

Интерфейс на основе трековой мембраны для полевого испарения ионов из полярных растворов в диффузионно-дрейфовом режиме

© А.А. Балакин, Е.А. Буйдо

Филиал института энергетических проблем химической физики РАН,
142432 Черноголовка, Московская область, Россия
e-mail: balakin@biner.ac.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2013 г.)

Рассмотрена возможность реализации режима безбарьерного полевого испарения ионов из полярных растворов, когда поток ионов из жидкости лимитируется их диффузией и дрейфом из объема к поверхности. На основе моделирования электрических полей в ионном источнике, в котором интерфейсом служит трековая мембрана, проведены оценки напряженности экстрагирующего ионы электрического поля с учетом размеров каналов мембраны и их плотности. Показано, что при использовании нестационарных электрических полей режим безбарьерного полевого испарения ионов может быть осуществлен за счет выбора геометрических параметров мембраны.

Введение

Создание интерфейсов для эффективного транспорта ионов из растворов в газовую фазу имеет большое значение в связи с возможностью их применения в аналитических приложениях, в частности, в масс-спектральном анализе, который является одним из наиболее информативных методов определения состава и структуры вещества. Для проведения такого анализа необходимо обеспечить ионизацию анализируемых молекул с последующей транспортировкой полученных ионов в вакуумную камеру анализатора, где происходит их разделение по массам. Важно использовать такие способы ионизации, которые не приводят к деструкции анализируемых молекул и потере информации об их первоначальном строении.

Экстракция ионов из раствора в газовую фазу под воздействием электрического поля является одним из „мягких“ способов получения газофазных ионов, позволяющим избежать разрушения исходной структуры анализируемой молекулы в процессе ионизации. Эффективная экстракция возможна только в сильных электрических полях напряженностью около 10 MV/cm и более [1–5]. В связи с этим процесс получил название полевого испарения ионов из растворов (ПИИР) [6]. Ионы, экстрагированные из жидкости, представляют собой ионные кластеры, в состав которых входят несколько молекул растворителя [7]. В настоящее время для генерации газофазных ионов широко используют электрораспыление [8] и электрогидродинамическую ионизацию [9] — методы, в которых полевого испарения играет важную роль. Они обеспечивают неразрушающую генерацию газофазных ионов не только для устойчивых соединений, но и для термически нестабильных сложных органических и биоорганических молекул.

Для аналитических приложений важной является связь потока ионов из жидкости с концентрацией анализируемых ионов в растворе. Вообще говоря, поток ионов из жидкости может сильно зависеть от условий

на поверхности раздела фаз и от природы самих ионов. Это делает анализ растворов с использованием методов полевой экстракции скорее качественным, поскольку зависимость парциальных потоков экстрагированных ионов от их концентраций в растворе сложна и не может быть определена *a priori*. В связи с этим актуальной задачей является поиск и создание таких условий, при которых поток ионов из жидкости в газовую фазу не будет зависеть от свойств анализируемых ионов, а именно от заряда, геометрических параметров, структуры и состава. Задача может быть в значительной степени решена, если поток ионов, экстрагируемых из жидкости, будет контролироваться их транспортом из объема раствора к поверхности, а не скоростью полевого испарения. Парциальные потоки ионов в таком режиме пропорциональны концентрациям ионов в объеме раствора, а также коэффициентам диффузии и подвижностям. Поскольку подвижность и коэффициент диффузии связаны пропорциональной зависимостью, учет влияния свойств ионов на соотношение между их парциальными потоками сводится к учету различий в коэффициентах диффузии. При вязкостном движении коэффициент диффузии обратно пропорционален радиусу иона и может быть оценен, исходя из строения иона, с достаточно высокой точностью.

