

СОДЕРЖАНИЕ

Демехин Е. А., Барышев М. Г., Ганченко Г. С., Горбачева Е. В. Об одном способе выпрямления тока в микромасштабах .....	3
Станкевич С. В., Швецов Г. А. Предельные кинематические характеристики рельсовых электромагнитных ускорителей с металлическим якорем во внешнем магнитном поле .....	14
Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н. О механизме автоколебаний при натекании сверхзвуковой струи на преграду. 2. Преграда без угла .....	21
Пивоваров Ю. В. Расчет процесса сближения двух сферических капель, находящихся в среде Бингама .....	29
Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В. Экспериментальное исследование нелинейных процессов в пограничном слое на скользящем крыле при числе Маха $M = 2$ .....	45
Иванова А. А., Козлов В. Г., Щипицын В. Д. Подъемная сила, действующая на цилиндрическое тело в жидкости вблизи границы полости, совершающей поступательные колебания .....	55
Фарруджа П. С., Микалеф А. Решения в виде степенных рядов для ламинарных факелов в окружающей среде .....	64
Агтия Х. А., Абдин М. А. М., Эльбарави М. Т. М. М. Влияние ионного скольжения на стационарное течение в круглой трубе запыленной проводящей жидкости Олдройда, определяемой восьмью константами .....	78
Болеста А. В., Фомин В. М. Молекулярно-динамическое моделирование поликристаллической меди .....	86
Петров А. Г., Потапов И. И. Перенос наносов под действием нормальных и касательных придонных напряжений с учетом уклона дна .....	100
Пеньковский В. И., Корсакова Н. К., Нестерова Г. В. Влияние температуры фильтра бурового раствора на удельное электрическое сопротивление пласта, насыщенного нефтью и газом .....	106
Бочкарев А. А., Полякова В. И. Эмиссия димеров со свободной поверхности нагретой воды .....	115
Сибиряков Е. Б. Зависимость эффективных упругих модулей кавернозных тел от частоты .....	126

<b>Паймушин В. Н.</b> Соотношения теории тонких оболочек типа теории Тимошенко при произвольных перемещениях и деформациях .....	135
<b>Тиббун В., Мерджах М., Бенраху К. Х., Тунси А.</b> Термоупругая задача о выпучивании толстых пластин, изготовленных из функционально-градиентного материала .....	150
<b>Адамов Н. П., Пузырев Л. Н., Харитонов А. М., Часовников Е. А., Дядькин А. А., Крылов А. Н.</b> Демпфирующие характеристики возвращаемого аппарата при гиперзвуковых скоростях .....	165
<b>Тихомиров В. М.</b> Определение коэффициентов интенсивности напряжений в трехмерных задачах механики разрушения .....	172
<b>Степанова Л. В., Адылина Е. М.</b> Напряженно-деформированное состояние в окрестности вершины трещины в условиях смешанного нагружения .....	181
<b>Савенков Г. Г., Мещеряков Ю. И., Барахтин Б. К., Лебедева Н. В.</b> Механизмы деформации и разрушения и структурные изменения в крупнокристаллической меди в условиях ударно-волнового нагружения .....	195
<b>Вниманию авторов</b> .....	204

Адрес редакции:

630090, Новосибирск, Морской просп., 2, редакция журнала  
«Прикладная механика и техническая физика»  
Тел. 330-40-54; e-mail: pmtf@sibran.ru

Зав. редакцией *О. В. Волохова*

Корректор *Л. Н. Ковалева*

Технический редактор *Д. В. Нечаев*

Набор *Д. В. Нечаев*

---

Сдано в набор 04.07.14. Подписано в печать 09.09.14. Формат 60 × 84 1/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 24,0. Уч.-изд. л. 19,5. Тираж 305 экз. Свободная цена. Заказ № 158.

---

Журнал зарегистрирован Министерством печати и информации РФ за № 011097 от 27.01.93.

Издательство Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, Морской просп., 2.

Отпечатано на полиграфическом участке Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева.  
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15.

© Сибирское отделение РАН, 2014

© Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2014

© Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН, 2014

УДК 532.517.013.4 : 537.2

## ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ВЫПРЯМЛЕНИЯ ТОКА В МИКРОМАСШТАБАХ

Е. А. Демехин<sup>\*,\*\*</sup>, М. Г. Барышев<sup>\*</sup>, Г. С. Ганченко<sup>\*</sup>, Е. В. Горбачева<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Кубанский государственный университет, 350040 Краснодар, Россия

<sup>\*\*</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 117192 Москва, Россия

E-mails: edemekhi@gmail.com, science-prp@kubsu.ru, ganchenko.ru@gmail.com, katya1911@list.ru

Предложен способ выпрямления электрического тока в устройствах, имеющих микро- и наномасштабы, основанный на асимметричной концентрационной поляризации в растворе электролита, в случае когда ток в микродиоде последовательно проходит через две взаимно нерастворяющиеся жидкости с различными диэлектрическими проницаемостями и коэффициентами диффузии, находящиеся в трубках с различными геометрическими размерами. Предполагается, что в обеих жидкостях содержатся ионы полностью диссоциированного вещества, обеспечивающие перенос электрического заряда при наложении разности потенциалов на стенки устройства, а на поверхности раздела двух жидкостей имеется заряд. Процесс описывается одномерной нестационарной системой Нернста — Планка — Пуассона. В качестве краевых условий на электродах используются условия непроницаемости для анионов и уравнение Аррениуса, задающее поток катионов. Система уравнений решалась численно: по пространственной переменной неизвестные раскладывались по полной системе ортогональных функций, полученная динамическая система относительно коэффициентов Галеркина интегрировалась по времени методом Гира вследствие ее жесткости. Выявлены параметры системы, оказывающие наиболее значительное влияние на степень выпрямления, и оценены их оптимальные значения.

