

УДК 303.732.4+514.84+515.1+530.1

UDC 303.732.4+514.84+515.1+530.1

01.00.00 Физико-математические науки

Physic and mathematics

**ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ
ДИССОЦИАЦИИ/РЕКОМБИНАЦИИ
МОЛЕКУЛ ВОДЫ НА ПЕРЕНОС 1:1
ЭЛЕКТРОЛИТА В МЕМБРАННЫХ
СИСТЕМАХ В ДИФфуЗИОННОМ СЛОЕ.
ЧАСТЬ 3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ
ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ
КОНВЕКЦИИ**

**THE INFLUENCE OF THE REACTION OF
DISSOCIATION / RECOMBINATION OF
MOLECULES OF WATER ON
TRANSPORTATION OF ELECTROLYTE 1: 1 IN
MEMBRANE SYSTEMS IN THE DIFFUSION
LAYER. PART 3. EVALUATION OF THE
POSSIBILITY OF THE EMERGENCE OF
GRAVITATIONAL CONVECTION**

Коваленко Анна Владимировна
к.э.н., доцент
Scopus Author ID: 55328224000
SPIN-код автора: 3693-4813
savanna-05@mail.ru

Kovalenko Anna Vladimirovna
Cand.Econ.Sci., associate professor
Scopus Author ID: 55328224000
SPIN-code: 3693-4813
savanna-05@mail.ru

Уртенев Махамет Али Хусеевич
д.ф.-м.н., профессор
Scopus Author ID: 6603363090
SPIN-код: 7189-0748
urtenovmax@mail.ru

Urtenov Makhamet Ali Khuseevich
Dr.Sci.Phys.-Math., professor
Scopus Author ID: 6603363090
SPIN-code: 7189-0748
urtenovmax@mail.ru

Письменский Александр Владимирович
к.ф.-м.н., доцент
Scopus Author ID: 13004856800
SPIN-код: 9932-7747
archer812@mail.ru
*Кубанский государственный университет,
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская, 149,*

Pismenskiy Alexander Vladimirovich
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor
Scopus Author ID: 13004856800
SPIN-code: 9932-7747
archer812@mail.ru
Kuban State University, Krasnodar, Russia

Данная статья является продолжением предыдущих работ авторов [Влияние реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды на перенос 1:1 электролита в мембранных системах в диффузионном слое. Часть 1. Математическая модель // Научный журнал КубГАУ, 2016. – №07(121) и Влияние реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды на перенос 1:1 электролита в мембранных системах в диффузионном слое. Часть 2. Асимптотический анализ // Научный журнал КубГАУ, 2016. – №08(122)] и посвящена оценке возможности возникновения гравитационной конвекции за счет рекомбинации ионов водорода и гидроксидов. В статье представлено решение краевой задачи, являющейся математической моделью электродиффузии четырех сортов ионов одновременно (двух ионов соли, а также ионов водорода и гидроксидов) в диффузионном слое в электромембранных системах с идеально селективной мембраной, с уравнением теплопроводности и уравнением Навье-Стокса. В статье показана возможность возникновения гравитационной конвекции за счет экзотермической реакции рекомбинации молекул воды в глубине раствора. В статье рассматривается реакция рекомбинации ионов водорода и

This article is a continuation of the previous works of the authors [The influence of reaction dissociation / recombination of molecules of water on transportation of electrolyte 1:1 in the membrane systems in the diffusion layer. Part 1. Mathematical model // Scientific journal of Kuban State Agrarian University, 2016. No. 07(121) and The influence of the reaction of dissociation / recombination of molecules of water on transportation of electrolyte 1: 1 in membrane systems in the diffusion layer. Part 2. Asymptotic analysis // Scientific journal of Kuban State Agrarian University, 2016. – №08(122)] and devoted to assessing the possibility of gravitational convection due to the recombination of hydrogen and hydroxyl ions. The article presents the solution of a boundary-value problem, which is a mathematical model of electrodiffusion for the four types of ions at the same time (two ions of salts and hydrogen and hydroxyl ions) in the diffusion layer in electro-membrane systems with ideal selective membrane, with the heat transfer equation and the Navier-Stokes equation. The article shows the possibility of the emergence of gravitational convection due to the exothermic reaction of recombination of water molecules in the depth of the solution. The article considered the reaction of recombination of hydrogen ions and hydroxyl, although the main results can be applied, after

гидроксила, хотя основные результаты могут быть применены, после соответствующих изменений, и к амфолит-содержащим растворам, таким как виноматериалы, соки, молочные продукты, продукты микробиологической переработки биомассы (аминокислоты, анионы многоосновных карбоновых кислот), муниципальные сточные воды (анионы фосфорной кислоты) и др

Ключевые слова: ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ, ЭЛЕКТРОКОНВЕКЦИЯ, ДИГИДРОФОСФАТ, РЕАКЦИЯ ДИССОЦИАЦИИ, РЕАКЦИЯ РЕКОМБИНАЦИИ МОЛЕКУЛ ВОДЫ, ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫЕ СИСТЕМЫ, ДИФФУЗИОННЫЙ СЛОЙ, РЕАКЦИОННЫЙ СЛОЙ, ИДЕАЛЬНО СЕЛЕКТИВНАЯ МЕМБРАНА

appropriate modifications, and to amfolit-containing solutions, such as wine, juices, dairy products, microbiological processing of biomass (amino acids, anions of polybasic carboxylic acids), municipal effluent (anions of phosphoric acid), etc.