В общем случае скорость экстракции ионов из жидкости зависит от высоты энергетического барьера, который существует на границе „жидкость–пар“. В рамках теории полевого испарения ионов, развитой в работах [1,10], высота барьера для выхода иона из жидкости описывается соотношением

$$Q = 4\pi\sigma r_c^2 + q^2(1 - 1/\epsilon)/(8\pi\epsilon_0 r_c) - q[qE/(4\pi\epsilon_0)]^{1/2}, \quad (1)$$

где r_c — радиус кластерного иона, экстрагированного из жидкости, q — его заряд, E — напряженность электрического поля у поверхности жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости, ϵ_0 — электрическая постоянная. Электрическое

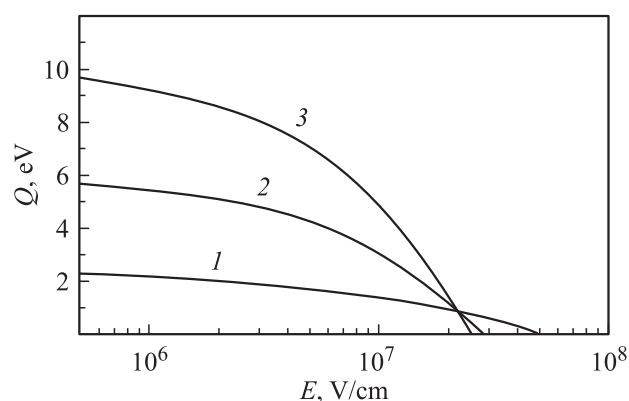


Рис. 1. Зависимости высоты энергетического барьера Q от напряженности электрического поля E при испарении из глицерина одно-, двух- и трехзарядных ионных кластеров (1, 2 и 3 соответственно).

поле уменьшает высоту барьера и можно ожидать, что при определенной напряженности поля барьер для испарения ионов исчезнет. В условиях отсутствия энергетического барьера поток ионов из жидкости в газовую фазу будет ограничиваться только дрейфом и диффузией ионов из объема к поверхности жидкости.

Рассчитанная аналогично [10] зависимость высоты энергетического барьера от напряженности электрического поля для одно-, двух- и трехзарядных ионных кластеров, экстрагированных из глицерина, показана на рис. 1. Видно, что условия для безбарьерного выхода однозарядных ионов возникают при напряженности экстрагирующего поля около 50 MV/cm. Для многозарядных ионов это значение даже несколько меньше. При таких напряженностях электрического поля несвязанная поверхность жидкости нестабильна. Конусоподобные образования, возникающие на поверхности жидкости (конусы Тейлора [11]), становятся центрами эмиссии заряженных капель микронного размера, а не собственно ионов и ионных кластеров. Стабилизировать поверхность жидкости в сильных электрических полях можно, используя трековую мембрану, представляющую собой тонкую полимерную пленку, пронизанную наноразмерными каналами [12,13]. Мембрана служит интерфейсом между жидким раствором аналита, находящимся на внешней поверхности мембраны, и вакуумом. Такой интерфейс обеспечивает транспорт ионов по каналам, заполненным жидкостью, и позволяет создавать сильное электрическое поле на вакуумной поверхности жидкости, достаточное для эффективной экстракции ионов.

В установившихся (стационарных) условиях у поверхности жидкости, заполняющей каналы мембраны, благодаря зарядке полимерной основы мембраны, поддерживается локальное электрическое поле напряженностью около 10 MV/cm [4,5,14]. В этом случае формирование экстрагирующего ионы электрического поля имеет ряд особенностей, которые сильно затрудняют управление процессом экстракции [13]. Из них основными являются

невозможность прямого контроля напряженности экстрагирующего поля и трудность удержания жидкости в каналах, если напряженность электрического поля превысит некое критическое значение, при котором растекание жидкости по вакуумной поверхности мембраны приводит к потере работоспособности интерфейса.

