электрических потенциалов. Круг этих явлений относится, в частности, и к электрокапиллярности, в основе которой лежит термодинамическое уравнение, обобщенное Фрумкиным [2], которое запишем в виде:

$$d\sigma = -qdU - RT \left(\frac{q}{F} \sum_j \frac{d \ln a_j}{z_j} + \sum_j \Gamma_j d \ln a_j \right), \quad (1)$$

где σ – удельная поверхностная энергия, принимаемая равной поверхностному натяжению; q – плотность поверхностного заряда; U – характерная разность потенциалов наложенного электрического поля; a_j – активность компонента; z_j – валентность; Γ_j – адсорбция; R – газовая постоянная; T – температура. При постоянном составе раствора (отбрасывая члены в скобках) будем иметь уравнение Липпмана, сыгравшего значительную роль в электрохимии приэлектродных процессов. Особенностью уравнения Липпмана является то, что при q равно нулю величина σ имеет экстремум, поэтому часто используются другие формы закона Липпмана для статических поверхностей, например, [7; 9]:

$$\sigma_{SL}(U) = \sigma_{SL}(0) - \frac{1}{2}CU^2, \quad \cos\theta_U = \cos\theta_0 + \frac{C}{2\sigma_{LP}}U^2, \quad (2)$$

где σ_{SL} – удельная свободная энергия на поверхности жидкости и твердого тела, соответственно без потенциала и с потенциалом на поверхности; σ_{LP} – удельная свободная энергия на поверхности жидкости и газа; C – удельная емкость двойного электрического поля. В настоящее время исследования в области электрокапиллярности получили новый импульс в связи с микрофлюидикой – с процессами управления мелкими капельками и пузырьками [10]. В связи с этим большое внимание уделяется контактному углом жидких электролитов с электродами (EW) и электролитов с твердыми и жидкими диэлектриками (EWOD), т.к. поведение капель, движущихся по поверхности, зависит от их величин. Выписанные формулы качественно показывают влияние приложенных электрических полей, однако сложность состоит в том, что остаются неизвестными емкость и потенциал на поверхности слоя. Это наталкивает на рассмотрение модельных задач с целью определения основных закономерностей ионного обмена, как на границах сред, так и в приграничных областях при наличии электрического поля.

Постановка задачи. В данной работе рассмотрим расчетную область, показанную на рис. 1.

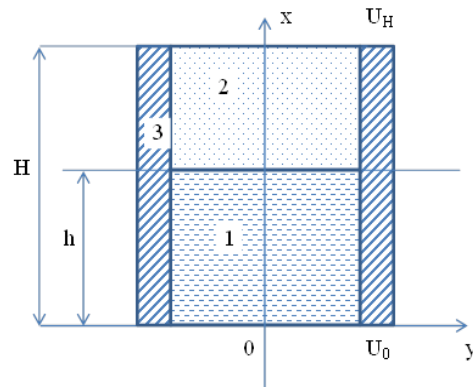


Рис. 1. Схема расчетной области

Примем здесь для простоты, что поверхность мениска является плоскостью, электрическое поле направлено по нормали к мениску, при этом на нижней границе расчетной области потенциал равен нулю, на верхней – U_H . Область 1 занимает электролит, область 2 газообразный или жидкий диэлектрик, а область 3 является

твёрдым диэлектриком, либо проводником. Выпишем теперь уравнения ионообмена в форме, представленной в [1]:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} = \text{div} \vec{J}_j + R_j, \quad (3)$$

$$\vec{J}_j = -D_j \text{grad} c_j - w_j c_j z_j F \text{grad} \phi + c_j \vec{V} \quad (4)$$

$$\text{div}(\epsilon_0 \epsilon \cdot \text{grad} \phi) = -F \sum_{j=1}^N z_j \frac{c_j}{M_j}, \quad (5)$$