Keywords: DIHYDROGEN PHOSPHATE, ELECTROCONVECTION, DISSOCIATION REACTION, RECOMBINATION REACTION OF MOLECULES OF WATER, ELECTRO-MEMBRANE SYSTEMS,

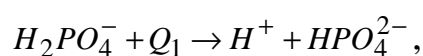
Введение

Реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды в растворе $NaCl$ происходят лишь в сверхпредельных токовых режимах. Однако существуют растворы, в которых подобные реакции происходят и при допредельных токах. Примерами являются многие амфолит-содержащие растворы: виноматериалы, соки, молочные продукты, продукты микробиологической переработки биомассы (аминокислоты, анионы многоосновных карбоновых кислот), муниципальные сточные воды (анионы фосфорной кислоты) и др. Молекулы амфолитов содержат одновременно и кислотные, и основные группы, и поэтому в водных растворах диссоциируют и как кислоты с отщеплением водородных ионов H^+ , и как основания с отщеплением гидроксильных ионов OH^- . Эти реакции также сопровождаются тепловыми эффектами.

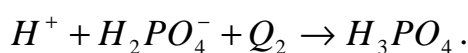
Экспериментальные вольт-амперные характеристики, полученные в амфолит-содержащих растворах дигидрофосфата натрия, свидетельствуют о существенном увеличении предельного и сверхпредельного тока при электродиализе амфолитов в вертикальном положении канала обессоливания (КО) по сравнению с горизонтальным положением, что свидетельствует о наличии в таких системах гравитационной конвекции

(ГК). В то же время при электродиализе в тех же условиях растворов, не содержащих амфолитов, например растворе $NaCl$, этот эффект не наблюдается, или наблюдается в значительно меньшей степени.

Это позволяет выдвинуть гипотезу, что основной причиной наблюдаемой ГК являются тепловые эффекты, возникающие наряду с другими эффектами концентрационной поляризации. Это поглощение теплоты на границе раствор/анионообменная мембрана (АО) в результате диссоциации (депротонирования) аниона-амфолита:



и поглощение теплоты на некотором удалении от межфазной границы в результате реакции рекомбинации (протонирования) с образованием молекулярной формы амфолита – фосфорной кислоты:



На то, что две эти реакции разнесены в пространстве, указывают вычисления, сделанные в рамках 1D трехслойной модели [7]. Согласно этой модели протоны появляются в обедненном диффузионном слое (ДС) вследствие их доннановского исключения из мембраны и рекомбинируют с однозарядными ионами (гидрокарбонатами) на некотором расстоянии от мембраны внутри ДС.

Нами будет рассматриваться реакция рекомбинации ионов H^+ и OH^- , хотя основные результаты могут быть применены и к амфолит-содержащим растворам, после соответствующих изменений.

Поскольку рекомбинация ионов H^+ и OH^- происходит в глубине раствора и при этом выделяется тепло в узком реакционном слое (РС), то это может привести к ощутимому неравномерному разогреву раствора, и как следствие к ГК. Для проверки этой гипотезы рассчитаем тепло выделяемое при рекомбинации ионов H^+ и OH^- , а затем, используя уравнения теплопроводности и Навье-Стокса рассчитаем течение раствора.

1. Оценка тепла выделяющегося при рекомбинации

Количество тепла выделяющегося при образовании I моль воды равно $56,6 \text{ кДж/моль}$ [4]. Следовательно, мощность Q источников тепла выделяющегося в каждой точке x пропорциональна количеству молей образующихся молекул воды $K_r C_3 C_4$, за вычетом количества дислоцирующих молекул $K_d C_{H_2O}$, с коэффициентом пропорциональности $56,6 \text{ кДж/моль}$, т.е.: $Q = 56,6 (K_r C_3 C_4 - K_d C_{H_2O})$.

Из формул (6) и (7) (см. [1]) получаем: $K_r C_3 C_4 - K_d C_{H_2O} = -\frac{d}{dx} j_3$.

Следовательно $Q = -56,6 \cdot 10^3 \frac{d}{dx} j_3$.

Поскольку вне РС j_3 постоянна, то $Q = 0$ вне РС. Количество тепла Q_w , которое выделяется в РС с единичным сечением за единицу времени:

$$Q_w = \int_0^h Q dx = \int_{x_1}^{x_2} Q dx = -56,6 \cdot 10^3 \int_{x_1}^{x_2} \frac{d}{dx} j_3 dx = -56,6 \cdot 10^3 (j_3(x_2) - j_3(x_1)),$$

где x_1 – левая граница, а x_2 – правая граница реакционного слоя, h – ширина диффузионного слоя (в статьях [1] и [2] он был обозначен δ).

Используя формулу для j_3 из [2] получаем $Q_w = 56,6 \cdot 10^3 \frac{1}{F} I_w$.

2. Оценка повышения температуры в реакционном слое

Выделение значительного количества тепла в РС может привести к ощутимому локальному повышению температуры в РС, что в свою очередь может вызвать гравитационную конвекцию.

2.1. Предварительная оценка повышения температуры

Для предварительной оценки распределения температуры предположим, что РС является изолированным и все выделяемое тепло равномерно распределяется, т.е. реакционный слой однороден.