Проблема может быть решена, если попытаться избежать накопления зарядов на вакуумной стороне мембраны, используя кратковременно действующее (нестационарное) электрическое поле. (Такой режим эмиссии ионов из каналов мембраны использовался в [3] для оценки напряженности экстрагирующего поля.) При отсутствии заряда на поверхности мембраны сильное электрическое поле вблизи поверхности жидкости в каналах создается за счет „эффекта острия“, дающего возможность простого управления электрическим полем, поскольку в этом случае напряженность поля у поверхности жидкости будет пропорциональна приложенному напряжению между раствором и экстрагирующим электродом.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы выяснить возможность осуществления режима безбарьерного выхода ионов из полярной жидкости в ионном источнике, в котором используется трековая мембрана.

1. Интерфейс для транспорта ионов из жидкости в вакуум

Интерфейс на основе трековой мембраны, который обеспечивает полевое испарение ионов из растворов без разбрызгивания жидкости, описан в [4,5,13,14]. Использовались мембраны толщиной около 10 μm из полиэтилентерефталата (лавсана) с каналами диаметром менее 100 nm.

Анализируемый раствор помещали на внешней стороне мембраны так, чтобы он целиком заполнял ее каналы, но не растекался по другой, вакуумной стороне. Это возможно благодаря достаточно большому углу смачивания полимера раствором (около 60°) и выбору диаметра каналов [13]. В качестве растворителей использовали глицерин, водно-глицериновую смесь или этиленгликоль [4,5,12–14]. Обратная сторона мембраны обращена в вакуум, причем тонкая полимерная мембрана площадью 0.1–1 cm^2 легко выдерживает разницу давлений в 1 bar и более.

Для создания экстрагирующего электрического поля один электрод погружали в находящийся при атмосферном давлении анализируемый раствор, другой, сеточный электрод, располагали в вакууме на расстоянии около 0.5 mm от мембраны. Такая конструкция обеспечивает вблизи вакуумной поверхности жидкости необходимую для экстракции ионов напряженность электрического поля (порядка 10 MV/cm) при использовании постоянного напряжения. Напряженность электрического поля вдали от мембраны значительно ниже ($\sim 10 \text{ kV/cm}$) [4,5,14].

2. Электрическое поле у поверхности жидкости

2.1. Стационарное электрическое поле

Механизм формирования электрического поля вблизи поверхности жидкости в каналах мембраны для случая экстракции ионов в стационарных условиях был детально рассмотрен в [13] и позднее подтвержден экспериментально [4]. Сильное электрическое поле, которое экстрагирует ионы из жидкости, возникает в результате зарядки вакуумной поверхности диэлектрической мембраны вторичными ионами, которые образуются вследствие бомбардировки сетчатого электрода первичными ионными кластерами, выходящими из жидкости. Таким образом, заряд на поверхности мембраны определяет величину тока эмиссии ионов из жидкости. Это проявляется, в частности, в медленном отклике ионного тока на изменение экстрагирующего напряжения или концентрации ионов в растворе [5,15].

С точки зрения обеспечения безбарьерного выхода ионов из жидкости, такой режим экстракции не кажется перспективным, поскольку он не дает возможности надежно контролировать экстрагирующее поле на поверхности жидкости. Кроме того, при продолжительном воздействии сильного электрического поля очень трудно предотвратить растекание анализируемого раствора по вакуумной стороне мембраны, что приводит к полной потере работоспособности интерфейса.

Принимая во внимание особенности геометрии каналов мембраны и электрические свойства полимера и раствора, можно предложить другой путь создания сильного электрического поля у поверхности жидкости. Он состоит в использовании „эффекта острия“, который хорошо известен в электростатике как явление усиления напряженности электрического поля на острых краях проводников. В этом случае напряженность электрического поля на поверхности жидкости будет пропорциональна приложенному напряжению. Действительно, канал мембраны, заполненный проводящим раствором, подобен тонкой металлической игле, на конце которой напряженность электрического поля может быть на несколько порядков выше, чем вдали от нее. Первоначально предполагали, что это обстоятельство объясняет возможность экстракции ионов из каналов трековой мембраны [12], игнорируя тот факт, что каналы мембраны окружены плохо проводящим полимером. Именно присутствие диэлектрика делает такой способ формирования экстрагирующего электрического поля в стационарном режиме невозможным, так как распределение электрического потенциала на полимерной поверхности мембраны будет постоянно изменяться вследствие неконтролируемой поверхностной проводимости полимера и его зарядки вторичными ионами [13].