где t – время, с; c_j – массовые концентрации компонентов; \vec{V} – гидродинамическая скорость среды, м/с; ϕ – электрический потенциал, В; w_j – скорость миграции ионов, м²/с; D_j – коэффициенты диффузии компонентов, м²/с; M_j – молярные массы, кг/моль; R_j – источник, характеризующий скорость химических реакций с участием j -го компонента; F – число Фарадея, Кул/моль; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, Ф; ϵ – коэффициент диэлектрической постоянной среды; \vec{J}_j – поток j -го компонента; z_j – заряд. В записанной системе уравнение (3) является условием сохранения j -го компонента, уравнение (4) определяет величину потока и последнее уравнение является уравнением Пуассона. Если к этим уравнениям добавить уравнения Навье–Стокса с учетом электрических сил, то будем иметь полную систему для численного моделирования конвективных течений. Однако в условиях порового пространства, масштаб которого составляет мм и меньше, без больших температурных и концентрационных градиентов, можно принять, что массовая скорость равна нулю. Основной сложностью решения уравнений (3) – (5) является появление при обезразмеривании уравнения Пуассона большого числа, которое требует при интегрировании малого шага по времени и устойчивой численной схемы. В данной работе используем известный метод решения [8], который привлекает к себе своей простотой и универсальностью и заключающийся во введении в уравнение Пуассона нестационарного члена с некоторым релаксационным коэффициентом, что приводит уравнение (5) к виду

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \beta \left[\text{div}(\epsilon_0 \epsilon \cdot \text{grad} \phi) - F \sum_{j=1}^N z_j \frac{c_j}{M_j} \right]. \quad (6)$$

В качестве граничных условий используем известные соотношения между потенциалами в разных областях и их градиентами [7; 8], которые запишем в виде:

$$\phi^I \Big|_{N-0} = \phi^K \Big|_{N+0}; \quad \epsilon^I \frac{\partial \phi^I}{\partial n} \Big|_{N-0} = \epsilon^K \frac{\partial \phi^K}{\partial n} \Big|_{N+0}, \quad (7)$$

где индексы определяют соответствующую область. В последнее условие в электродинамике включают плотность поверхностного заряда, как и в уравнении (1), однако в нашем случае будем считать его относящимся к области 1.

Результаты решения. Стационарные задачи. Аналитическое рассмотрение. Для получения некоторого представления действия электрического поля на электролит рассмотрим одномерную задачу в рамках модели, когда концен-

трации, например, бинарного раствора подчиняются распределению Больцмана, то есть имеем выражение следующего вида:

$$c_j = C_j \exp(\pm \gamma \varphi). \quad (8)$$

При постановке этих выражений в уравнение (5) и линеаризации, получаем классическое уравнение для исследования двойных электрических слоев [2]

$$\frac{d^2 \varphi}{d\zeta^2} = \chi^2 \varphi, \quad (9)$$

где $\zeta = x / H_1$; $\chi^2 = \gamma \rho F H_1^2 / \varepsilon_0 \varepsilon_1 M_G \cdot (m_1 C_1 + m_2 C_2)$. Из этого уравнения несложно получить аналитическое решение, которое показывает, что в результате наложения электрического поля потенциал на границе сред 1 и 2 при $\chi = 10^6$ будет иметь значения: $\varphi_h = 0,310 \cdot 10^{-8} U_H$ при $\varepsilon_2 = 1$; $\varphi_h = 0,981 \cdot 10^{-8} U_H$ при $\varepsilon_2 = 10$; $\varphi_h = 0,310 \cdot 10^{-7} U_H$ при $\varepsilon_2 = 100$. Полученные величины демонстрируют, что во-первых, линеаризация вполне правомочна, во-вторых, потенциал на границе двух сред пропорционален величинам U_H и $\varepsilon_2^{0.5}$.