Количество тепла, которое необходимо сообщить однородному изолированному телу, чтобы повысить его температуру на ΔT за единицу

времени равно $Q = cm\Delta T = \rho V\Delta T$, где c – удельная теплоемкость, m – масса тела, ρ – плотность тела, V – его объем. Если бы РС имел единичную глубину и длину, то его температура повысилась бы за счет количества тепла Q_w , выделяемого в таком РС на ΔT , где $\Delta T = \frac{Q_w}{c\rho V} = \frac{Q_w}{c\rho d}$, где d

ширина РС равная [2] $d \approx \frac{1}{150}h$. Поэтому, например, при $d = 10^{-4} \text{ см}$,

$c = 4,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{C}}$, имеем $\Delta T \approx 1,3 \text{ К}$. Температуру можно выразить через I_w :

$$\Delta T \approx 0.36 I_w.$$

Таким образом, повышение температуры, как и следовало ожидать, пропорционально плотности тока I_w . Так, например, при $I_w = 0.4 \text{ А}$, получаем $\Delta T \approx 1.4 \text{ К}$. Известно [5], что локальное повышение температуры на 1 К ведет к интенсивной гравитационной конвекции.

2.2 Определение распределения температуры с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с сосредоточенным мгновенным источником тепла

Очевидно, что полученная выше оценка повышения температуры РС является грубой «прикидкой», поскольку из-за теплообмена РС с окружающей частью ДС, а также последнего с окружающим раствором распределение температуры будет неравномерным. Для оценки распределения температуры с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с сосредоточенным мгновенным источником тепла, как и выше, предположим, что все тепло выделяется в РС. Так как, процесс рекомбинации происходит во много раз быстрее возникновения и развития ГК, можно предположить, что выделение тепла происходит сразу в начальный момент времени $t = 0$.

Поскольку, РС значительно меньше ДС, то предполагаем, что он стягивается в точку $x_1 = \theta h$ [2], а ДС бесконечно большим, причем вне диффузионного слоя поддерживается постоянная температура T_0 .

Для нахождения распределения температуры $T(t, x)$ в ДС воспользуемся одномерным нестационарным уравнением теплопроводности с внутренним точечным источником тепла, который выделяется в начальный момент времени (1) с начальным условием (2)

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w \delta(t, x - x_1), \quad (1)$$

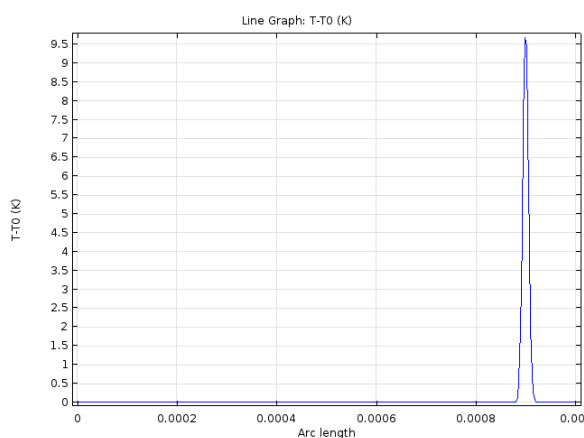
$$T(0, x) = T_0. \quad (2)$$

Решение задачи (1), (2) имеет вид [6]: $T(t, x) = T_0 + \frac{Q_w}{2c\rho\sqrt{\pi a^2 t}} e^{-\frac{(x-x_1)^2}{4a^2 t}}$.

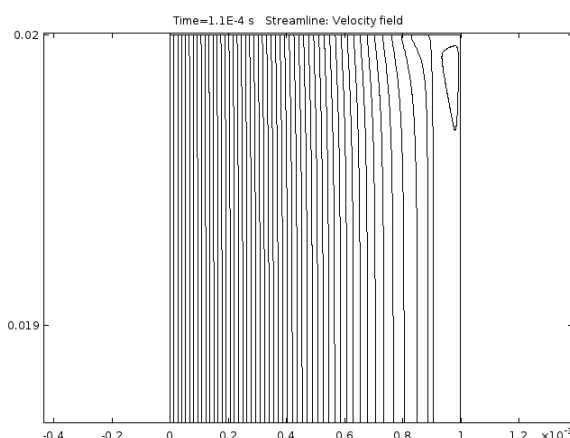
При $x = x_1$, получаем $T(t, x_1) = T_0 + \frac{Q_w}{2c\rho\sqrt{\pi a^2 t}} \rightarrow +\infty$, при $t \rightarrow 0+$, что

объясняется тем, что все тепло выделяется в этой точке. Если $x \neq x_1$, то $T(t, x) \rightarrow T_0$, при $t \rightarrow 0+$. Таким образом, изменение температуры происходит только в некоторой окрестности точки $x = x_1$ (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что гравитационная конвекция, начинаясь вблизи выхода из КО, достаточно быстро распространяется на весь КО.



а)



б)