По-видимому, рассматриваемый электростатический эффект усиления напряженности электрического поля может быть реализован в мембранном ионном источнике только при использовании нестационарных электрических полей. Было показано, что в таком источнике

время установления стационарной экстракции ионов занимает от нескольких секунд до нескольких минут [3,15]. Поэтому для мембранного интерфейса электрическое поле будем рассматривать как нестационарное, если характерное время его изменения меньше одной секунды.

2.2. Нестационарное электрическое поле

Использование зависящих от времени электрических полей в мембранном интерфейсе позволяет решить проблему управления экстрагирующим полем, поскольку время действия поля может быть выбрано так, что электрический потенциал на поверхности жидкости в каналах будет определяться только ее геометрическими параметрами, а не поверхностным зарядом мембраны, для накопления которого нужно некоторое время. Кроме того, в этом случае не возникает проблемы растекания раствора по вакуумной поверхности мембраны, так как жидкость не будет успевать протекать на другую сторону за время действия электрического поля.

С точки зрения реализации безбарьерного выхода ионов из жидкости главной задачей является нахождение такого сочетания параметров мембраны и напряженности нестационарного экстрагирующего поля, которое обеспечивало бы этот режим. С этой целью для моделирования электрических полей вблизи вакуумной поверхности мембраны были проведены численные расчеты с использованием программы SIMION 8 [16]. В процессе моделирования исследовали влияние на напряженность экстрагирующего электрического поля диаметра и плотности каналов, а также их распределения (случайного) по поверхности мембраны. Кроме того, было учтено уменьшение напряженности поля за счет поляризации диэлектрической основы мембраны.

2.2.1. Модель для расчетов

Каналы мембраны, заполненные проводящим раствором, рассматривались как проводники, электрический потенциал которых задается внешним источником. Форму поверхности жидкости на конце канала аппроксимировали полусферой с радиусом, равным радиусу канала. Диэлектрическая проницаемость полимера в этих расчетах принималась равной единице (случай отсутствия диэлектрика). В дальнейшем влияние диэлектрической основы мембраны на напряженность экстрагирующего поля учитывалось введением понижающего коэффициента. В рамках этой модели заполненные раствором каналы подобны системе острий, на концах которых напряженность электрического поля существенно выше, чем средняя напряженность в зазоре между мембраной и экстрагирующим электродом.

Принимая во внимание, что электрическое поле на расстояниях от поверхности мембраны значительно больших ее толщины практически однородно, в модель был введен виртуальный плоский электрод, расположенный на расстоянии $30\ \mu\text{m}$ от вакуумной поверхности мембраны. Потенциал этого электрода задавали так,

чтобы напряженность электрического поля возле его поверхности E_{av} равнялась по величине напряженности однородного электрического поля в зазоре между мембраной и экстрагирующей сеткой. Размер области вычислений составлял $30 \times 30 \times 30 \mu\text{m}$. Толщина мембраны принималась равной $10 \mu\text{m}$.

2.2.2. Результаты расчетов

Сначала распределение электрических полей в пространстве рассчитывали для одного выделенного канала, расположенного в центре области моделирования. Ее размеры выбирали так, чтобы положение границ не влияло на результаты расчета напряженности электрического поля вдоль оси одиночного канала E_{ax} . Для определенности напряженность электрического поля вблизи виртуального электрода E_{av} была принята равной 50 kV/cm (значение, близкое к ранее использовавшимся в [4,5,7,10,15]). Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Видно, что, благодаря „эффекту острия“, напряженность экстрагирующего поля E , равная напряженности поля на конце канала, на несколько порядков выше, чем в области виртуального электрода, и составляет около 10 MV/cm .