Численное решение. Используя методы, разработанные в [3; 4], рассмотрим двумерные стационарные задачи для потенциала в системе, показанной на рис. 1. В случае, если область 3 является проводником, то в нем потенциал можно принимать постоянным (считаем $\varphi = 0$). Для случая диэлектрика используем граничное условие (7). В приграничных областях необходимо использовать аналитическое решение линейного уравнения (9), с помощью которого можно связать потенциал на границе с потенциалами в соседних по нормали к поверхности точках. При постоянном потенциале на вертикальной границе никаких затруднений процесс вычисления не вызывает. Как показано в [3; 4], в приграничных областях появляются слои с резкими изменениями потенциала по нормали к поверхности. Внутри области 1 потенциал практически равен нулю. Для электропроводящей стенки в угловой точке, где сходятся границы трех областей, потенциал также равен нулю, поэтому ошибка в вычислениях небольшая. В случае, если стенкой капилляра является диэлектрик, то в тройной точке необходимо выполнение выписанных граничных условий. Диэлектрические характеристики твердой поверхности вносят большое разнообразие в исследования, делая процесс микрофлюидики значительно сложнее, но с большими возможностями [10]. В этом случае одним из важных вопросов является определение потенциала в тройной точке. Так, для принятой в данной работе схемы вычислений это приводит к следующим значениям потенциала в данной точке при $\varepsilon_1 = 81$ и $\varepsilon_2 = 1$: $0,34 \cdot 10^{-2}$ (при $\varepsilon_3 = 1$); $0,68 \cdot 10^{-2}$ (при $\varepsilon_3 = 10$); $0,114 \cdot 10^{-1}$ (при $\varepsilon_3 = 100$), из которых видно, что они значительно превышают потенциал на поверхности между областями 1 и 2 и, соответственно между 1 и 3. Анализ граничных условий в тройной точке с разных ее сторон показывает, что здесь возникают большие ошибки, которые могут привести к ошибочному вычислению электрических сил, действующих на слой электролита. Вследствие этого, в окрестности тройной точки должна быть разработана определенная процедура вычисления потенциала с необходимой точностью в этой точке.

Результаты решения. Нестационарные задачи. Одномерный ионотенос. Как следует из формул (2), потенциал на границе фазовых областей играет важную роль, что и используется в микрофлюидике. Применение диэлектрических материалов дает возможность разнообразить способы получения необходимых величин потенциалов для управления микрокаплями. В [3; 4] показано, что в процессе диффузии диссоциированного компонента с большими отличиями коэффициентов диффузии в растворе электролита возникают внутренние градиенты потенциала, которые могут быть существенны и использоваться для управления. В качестве примера для слоя с фазовой поверхностью рассмотрим одномерную нестационарную задачу, в которой рассматривается диффузия ионов в области 1 при наложении перепада потенциала в указанных на рис. 1 точках ($U_H = 10B$).

В начальный момент концентрации положительных и отрицательных ионов в области 1 равны нулю. Они диффундируют из нижней области, где концентрация постоянна, к фазовой поверхности. Вследствие того, что коэффициент диффузии положительных ионов в два раза больше коэффициента диффузии отрицательных, происходит некоторое расслоение (рис. 2, 3), в результате чего нарушается электронейтральность, и в слое возникает перепад потенциала, который меняется со временем (рис. 4). На этом рисунке хорошо видно, что в некоторый момент времени электрический потенциал на поверхности достигает существенной величины, в результате чего сама поверхность под действием электрической силы может искривиться или вообще разрушиться (в данной работе это не рассматривается).

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что величина потенциала в данной модельной задаче получилась большой, что требует, например, другого подхода к вычислению потенциала на свободной поверхности, то есть линеаризация уравнений с получением уравнения (9) должна быть пересмотрена.

Ионотенос, обусловленный химическим взаимодействием компонентов на границе. Другим механизмом воздействия на поверхность может быть реакция компонентов на некотором участке границы. Рассмотрим простой случай, когда на электропроводной стенке с некоторого момента $t = 0$ происходит ассоциация ионов, т.е. $A^- + B^+ = AB$, при этом потоки компонентов на боковой поверхности будут равны:

$$g_{1,2} = \mp R \frac{\rho}{M_{2,1}} c_1 c_2. \quad (10)$$

И снова вследствие разницы в коэффициентах диффузии положительного и отрицательного ионотеносных компонентов на свободной поверхности будет образовываться слой с резким градиентом потенциала, который может быть использован при управлении слоем жидкости. На рис. 5, 6 и 7 показаны кривые концентраций c_1 , c_2 и потенциала ϕ соответственно в зависимости от безразмерной координаты $\eta = y/L$ (L – ширина поры) по контактной поверхности областей 1 и 2 для значений $U_H = 10B$, $R = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{моль} \cdot \text{с})$.