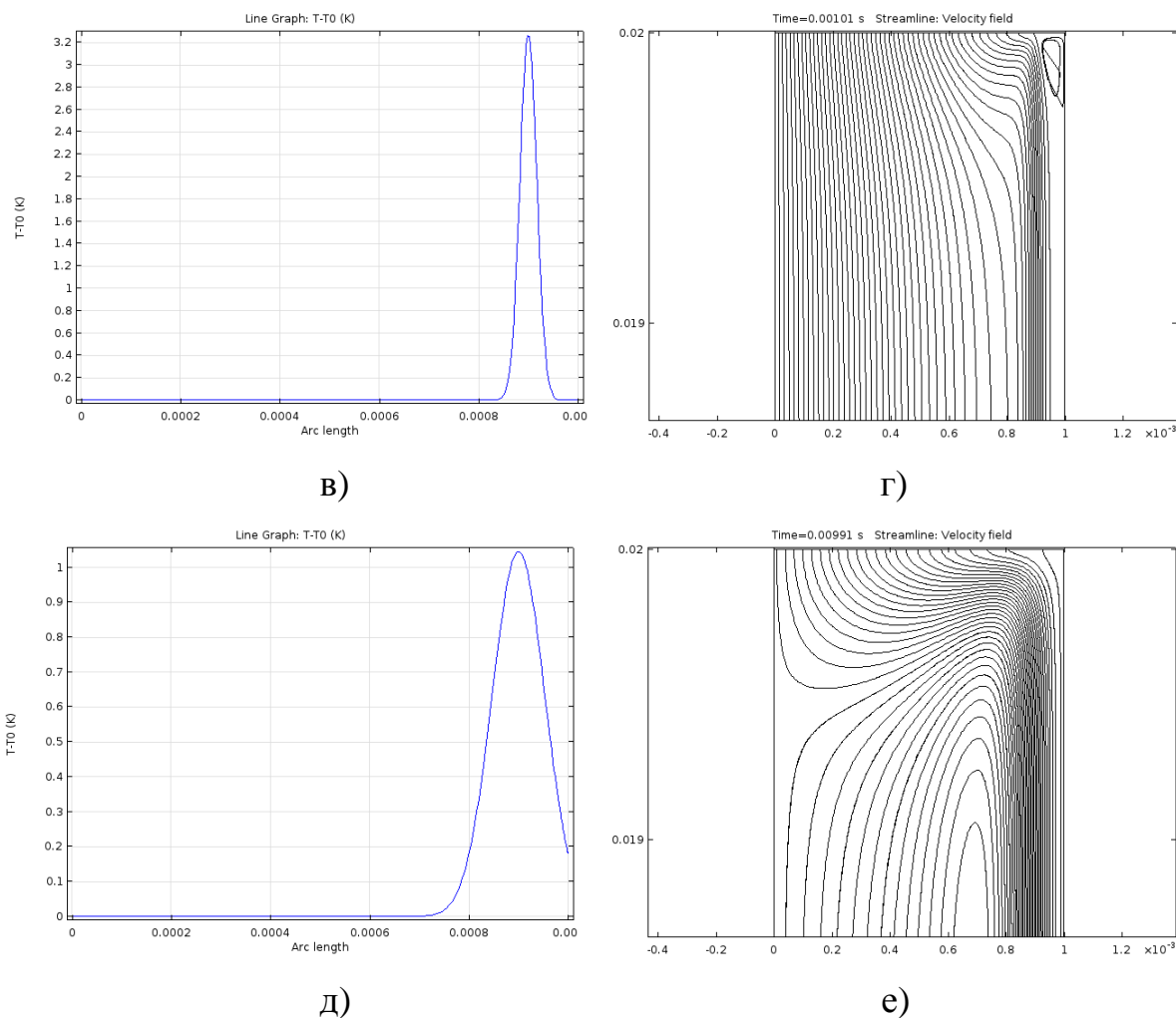


Рисунок 1. Распределение температуры в поперечном сечении канала и линий тока раствора при средней скорости протока 10^{-6} м/с при разных значениях времени: а) и б) при $t = 10^{-4}$ с, в) и г) $t = 10^{-3}$ с, д) и е) $t = 10^{-2}$ с.

2.3 Определение распределения температуры с помощью нестационарного уравнения теплопроводности с сосредоточенным постоянно действующим источником тепла

Поскольку реакция рекомбинации молекул воды происходит постоянно, то, в РС тепло выделяется постоянно и ГК, очевидно, будет более интенсивной.

В случае сосредоточенного постоянно действующего источника тепла в точке x_1 , краевая задача для температуры имеет вид:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q_w \delta(x - x_1), \quad (3)$$

с начальным условием $T(0, x) = T_0$ (4)

Решение этой задачи имеет вид [6]:

$$T(t, x) = T_0 + \frac{Q_w}{\sqrt{\pi c \rho}} \left(\frac{\sqrt{t}}{a} e^{-\frac{(x-x_1)^2}{4a^2t}} + \frac{\sqrt{\pi}|x-x_1|}{2a^2} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{|x-x_1|}{2a\sqrt{t}}\right) - 1 \right) \right). \quad (5)$$

Как видно на рис. 2, распределение температуры, как и в случае с мгновенным источником тепла, приводит к быстрому развитию ГК. Уже для времени $t = 0.1c$ (рис. 2г) хорошо заметно отклонение течения от Пуазейлевского и его сосредоточение в области повышенной температуры. При $t = 1c$ и в последующие моменты времени наблюдается развитое вихревое течение (рис. 2е). Причем скорость этого течения возрастает со временем. Например, профили скорости на рис. 3 показывают, что скорость вихря при $t = 10c$ почти в 2 раза выше, чем при $t = 1c$.

2.4 Определение распределения температуры с помощью стационарного уравнения теплопроводности с сосредоточенным источником тепла

Если предположить, что в глубине раствора и на межфазной границе поддерживается стационарное состояние, то можно ожидать, что распределение температуры со временем стационарно, тогда вместо уравнения (3) можно использовать стационарное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + f(t, x) = 0, \quad (6)$$

Предположим, как и выше, что:

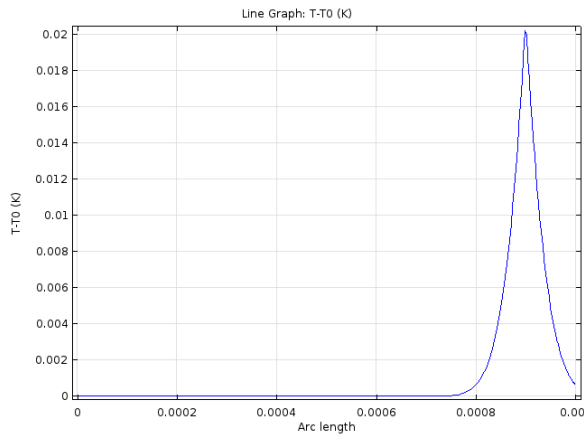
- 1) Все тепло выделяется в РС.
- 2) Так как, РС значительно меньше ДС, то предполагаем, что он стягивается в точку x_1 , а ДС значительно больше, причем вне диффузионного слоя поддерживается постоянная температура.