Коэффициент усиления поля k_1 , рассчитанный как

$$k_1 = E/E_{av}, \quad (2)$$

увеличивался с уменьшением диаметра канала в диапазоне от 100 для $d_c = 100 \text{ nm}$ до 600 для $d_c = 10 \text{ nm}$ (рис. 3).

Следует отметить, что крайние точки на рис. 3 являются сугубо расчетными и иллюстрируют лишь потенциальные возможности мембранного интерфейса, поскольку при $d_c > 80 \text{ nm}$ жидкость в сильных полях протекает на вакуумную поверхность мембраны [8], а

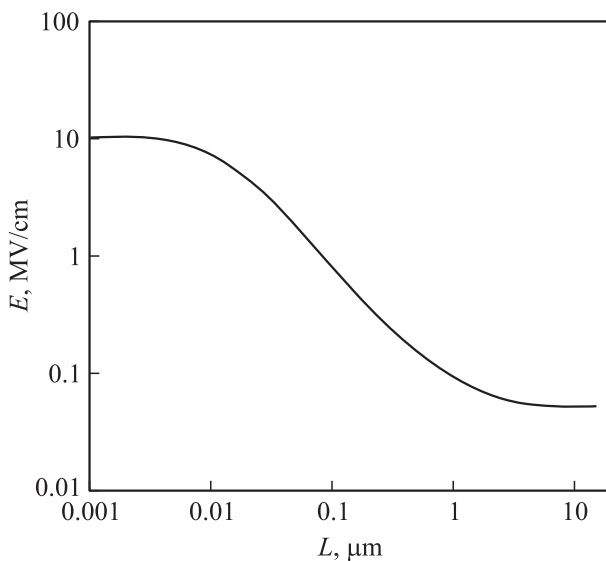


Рис. 2. Зависимость напряженности электрического поля E_{ax} на оси одиночного канала от расстояния до поверхности мембраны L для диаметра канала 40 nm .

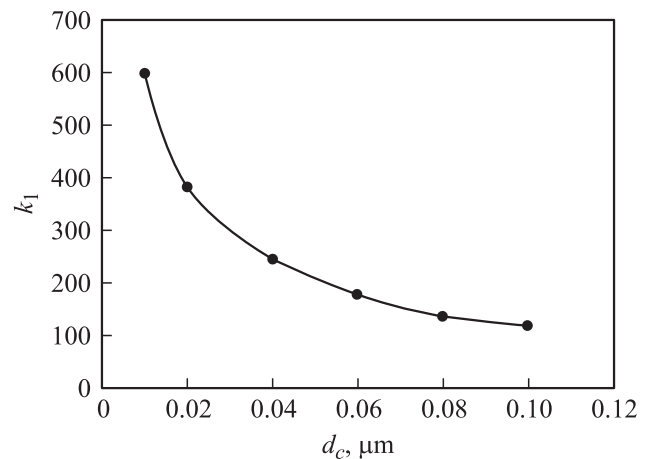


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления напряженности электрического поля k_1 от диаметра d_c для одиночного канала.

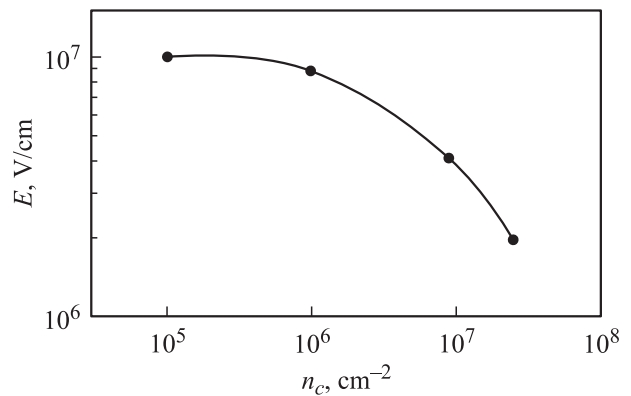


Рис. 4. Зависимость напряженности экстрагирующего электрического поля на конце канала от поверхностной плотности каналов. Диаметр каналов 40 nm .