Из рис. 7 видно, что потенциал на поверхности областей 1 и 2 оказывается довольно заметным, причем в непосредственной близости к стенке, потенциал которой равен нулю. Для диэлектрической стенки эта величина может оказаться значительно больше, вследствие чего исследования по управлению микрокаплями на диэлектрических поверхностях приобретают в настоящий момент широкое развитие.

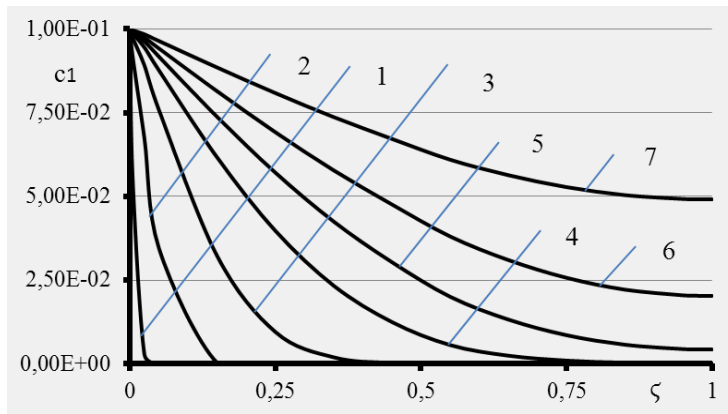


Рис. 2. Распределение компонента c_1 по оси слоя в зависимости от времени: 1 – $t = 2,81 \cdot 10^{-5}$ с; 2 – $t = 1,01 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – $t = 1,00 \cdot 10^{-2}$ с; 4 – $t = 4,00 \cdot 10^{-2}$ с; 5 – $t = 9,00 \cdot 10^{-2}$ с; 6 – $t = 1,80 \cdot 10^{-1}$ с; 7 – $t = 3,62 \cdot 10^{-1}$ с.

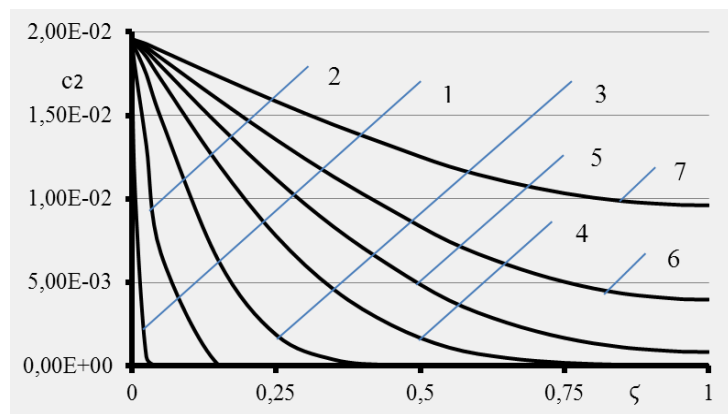


Рис. 3. Распределение компонента c_2 по оси слоя в зависимости от времени: 1 – $t = 2,81 \cdot 10^{-5}$ с; 2 – $t = 1,01 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – $t = 1,00 \cdot 10^{-2}$ с; 4 – $t = 4,00 \cdot 10^{-2}$ с; 5 – $t = 9,00 \cdot 10^{-2}$ с; 6 – $t = 1,80 \cdot 10^{-1}$ с; 7 – $t = 3,62 \cdot 10^{-1}$ с.