**Ключевые слова:** нано- и микротечения, уравнения Нернста — Планка — Пуассона, концентрационная поляризация, электролит, двойной ионный слой, нано- и микродиоды, квазиспектральный метод Галеркина,  $\tau$ -вариант метода Галеркина, жесткие системы, метод Гира.

**Введение.** Микрофлюидная технология появилась в конце 90-х гг. XX в., когда были созданы хроматографы, микронасосы, микроклапаны, датчики расхода, имеющие размеры порядка  $10^{-6}$  м. Современные технологии предполагают интегрирование микро- и наноразделений, смешивания и анализа различных процессов в одном микрочипе. Такие технологии называют лабораторией на чипе (lab-on-chip). В устройствах данного типа часто используются электрокинетические способы переноса, смешивания, разделения различных субстанций. Важным способом, который применяется в лаборатории на чипе и исследуется в настоящей работе, является выпрямление электрического тока.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-08-00924-а, 11-08-00480-а).

© Демехин Е. А., Барышев М. Г., Ганченко Г. С., Горбачева Е. В., 2014

Новые способы выпрямления тока в растворе электролита, в отличие от известного полупроводникового способа, были предложены в 60-х гг. XX в. Сходство процессов переноса заряда в полупроводниках и водных растворах щелочей и кислот положено в основу простых экспериментов с биполярными ионообменными мембранами [1], в которых имело место выпрямление тока. Позднее было обнаружено, что биологические мембраны обладают аналогичными свойствами. В [2] описаны эксперименты по выпрямлению тока при использовании асимметричных кварцевых электродов в форме нанопипет; пространство между пипетами было заполнено электролитом. Целью работы [2] являлось улучшение качества работы сканирующего микроскопа.

Работы [3, 4] посвящены исследованию ректификации и стробирования в заполненных электролитом геометрически симметричных наноканалах с неоднородным распределением поверхностного заряда. В частности, рассмотрен случай, когда в разных частях канала поверхностный заряд имел разные знаки. В экспериментах зафиксировано выпрямление тока при сильной зависимости этого процесса от параметров устройства.

Другая конструкция устройства была предложена в работе [5], в которой исследовался перенос жидкостей в малой конической поре размером порядка  $10^{-6}$  м с рядом малых отверстий размером несколько десятков нанометров и больших отверстий размером несколько сотен нанометров. Авторы [5] не только выявили и рассмотрели процесс выпрямления и стробирования в данном устройстве, но и улучшили качество выпрямления (отношение положительного значения силы тока к модулю ее отрицательного значения) при наложении градиента концентрации.

В [6] изучен процесс выпрямления тока в случае специально подобранной геометрии наноканала. Не описывая подробно конструкцию устройства, отметим наличие геометрической симметрии электродов и асимметрии в области, занятой электролитом.

В работе [7] рассмотрены каналы, расширяющиеся в направлении от одного электрода к другому; использовалась как одна nanoщель, так и система nanoщелей. Установлено, что явление выпрямления тока обусловлено геометрической асимметрией устройств независимо от того, применялась ли одна щель или их система. Таким образом, общим для жидкостных микро- и нанодиодов является то, что ректификационный эффект обусловлен тем или иным видом асимметрии.

Все указанные выше работы являются экспериментальными. В некоторых из них приводятся качественное объяснение наблюдавшихся эффектов и простые инженерные модели, однако асимптотические подходы и точные численные решения задач о жидкостных нанодиодах, предназначенных для выпрямления тока в микромасштабах, отсутствуют. В данной работе предлагается простая схема выпрямляющего устройства, состоящего из двух микроканалов с различной геометрией, заполненных жидкостями с различными диэлектрическими проницаемостями и коэффициентами диффузии. Таким образом, в схеме присутствуют различные виды асимметрии. Предполагалось, что микроканалы содержат ионы полностью диссоциированного вещества, а на границе раздела имеется поверхностный заряд. При описании электрохимических процессов хорошим приближением являются нестационарные нелинейные уравнения Нернста — Планка — Пуассона. В качестве крайних условий используются условия непроницаемости для анионов и уравнение Аррениуса для катионов. Нелинейность системы и сложные крайние условия затрудняют получение ее аналитического решения, поэтому был разработан метод точного численного решения. В окрестности электродов и на границах раздела жидкостей имеются двойные ионные слои с резким изменением характеристик, поэтому для дискретизации по пространственной переменной применялся метод Галеркина с полиномами Чебышева в качестве базисных функций. Сгущение нулей полиномов Чебышева на границах интервала их определения позволяет достичь лучшего разрешения схемы в области двойных ионных слоев. Так как

