

И. И. БОРОДАЙ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ИОНОВ ЧЕРЕЗ МЕМБРАНЫ КЛЕТОК ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Розглянуто можливість впливу на процес перенесення іонів через мембрани рослинних клітин, що визначає інтенсивність їх дихання і тривалість зберігання, за допомогою зовнішніх надвисокочастотних електромагнітних полів. З цією метою отримано вирази для цих полів всередині клітин. Рух іонів крізь канали в мембранах представлено як однорядний потік, який може гальмуватися потенційними бар'єрами, що створені іонами, які не вийшли з каналів. За допомогою системи рівнянь Колмогорова, які описують розглянутий Марківський процес, отримані імовірнісні характеристики вільного й уповільненого перенесення іонів.

Ключові слова: мембрана, рух іонів, потенційний бар'єр, електромагнітне поле, ймовірність, Марківський процес.

Рассмотрена возможность влияния на процесс переноса ионов через мембраны растительных клеток, что определяет интенсивность их дыхания и длительность хранения, с помощью внешних сверхвысокочастотных электромагнитных полей. С этой целью получены выражения для этих полей внутри клеток. Движение ионов сквозь каналы в мембранах представлено как однорядный поток, который может тормозиться потенциальными барьерами, создаваемыми не вышедшими из каналов ионами. С помощью системы уравнений Колмогорова, которые описывают рассматриваемый Марковский процесс, получены вероятностные характеристики свободного и замедленного переноса ионов.

Ключевые слова: мембрана, движение ионов, потенциальный барьер, электромагнитное поле, вероятность, Марковский процесс.

The article describes the possibility of influencing the process of transport of ions through the membranes of plant cells using external microwave electromagnetic fields, which determines the intensity of their breath and duration of storage. To this end, expressions are obtained for these fields within the cells. The movements of ions through channels in the membranes of single-row represented as a stream, which can be inhibited by the potential barriers produced by not go out of the channel ions. With the help of the Kolmogorov equations, which describe the considered Markov process, we obtained the probability characteristics of a free and slow ion transport. The presence in the room where you store the fruit, the external electromagnetic field microwave with found parameters' increases the probability of a possible lock-ion channel movement almost seven times.

Keywords: membrane, ion motion, potential barrier, electromagnetic field, probability, Markov process.

Введение. Важнейшим фактором длительного хранения фруктов является уровень интенсивности их клеточного дыхания. Этот окислительный распад органических веществ сопровождается образованием химически активных метаболитов и освобождением энергии, которая используется клетками для процессов жизнедеятельности. Процесс дыхания, в каком-то смысле, аналогичен процессу горения – и в том и другом случаях выделяется теплота. В обоих процессах происходит присоединение кислорода к субстрату, поэтому дыхание есть медленно текущее горение питательных веществ в живом организме. Естественно, что возрастание функциональной активности клеток сопровождается усилением дыхания. В значительной степени это достигается благодаря механизму дыхательного контроля [1].

Сказанное выше говорит о том, что цель длительной сохранности плодов растений может быть достигнута с помощью замедления транспорта ионов и протонов через мембрану растительной клетки. Обычно данная задача решается с помощью создания соответствующего температурного режима в хранилище либо с помощью использования в нем смеси нейтральных газов, тормозящих данный процесс, либо одновременного применения того и другого.

Принципиально другим способом решения этой задачи может быть создание соответствующих электрических полей, противодействующих указанному транспорту, либо закрытию каналов, по которым этот транспорт осуществляется [2]. Очевидно, что замедление процесса дыхания, а, следовательно, увеличение срока хранения фруктов может быть достигнуто за счет уменьшения проницаемости мембран митохондрий. Этого можно достигнуть,

уменьшая величину тока наружу и внутрь клетки, чему может способствовать именно высокочастотное электромагнитное воздействие на плод.

Постановка задачи. Для простоты растительная клетка рассматривается в виде объекта, имеющего сферическую форму. Выяснено, как зависит внутреннее поле в таких объектах от амплитуды падающей плоской волны. Для получения выражений, позволяющих найти зависимость внутренних полей в таких объектах от амплитуды падающей плоской волны, предполагается, что среда, заполняющая внутреннюю часть сферы, характеризуется диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ и μ , которые, при наличии неоднородности, могут являться функциями радиуса сферы. Внешнее по отношению к рассеивателю пространство предполагается однородным. Оно характеризуется постоянными электромагнитными проницаемостями ϵ_1 и μ_1 . Если окружающая среда воздух, то $\epsilon_1 \approx \epsilon_0 = (36\pi)^{-1} \cdot 10^{-9}$ Ф/м. Поскольку рассматриваются биологические объекты, то везде в дальнейшем $\mu = \mu_1 \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Так как на процесс движения ионов через мембрану влияет электрическая составляющая поля, найдены ее компоненты [3]:

$$E_r = 3 \sqrt{\frac{\pi}{2}} E_0 b_1 \frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{(kr)^{\frac{3}{2}}} \sin \theta \cos \phi, \quad (1)$$

$$E_\phi = -j \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} \left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr) \cos \theta \sin \phi - \right.$$

$$-j \frac{b_1}{2} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr) \right) \right] \sin \phi, \quad (2)$$

$$E_0 = j \frac{3}{2} E_0 \sqrt{\frac{\pi}{kr}} \left(a_1 J_{\frac{3}{2}}(kr) \cos \phi - \right.$$

$$\left. -j \frac{b_1}{2} \left[\frac{J_{\frac{3}{2}}(kr)}{kr} + \left(J_{\frac{1}{2}}(kr) - J_{\frac{5}{2}}(kr) \right) \right] \cos \theta \cos \phi \right). \quad (3)$$