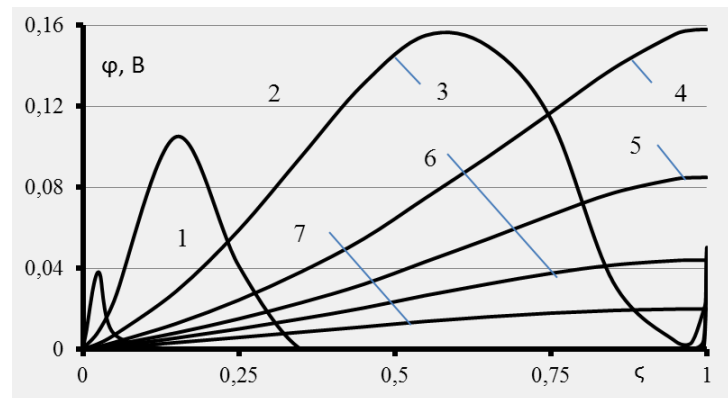


Рис. 4. Распределение потенциала ϕ по оси слоя в зависимости от времени: 1 – $t = 2,81 \cdot 10^{-5}$ с; 2 – $t = 1,01 \cdot 10^{-3}$ с; 3 – $t = 1,00 \cdot 10^{-2}$ с; 4 – $t = 4,00 \cdot 10^{-2}$ с; 5 – $t = 9,00 \cdot 10^{-2}$ с; 6 – $t = 1,80 \cdot 10^{-1}$ с; 7 – $t = 3,62 \cdot 10^{-1}$ с.

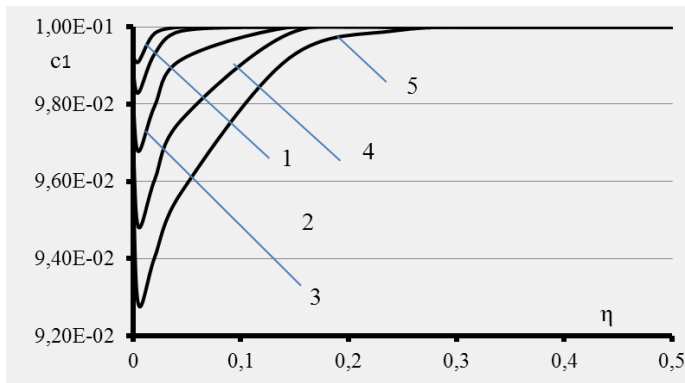


Рис. 5. Распределение компонента c_1 по поверхности в зависимости от времени: 1 $-t = 0,624 \cdot 10^{-4}$ с; 2 $-t = 1,884 \cdot 10^{-4}$ с; 3 $-t = 6,25 \cdot 10^{-4}$ с; 4 $-t = 1,63 \cdot 10^{-3}$ с; 5 $-t = 3,25 \cdot 10^{-3}$ с.

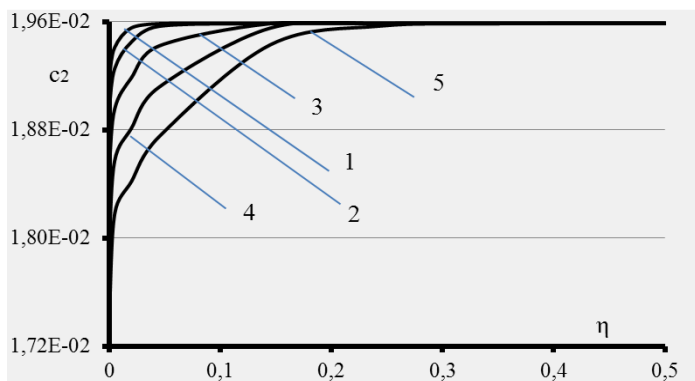


Рис. 6. Распределение компонента c_2 по поверхности в зависимости от времени: 1 $-t = 0,624 \cdot 10^{-4}$ с; 2 $-t = 1,884 \cdot 10^{-4}$ с; 3 $-t = 6,25 \cdot 10^{-4}$ с; 4 $-t = 1,63 \cdot 10^{-3}$ с; 5 $-t = 3,25 \cdot 10^{-3}$ с.