$d_c \approx 10 \text{ nm}$ практически недостижимо для используемой технологии изготовления трековых мембран [17]. Полученная зависимость позволяет оценить диаметр каналов мембраны и напряженность экстрагирующего поля, при использовании которых можно ожидать достижения режима безбарьерного выхода ионов из жидкости.

Для корректной оценки напряженности экстрагирующего электрического поля необходимо учесть также экранирующее действие других каналов мембраны. С этой целью в модель были введены соседние каналы, которые помещали в узлах регулярной квадратной сетки вокруг выделенного канала, находившегося в центре области моделирования. Расстояние между ближайшими каналами (узлами сетки) δ определяли из величины поверхностной плотности каналов n_c как $\delta = n_c^{-1/2}$. При плотности каналов $n_c = 10^5 \text{ cm}^{-2}$ в область моделирования попадал только один выделенный канал, в то время как для $n_c = 3 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$ — 25 каналов.

На рис. 4 приведена зависимость напряженности поля на конце выделенного канала E от поверхностной плотности каналов n_c . Напряженность электрического

поля вблизи виртуального электрода та же, что и на рис. 2. Видно, что для канала диаметром $d_c = 40$ nm заметное влияние соседних каналов на величину E появляется, начиная с $n_c \approx 10^6$ cm $^{-2}$. При $n_c = 10^7$ cm $^{-2}$ значение E в 3 раза ниже, чем для одиночного канала при сохранении тех же параметров модели.

Эффект экранирования экстрагирующего поля соседними каналами можно учесть, вводя понижающий коэффициент k_d , который для каналов других диаметров можно определить из зависимостей, аналогичных приведенной на рис. 4.

При оценке напряженности экстрагирующего электрического поля важно принять во внимание, что в реальных мембранах проводящие каналы окружены полимером. Поляризация полимерной основы мембраны, диэлектрическая проницаемость которой ϵ_1 отлична от единицы, должна приводить к дополнительному экранированию экстрагирующего поля, также уменьшающему его напряженность на конце канала. Это обстоятельство можно учесть введением еще одного понижающего коэффициента k_ϵ .

Поскольку примененная в настоящей работе программа не предусматривала введение диэлектрика в расчетную модель, для оценки влияния материала мембраны использовали результаты, полученные с помощью специальной программы расчета аксиально-симметричных полей [18], позволявшую ввести в условия задачи диэлектрик. Расчеты, проведенные авторами этой программы, показали, что присутствие неполярного диэлектрика уменьшает напряженность экстрагирующего поля на конце одиночного канала примерно в ϵ_1 раз. Для оценки снизу можно принять $k_\epsilon \approx 1/\epsilon_1$, дополнительно понижающего напряженность экстрагирующего электрического поля. В частности, для полимера с $\epsilon_1 \approx 3$, используемого в реальных трековых мембранах, рассчитанные величины E должны быть уменьшены примерно в 3 раза.

Таким образом, полный коэффициент усиления нестационарного поля в мембранном интерфейсе может быть представлен произведением трех переменных, учитывающих все перечисленные выше факторы:

$$k = k_1 k_d k_\epsilon, \quad (3)$$

где k_1 — коэффициент усиления поля, рассчитанный из (2) в отсутствие полимера ($\epsilon_1 = 1$), k_d — понижающий коэффициент, который зависит от плотности каналов, k_ϵ — фактор, учитывающий влияния поляризации диэлектрической основы мембраны.