Тогда для определения температуры имеем уравнение (6), где

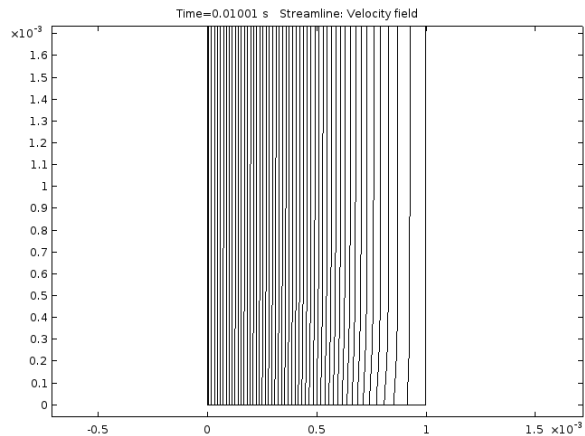
$$f(t, x) = Q\delta(x - x_1), \quad Q = 56,6 \cdot 10^3 \frac{D_3}{FD_4} I_w, \quad \text{т.е.} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q\delta(x - x_1) = 0 \quad \text{или}$$

$$kT'' + Q\delta(x - x_1) = 0 \quad (7)$$

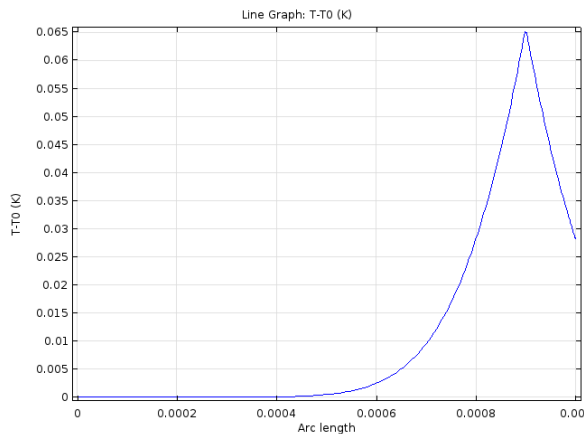
$$\text{с краевыми условиями } T(0) = T_0, \quad T(h) = T_0 \quad (8)$$



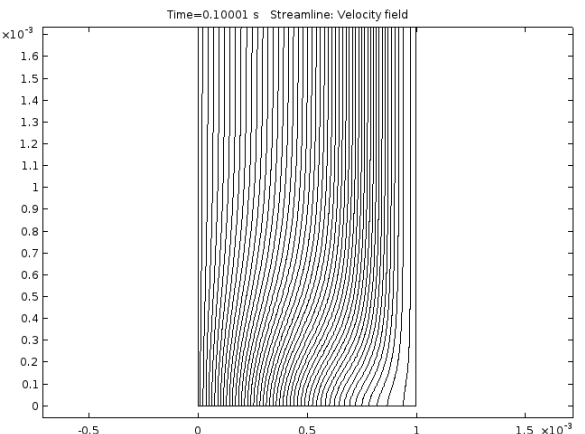
а)



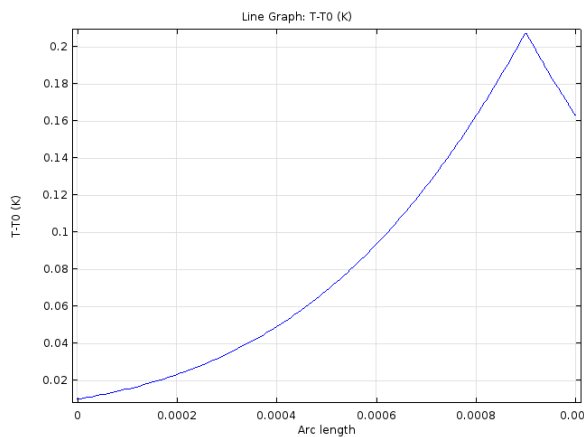
б)



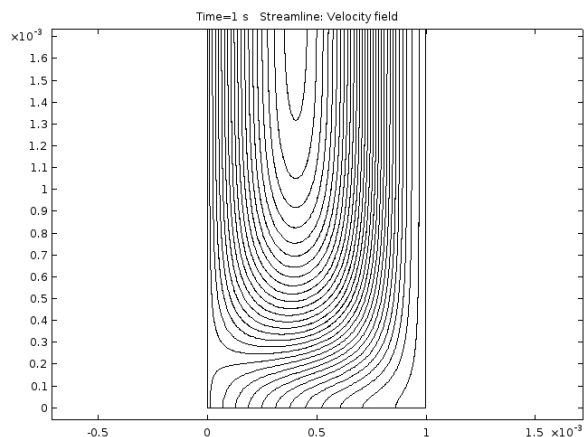
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2. Распределение температуры в поперечном сечении КО и линий тока раствора при средней скорости потока 10^{-6} м/с при разных значениях времени: а) и б) при $t = 10^{-2}$ с, в) и г) при $t = 10^{-1}$ с, д) и е) $t = 1$ с.