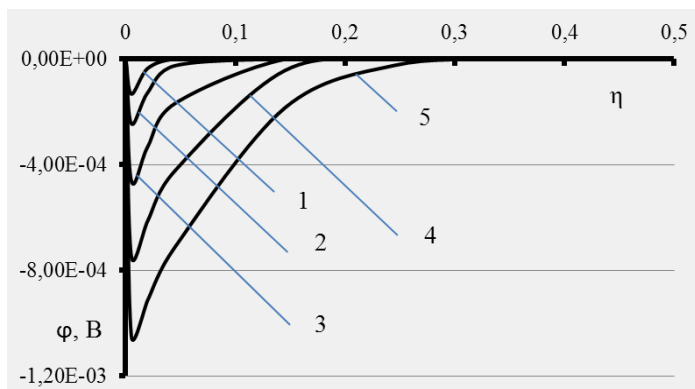


Рис. 7. Распределение потенциала φ по поверхности в зависимости от времени: 1 $-t = 0,624 \cdot 10^{-4}$ с; 2 $-t = 1,884 \cdot 10^{-4}$ с; 3 $-t = 6,25 \cdot 10^{-4}$ с; 4 $-t = 1,63 \cdot 10^{-3}$ с; 5 $-t = 3,25 \cdot 10^{-3}$ с.

В теоретическом плане, как это было указано выше, важное значение приобретают модельные задачи с учетом более точной отработки методики определения потенциала в точках стыка областей с различными физическими характеристиками.

Выводы. Как следует из решения задач, наложение управляющего напряжения на некоторый слой жидкости, имеющей в своем составе ионнесущие компоненты, вносит существенные изменения в распределение электрического потенциала как внутри слоя, так и в основном на границах слоя. В этом случае объектом рассмотрения становится не только сам слой жидкости, но и практически вся система, ввиду электрического взаимодействия составляющих областей. В связи с этим для теоретического описания процесса возникает необходимость в разработке метода вычисления потенциала в окрестности сходимости подобластей с различными электрическими свойствами.

Библіографічні посилання

1. **Волгин, В.М.** Численные методы моделирования нестационарного ионного переноса с учетом миграции в электрохимических системах [Текст] / В.М. Волгин, А.Д. Давыдов // Электрохимия. – 2001. – Т. 37. – № 11. – С. 1376 – 1385.
2. **Дамаскин, Д.Д.** Электрохимия [Текст] / Д.Д. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – М.: Химия, Колос, 2006. – 672с.
3. **Елисеев, В.И.** Диффузия компонентов электролита, образование двойного электрического слоя и устойчивость процесса [Текст] / В.И. Елисеев, Ю.П. Совит // Вісн. ДНУ. Сер.: Механіка. – 2016. – № 5(24). – Вип. 20. – С. 108 – 115.
4. **Елисеев, В.И.** Ионнообмен в ячейке солевого осадка на положительном электроде при разряде свинцово-кислотного аккумулятора [Текст] / В.И. Елисеев, Ю.П. Совит // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Зб. наук. праць. Дніпропетровськ. – 2014. – Т. XVII. – С. 112 – 120.
5. **Жакин, А.И.** Электродинамика [Текст] / А.И. Жакин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182. – №5. – С. 495 – 520.
6. **Левич, В.Г.** Курс теоретической физики. Том II. Электромагнитные процессы в веществе. Квантовая механика. [Текст] / В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин. – М.: Госиздат. Физматлит. – 1962. – 819с.
7. **Azam, Shaik. F.** Importance, Challenges and Solution of EWOD Platform droplet Actuation and Mixing [Text] / Shaik. F. Azam, Dr. H.N. Unni // IJETEE. – 2015. – Vol. 11. – P. 11 – 16.
8. **Chorin, A.J.** A numerical method for solving incompressible viscous flow problems [Text] / A.J. Chorin // J. Comput. Phys. – 1967. – Vol.2. – P. 12 – 26.
9. **Lu, H.-W.** A diffuse-interface model for electrowetting drops in a Hele-Shaw cell [Text] / H.-W. Lu, K. Glasner, A.L. Bertozzi, C.-J. Kim // J. Fluid Mech. – 2007. – Vol. 590. – P. 411 – 435.
10. **Ya- Pu, Zhao** Fundamentals and Applications of Electrowetting: A Critical Review [Text] / Ya-Pu Zhao, Ying Wang // Rev. Adhesion Adhesives. – 2013. – Vol. 1. – No. 1. – P. 114 – 174.

Надійшла до редколегії 25.05.18.