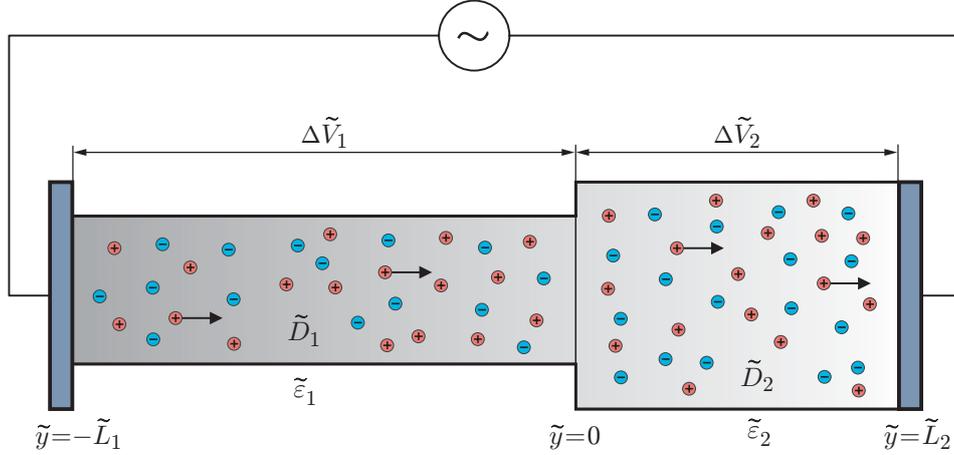


Рис. 1. Схема задачи

полиномы Чебышева не удовлетворяют краевым условиям задачи, применялся  $\tau$ -вариант метода Галеркина. Вследствие значительной жесткости динамической системы относительно коэффициентов Галеркина она интегрировалась по времени методом Гира.

**1. Постановка задачи.** Рассматривается тонкая трубка, заполненная двумя жидкостями с различными коэффициентами диффузии  $\tilde{D}_1$  и  $\tilde{D}_2$ , диэлектрическими проницаемостями  $\tilde{\varepsilon}_1$ ,  $\tilde{\varepsilon}_2$  и площадями поперечного сечения  $\tilde{A}_1$ ,  $\tilde{A}_2$  (рис. 1). На рис. 1  $\Delta\tilde{V}_1$ ,  $\Delta\tilde{V}_2$  — разности потенциалов в каждой из областей; знак “ $\sim$ ” соответствует размерной величине. В обеих жидкостях предполагается наличие ионов некоторой полностью диссоциированной субстанции. Стенки трубки считаются изоляторами; на торцах трубки помещены электроды, разность потенциалов на которых меняется по синусоидальному закону. Электроды слева и справа идентичны, поэтому в них происходят одни и те же реакции.

Уравнения переноса одновалентных катионов  $\tilde{c}^+$  и анионов  $\tilde{c}^-$  и уравнение Пуассона для электрического потенциала  $\tilde{\Phi}$  для первой жидкости в области  $-\tilde{L}_1 < \tilde{y} < 0$  имеют вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{c}^+}{\partial \tilde{t}} &= \frac{\tilde{D}_1 \tilde{F}}{\tilde{R} \tilde{T}} \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left( \tilde{c}^+ \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{y}} \right) + \tilde{D}_1 \frac{\partial^2 \tilde{c}^+}{\partial \tilde{y}^2}, \\ \frac{\partial \tilde{c}^-}{\partial \tilde{t}} &= -\frac{\tilde{D}_1 \tilde{F}}{\tilde{R} \tilde{T}} \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left( \tilde{c}^- \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{y}} \right) + \tilde{D}_1 \frac{\partial^2 \tilde{c}^-}{\partial \tilde{y}^2}, \\ \frac{\partial^2 \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{y}^2} &= \frac{\tilde{F}}{\tilde{\varepsilon}_1} (\tilde{c}^- - \tilde{c}^+).\end{aligned}$$

Уравнения для второй жидкости в области  $0 < \tilde{y} < \tilde{L}_2$  аналогичны:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{s}^+}{\partial \tilde{t}} &= \frac{\tilde{D}_2 \tilde{F}}{\tilde{R} \tilde{T}} \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left( \tilde{s}^+ \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{y}} \right) + \tilde{D}_2 \frac{\partial^2 \tilde{s}^+}{\partial \tilde{y}^2}, \\ \frac{\partial \tilde{s}^-}{\partial \tilde{t}} &= -\frac{\tilde{D}_2 \tilde{F}}{\tilde{R} \tilde{T}} \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left( \tilde{s}^- \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{y}} \right) + \tilde{D}_2 \frac{\partial^2 \tilde{s}^-}{\partial \tilde{y}^2}, \\ \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{y}^2} &= \frac{\tilde{F}}{\tilde{\varepsilon}_2} (\tilde{s}^- - \tilde{s}^+).\end{aligned}$$