Замечание 1. Можно было бы предположить, что ДС бесконечно большой, и ставить краевые условия $T(-\infty) = T_0$, $T(+\infty) = T_0$. Однако уравнение (7), как несложно убедиться, с такими условиями решения не имеет.

Общее решение (7) имеет вид (9), где $\chi(x)$ – функция Хэвисайда.

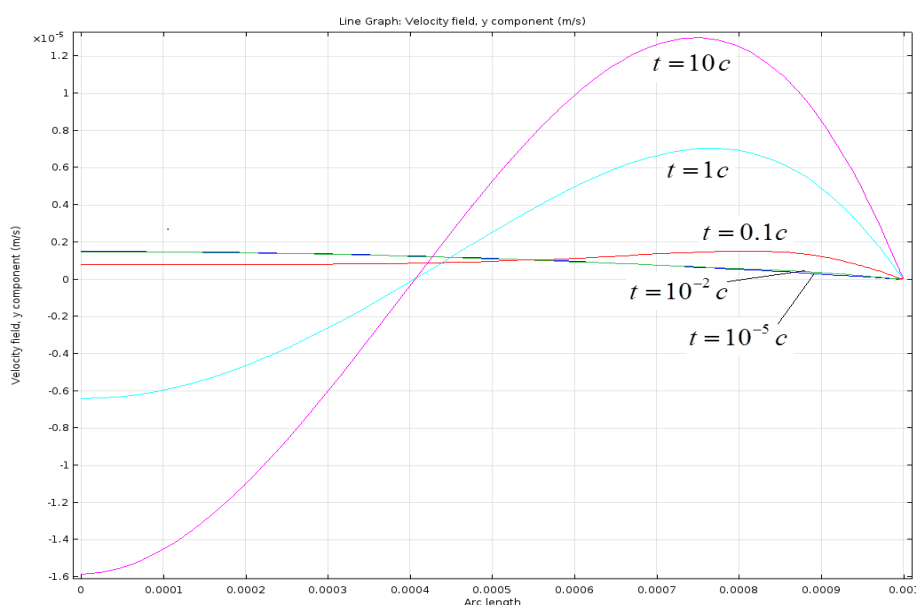


Рисунок 3. Динамика распределения продольной (y) составляющей скорости в поперечном сечении канала (посередине)

$$T(x) = -\frac{Q}{k}(x\chi(x-x_1) + C_1x) + C_2, \quad (9)$$

Найдем теперь C_1 и C_2 используя условия (6), тогда:

$$T(x) = -\frac{Q}{k}(x\chi(x-x_1) - x) + T_0 \quad (10)$$

2.4. Определение распределения температуры с помощью уравнения теплопроводности с распределенным источником тепла

Полученные выше в п.2.2 оценки можно уточнить с учетом того, что в нашем случае внутренние источники тепла непостоянны:

$$f(t, x) = f(t, x) = Q = -56,6 \cdot 10^3 \frac{d}{dx} j_3,$$

тогда вместо (7) можно использовать уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 56,6 \cdot 10^3 \frac{d}{dx} j_3. \quad (11)$$

Интегрируя один раз (11) получим (12), где a постоянная интегрирования.

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = 56,6 \cdot 10^3 \cdot j_3 + a, \quad (12)$$

Поскольку ДС занимает небольшую часть КО, то можно предположить, что в ядре потока температура постоянна, т.е. при $x = 0$ поддерживается постоянная температура $T(0) = T_0$. Интегрируя уравнение (12) еще раз от 0 до произвольного x , получим:

$$T(x) = T_0 + \frac{a}{k} x + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \int_0^x j_3(s) ds. \quad (13)$$

Из [2] следует, что $j_3 = \frac{1}{F} I_W$, при $x \in [0, x_1]$, где $x_1 = (\theta - \sqrt{\mu} |\ln \mu|) h$ и $j_3 = 0$, при $[x_2, h]$, где $x_2 = (\theta + \sqrt{\mu} |\ln \mu|) h$. Поэтому при $x \in [0, x_1]$, получаем

$$T(x) = T_0 + \frac{1}{k} \left(a + \frac{56,6 \cdot 10^3}{F} \cdot I_W \right) x, \text{ а при } [x_2, h]:$$

$$T(x) = T_0 + \frac{a}{k} x + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \int_0^{x_1} j_3(s) ds + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \int_{x_1}^{x_2} j_3(s) ds + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \int_{x_2}^x j_3(s) ds$$

Так как $j_3 = 0$, при $[x_2, h]$, последний интеграл равен нулю, интеграл

$$\int_{x_1}^{x_2} j_3(s) ds \text{ мал, а } \int_0^{x_1} j_3(s) ds = \frac{1}{F} I_W x_1, \text{ то } T(x) \approx T_0 + \frac{a}{k} x + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \frac{1}{F} I_W x_1.$$

3) Поскольку отрезок $[x_1, x_2]$ мал, то предыдущие формулы можно продолжить на него по непрерывности.

Остается определить постоянную интегрирования a исходя из краевого условия при $x = h$. Постановка краевого условия при $x = h$ затруднено тем, что $x = h$ является межфазной границей, в которой происходят сложные процессы. Наиболее существенными из них являются

эндотермическая реакция диссоциации молекул воды и джоулев нагрев раствора при прохождении тока, поэтому краевое условия при $x = h$ зависит от соотношения интенсивности этих процессов. В соответствии с эти рассмотрим разные варианты краевого условия при $x = h$.