Еще одним обстоятельством, которое необходимо принять во внимание, является нерегулярное (случайное) расположение каналов по поверхности реальных мембран, что связано с технологией их изготовления [17]. В рамках используемой процедуры моделирования это обстоятельство учитывали следующим образом. Из величины поверхностной плотности каналов n_c определяли общее число каналов, попадающих в область вычислений. Затем выделенный канал располагали в центре этой области, а остальные — вокруг него случайным

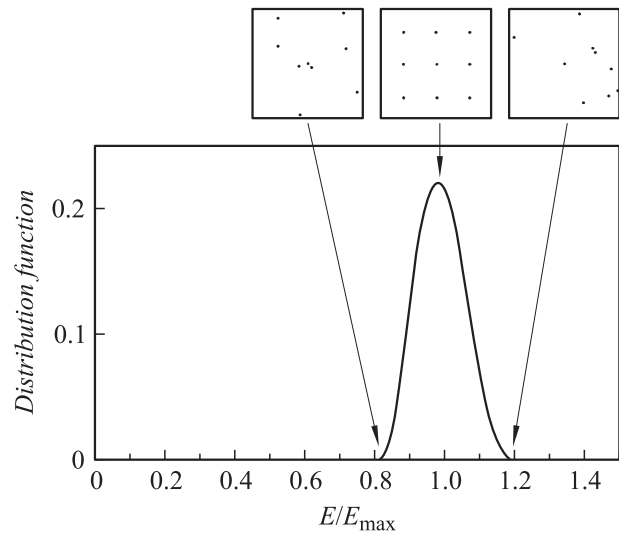


Рис. 5. Функция распределения относительной напряженности экстрагирующего электрического поля у поверхности жидкости E/E_{\max} при случайном расположении каналов на поверхности мембраны $n_c = 10^7$ cm $^{-2}$.

образом. Расчеты проводились для различных вариантов расположения каналов. Для определения вероятности найти канал в заданном интервале значений напряженности экстрагирующего поля, подсчитывали число вариантов, дающих значения напряженности электрического поля на конце канала, попадающих в этот интервал.

Пример полученной таким образом функции распределения каналов по напряженности экстрагирующего электрического поля у поверхности жидкости для каналов диаметром $d_c = 40$ nm и плотности каналов $n_c = 10^7$ cm $^{-2}$ показан на рис. 5. Напряженности экстрагирующего поля приведены к значениям E_{\max} для случая регулярного расположения каналов по узлам прямоугольной сетки.

В верхней части рис. 5 показаны возможные варианты расположения каналов для реализации различных значений напряженности экстрагирующего поля. Наименьшая величина напряженности экстрагирующего поля получается, когда соседние каналы располагаются близко к выделенному каналу (сильное экранирование), и соответственно наибольшая величина — когда соседние каналы находятся достаточно далеко (слабое экранирование). Ширина функции распределения для указанной плотности каналов на полувысоте составляет примерно 0.2 от E_{\max} . Учитывая сильную зависимость высоты барьера для эмиссии ионов от напряженности экстрагирующего поля, это обстоятельство необходимо принимать во внимание при интерпретации экспериментальных данных, полученных с использованием трековых мембран.

Здесь важно отметить, что при случайном распределении каналов по поверхности мембраны использование плотностей $n_c > 10^7$ cm $^{-2}$ для рассматриваемых диаметров каналов невозможно из-за высокой вероятности их пересечения с образованием каналов большего размера.

Проведенные расчеты позволяют оценить условия, при которых безбарьерный выход ионов из полярной жидкости может быть реализован. Для лавсановой мембраны ($\epsilon_1 \approx 3$) со случайно расположенными каналами диаметром $d_c = 20$ nm и плотностью $n_c \approx 10^6$ cm⁻² можно получить оценку полного коэффициента усиления нестационарного поля в мембранном интерфейсе $k \approx 100$. Тогда для достижения необходимой напряженности экстрагирующего электрического поля около 50 MV/cm нужно создать в зазоре между мембраной и сеточным электродом поле средней напряженности около 0.5 MV/cm. Принимая во внимание, что увеличение диаметра каналов мембраны или их плотности приводит к уменьшению полного коэффициента усиления, эта величина должна быть даже несколько больше.