1) Предположим процессы диссоциации молекул воды и джоулев нагрев раствора уравновешивают друг – друга и температура при $x = h$ остается неизменной, поэтому $T(h) = T_0$. Тогда определяя a из условия

$$T(h) = T_0 + \frac{a}{k}h + \frac{56,6 \cdot 10^3}{k} \cdot \frac{1}{F} I_W \theta h = T_0, \quad \text{получаем} \quad a = -\frac{56,6 \cdot 10^3}{F} \cdot I_W \theta,$$

следовательно, функция $T(x)$ имеет вид $T(x) = T_0 + \frac{56,6 \cdot 10^3}{kF} (1 - \theta) I_W x$, при

$$x \in [0, \theta h]. \quad T(x) = T_0 + \frac{56,6 \cdot 10^3}{kF} \theta I_W (h - x), \quad \text{при } x \in [\theta h, h].$$

Таким образом, функция $T(x)$ на отрезке $[0, \theta h]$ линейно растет от

$$T_0 \text{ до } T_{max} = T_0 + \frac{56,6 \cdot 10^3}{kF} (1 - \theta) \theta I_W, \text{ а на отрезке } [\theta h, h] \text{ линейно падает до } T_0.$$

2) Джоулев нагрев раствора преобладает, по крайней мере, вначале, над охлаждающим эффектом диссоциации молекул воды. Этот случай рассматривается ниже в п.3.

3. Учет джоулевого нагрева раствора

Вблизи межфазной границы происходит джоулев разогрев раствора из-за прохождения тока и одновременно в мембране происходит эндотермическая реакция диссоциации молекул воды при котором поглощается то же количества тепла, что выделяется при рекомбинации. Оценим количество тепла $Q_{Дж}$ выделяемого при джоулевом нагреве

$$\text{раствора } Q_{Дж} = I \cdot \Delta \varphi = 10 \frac{mA}{cm^2} \cdot 1V = 10 \cdot 10^{-3} \frac{Вт}{cm^2} = 10^{-2} \frac{Дж}{cm^2 \cdot c}.$$

Т.О., количество тепла, выделяемое при джоулевом разогреве раствора на два порядка больше, чем поглощается из-за реакции

диссоциации молекул воды. Поэтому можно считать, что на границе имеется точечный источник тепла мощностью $Q_{Дж}$. Это может быть смоделировано также как выше в виде точечного источника в некоторой точке $x_2 > x_1$.

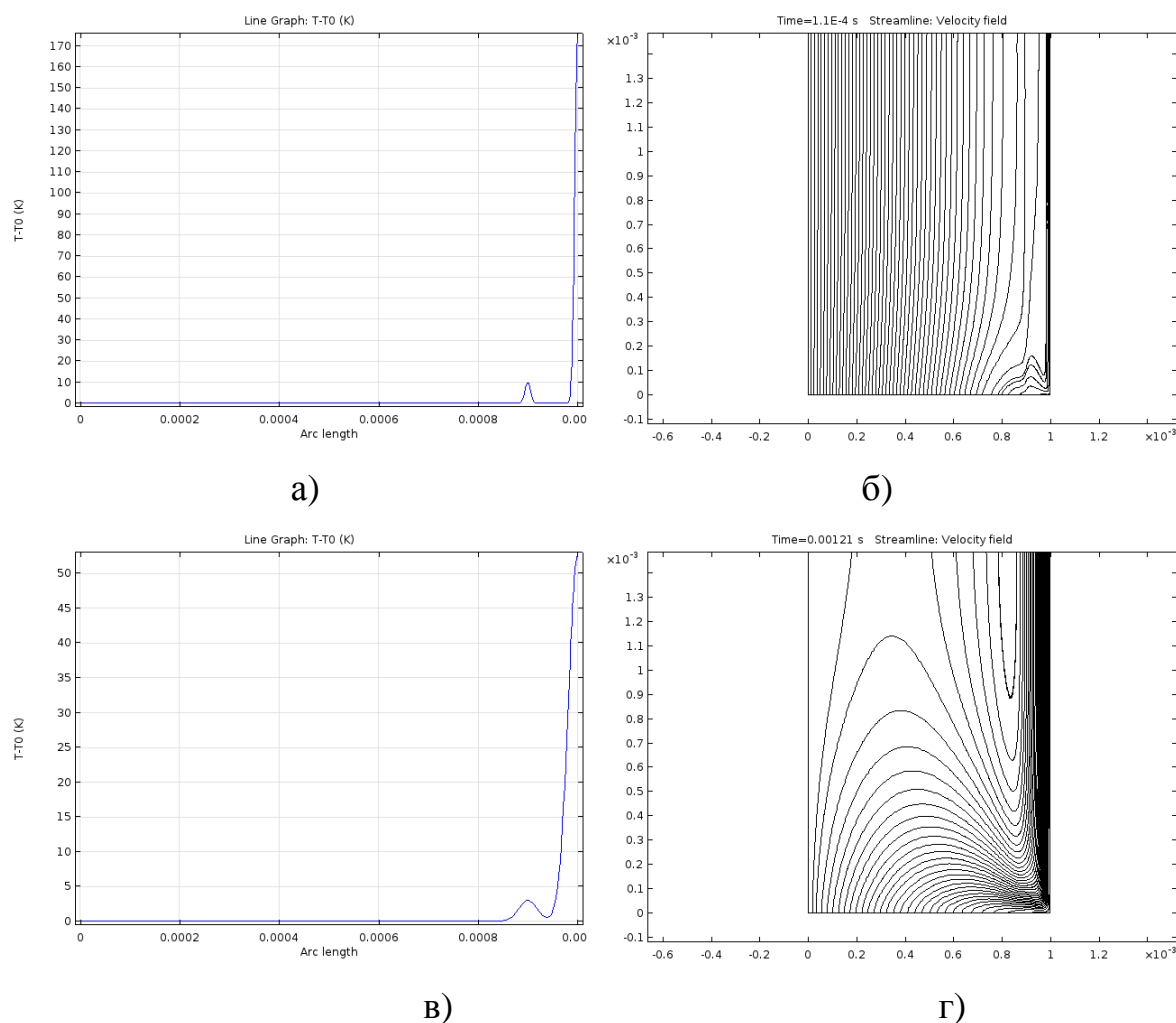


Рисунок 4. Распределение температуры и линии тока раствора при разных временах: а) и б) при $t = 10^{-4}$ с; в) и г) при $t = 10^{-3}$ с.

Если предположить, что выделение тепла происходит только в начальный момент времени, то учитывая результаты п.2, и воспользовавшись принципом суперпозиции для линейных уравнений,

получим
$$T(t, x) = T_0 + \frac{Q_w}{2c\rho\sqrt{\pi a^2 t}} e^{-\frac{(x-x_1)^2}{4a^2 t}} + \frac{Q_{Дж}}{2c\rho\sqrt{\pi a^2 t}} e^{-\frac{(x-x_2)^2}{4a^2 t}},$$
 график

которой и соответствующие линии тока раствора приведены на рис.4.

Из рис. 4 следует, что в начальные моменты времени, ГК в основном определяется джоулевым нагревом раствора.

Однако следует учесть, что в последующем, из-за ГК концентрационная поляризация будет сглаживаться, и, соответственно, сопротивление раствора будет снижаться. Поэтому роль джоулевого нагрева раствора в ГК будет снижаться. В то же время, выделение тепла в РС остается примерно на одном уровне. Следовательно, возникает проблема создания 2D математической модели гравитационной конвекции с учетом тепловых эффектов при рекомбинации молекул воды и джоулевого нагрева раствора и исследования гравитационной конвекции с использованием этой модели.

Заключение. В статье показана возможность возникновения гравитационной конвекции за счет экзотермической реакции рекомбинации молекул воды в глубине раствора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов: № 16-08-00128 А "Теоретическое и экспериментальное исследование гравитационной конвекции в мембранных системах с учетом реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды", № 16-48-230856 р_а "Теоретическое и экспериментальное исследование влияния тепловых эффектов на гравитационную конвекцию в мембранных системах с амфолитами".

Библиографический список

1. Коваленко А.В. Влияние реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды на перенос 1:1 электролита в мембранных системах в диффузионном слое. Часть 1. Математическая модель / Коваленко А.В., Уртенев М. Али Х., Сеидова Н.М., Письменский А.В. // Научный журнал КубГАУ, 2016. – №07(121). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/122.pdf>

2. Коваленко А.В. Влияние реакции диссоциации/рекомбинации молекул воды на перенос 1:1 электролита в мембранных системах в диффузионном слое. Часть 2. Асимптотический анализ / Коваленко А.В., Уртенев М.-Али Х., Сеидова Н.М., Письменский А.В. // Научный журнал КубГАУ, 2016. – №08(122). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/08/pdf/17.pdf>

3. Belashova E.D., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Sistat P., Pourcelly G. Current voltage curve of an anion exchange membrane in a monosodium phosphate solution. Modelling and experiment.

4. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. –Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с.

5. Певницкая, М.В. Интенсификация массопереноса при электродиализе разбавленных растворов // Электрохимия. 1992. – Т.28, № 11. – С. 1708-1715.

6. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Учебное пособие для вузов. – 5-е изд. – М.: Наука, 1977. – 735 с.: ил.

7. Nikonenko, V., Lebedev K., Manzanares J.A., Pourcelly G. // Electrochim. Acta. 2003. V.48, N 24. P.3639-3650.

References

1. Kovalenko A.V. Vlijanie reakcii dissociacii/rekombinacii molekul vody na perenos 1:1 jelektrolita v membrannyh sistemah v diffuzionnom sloe. Chast' 1. Matematicheskaja model' / Kovalenko A.V., Urtenov M. Ali H., Seidova N.M., Pis'menskij A.V. // Nauchnyj zhurnal KubGAU, 2016. – №07(121). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/122.pdf>

2. Kovalenko A.V. Vlijanie reakcii dissociacii/rekombinacii molekul vody na perenos 1:1 jelektrolita v membrannyh sistemah v diffuzionnom sloe. Chast' 2. Asimptoticheskij analiz / Kovalenko A.V., Urtenov M.-Ali H., Seidova N.M., Pis'menskij A.V. // Nauchnyj zhurnal KubGAU, 2016. – №08(122). – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2016/08/pdf/17.pdf>

3. Belashova E.D., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Sistat P., Pourcelly G. Current voltage curve of an anion exchange membrane in a monosodium phosphate solution. Modelling and experiment.

4. Volkov A.I., Zharskij I.M. Bol'shoj himicheskij spravocnik. –Mn.: Sovremennaja shkola, 2005. – 608 s.

5. Pevnickaja, M.V. Intensifikacija massoprenosa pri jelektrodialize razbavlennyh rastvorov // Jelektrohimija. 1992. – Т.28, № 11. – С. 1708-1715.

6. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoi fiziki. Uchebnoe posobie dlja vuzov. – 5-e izd. – М.: Nauka, 1977. – 735 с.: ил.

7. Nikonenko, V., Lebedev K., Manzanares J.A., Pourcelly G. // Electrochim. Acta. 2003. V.48, N 24. P.3639-3650.