Заключение

Основываясь на проведенных расчетах, можно сделать вывод, что реализация режима безбарьерного выхода ионов из полярных жидкостей принципиально возможна при применении трековых мембран с наноразмерными каналами и нестационарных электрических полей. Такой режим могут, в частности, обеспечить полимерные трековые мембраны с каналами диаметром 20–40 nm и плотностью 10^6 – 10^7 cm⁻², при этом величина необходимого межэлектродного напряжения будет определяться расположением экстрагирующих электродов. Экспериментальное подтверждение возможности реализации диффузионо-дрейфового режима полевого испарения ионов с использованием мембранного интерфейса является следующим этапом исследований в этой области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Создание и совершенствование методов химического анализа и исследования структуры веществ и материалов“.

Список литературы

- [1] *Iribarne J.V., Thomson V.A.* // J. Chem. Phys. 1976. Vol. 64. N 6. P. 2287–2294.
- [2] *Григорьев А.И.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 7. С. 89–94.
- [3] *Balakin A.A., Gridin V.V., Schechter I.* // J. Phys. Chem. A. 1998. Vol. 102. N 47. P. 9470–9475.
- [4] *Балакин А.А., Буйдо Е.А., Новикова Л.И.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 9. С. 118–124.
- [5] *Балакин А.А., Хидиров С.Г., Новикова Л.И.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 8. С. 121–126.
- [6] *Золотой Н.Б., Карпов Г.В., Тальрозе В.Л., Ратлендик Г.И., Васюта Ю.В.* // Журн. аналит. химии. 1980. Т. 35. Вып. 8. С. 1461–1468.
- [7] *Balakin A.A., Dodonov A.F., Novikova L.I., Talrose V.L.* // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2001. Vol. 15. N 5. P. 489–495.
- [8] *Smith R.D., Loo J.A., Ogorzalek R.R., Busman M., Udseth H.R.* // Mass Spectrom. Rev. 1991. Vol. 10. P. 359–451.
- [9] *Stimpson B.P., Evans C.A., Jr.* // J. of Electrostatics. 1978. Vol. 5. P. 411–430.
- [10] *Балакин А.А., Новикова Л.И.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 11. С. 93–98.
- [11] *Taylor G.* // Proc. R. Soc. A. 1964. Vol. 280. P. 383–397.
- [12] *Yakovlev B.S., Talrose V.L., Fenselau C.* // Anal. Chem. 1994. Vol. 66. N 10. P. 1704–1707.
- [13] *Balakin A.A., Buido E.A., Golcova E.A., Novikova L.I., Talrose V.L.* // J. of Electrostatics. 2006. Vol. 64. N 7–9. P. 555–561.
- [14] *Balakin A.A., Buido E.A., Khidirov S.G., Novikova L.I.* // Proceedings of the 7th Conference of the French Society of Electrostatics SFE 2010, Montpellier, France, 2010. P. 107–112.
- [15] *Balakin A.A., Dodonov A.F., Novikova L.I., Talrose V.L.* // J. Electrostatics. 1997. Vol. 40, 41. P. 615–620.
- [16] SIMIONTM 8©Scientific Instrument services, Inc., Idaho National Laboratory. 2003–2007.
- [17] *Apel P.Yu.* // Radiat. Measurements. 1995. Vol. 25. N 1–4. P. 667–674.
- [18] *Толмачев А.В., Яковлев Б.С.* Две программы численного расчета осесимметричного электростатического поля (препринт). Черногловка: Институт химической физики АН СССР, 1987. 12 с.