Учитывая выражения (1)–(3) получена амплитуда электрического поля, влияющего на скорость и интенсивность движения ионов через мембрану митохондрий:

$$|\vec{E}| = \sqrt{|E_r|^2 + |E_\phi|^2 + |E_0|^2}. \quad (4)$$

Методы исследований. Мембрана не является однородной фазой для движения ионов, поскольку перенос ионов через мембраны осуществляется через специализированные участки – ионные каналы, представляющие собой липопротеиновые комплексы сложной структуры. В узких каналах невозможна независимая диффузия, а допустимо только однорядное движение ионов. Вследствие узости поры в канале могут происходить сильные ион-ионные взаимодействия.

Различия в поверхностных потенциалах на концах поры могут привести и к различным значениям коэффициента распределения. Возможно также увеличение количества локальных неоднородностей электрического поля, связанных с зарядами белковой молекулы, образующей канал. Следовательно, существуют явления, которые нельзя объяснить в рамках представлений о свободной диффузии, – это взаимодействие потоков, а также блокировка канала при высоких концентрациях электролита или интенсивном движении ионов сквозь канал.

Естественно предположить, что повышение скорости движения ионов через канал, вызванное увеличением силы внутриклеточного тока, будет иметь последствия, аналогичные повышению концентрации электролита в цитоплазме фруктов. Ионы, находящиеся в канале, не будут успевать проходить через энергетические барьеры, существующие при входе и выходе из мембраны, а также через барьер внутри канала, что будет тормозить процесс их движения [4].

Особенности взаимодействия иона с молекулярными группами канала учитываются соответствующими профилями потенциальной энергии иона в канале, который представляется рядом последовательных потенциальных ям и барьеров. При движении через канал ион достаточно долго (по сравнению со временем тепловых колебаний) задерживается в каждой потенциальной яме. Перескок возможен только в пустую яму. Второй ион не может попасть в занятую потенциальную яму из-за электростатического взаимодействия с уже находящимся там ионом.

Наиболее простым и достаточно общим оказыва-

ется случай, когда в мембране существует всего три кинетических барьера. Боковые барьеры соответствуют входным участкам канала, где происходит первичный процесс дегидратации, центральный барьер играет роль селективного фильтра (рис. 1).

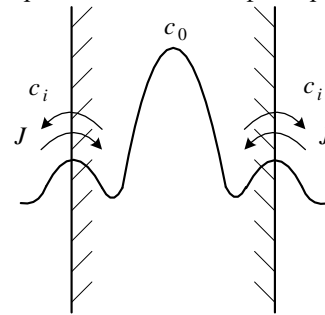


Рис. 1 – Энергетический профиль модели канала: c_i – концентрация ионов в окружающем растворе; c_0 – концентрация ионов внутри мембраны; J – интенсивность потока ионов внутрь и наружу мембраны.

В теории постоянного поля проводимость мембраны, находящейся в симметричном ионном окружении, должна линейно возрастать с повышением концентрации электролита. При высоких концентрациях ионов входной и выходной участки ионного канала мембраны меняют свои состояния не только в процессе самого транспорта через канал, но и за счет взаимодействия с омывающими растворами. Таким образом, скорость транспорта в канале будет зависеть от вероятности заполнения ионами участков связывания на границах мембраны, что может приводить к заполнению обоих мест связывания и блокировке канала при высоких концентрациях электролита или при повышении интенсивности перемещения ионов под воздействием внешнего сверхвысокочастотного электромагнитного поля.

Рассматриваемый нами канал с двумя участками связывания может находиться в четырех состояниях, между которыми возможны переходы. Состояние 1 – левый участок занят, а правый свободен (1 0); состояние 2 – правый участок занят, а левый свободен (0 1); состояние 3 – оба участка заняты (1 1); состояние 4 – оба участка свободны (0 0). Для описания данных четырех состояний, а также возможных переходов между ними воспользуемся теорией Марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем [5].

Введем в рассмотрение вероятности нахождения канала в отдельных состояниях, т. е. в состояниях (1 0); (0 1); (1 1); (0 0). Проводимость канала будет зависеть от вероятности нахождения канала в состояниях (1 0) и (0 1), поскольку суммарная интенсивность потока определяется выражением

$$J_\Sigma = J_1 p_1(1\ 0) - J_2 p_2(0\ 1), \quad (5)$$

где $p_1(1\ 0)$ и $p_2(0\ 1)$ – вероятности состояний (1 0) и (0 1) соответственно;

J_1 и J_2 – интенсивности перехода ионов через центральный барьер наружу и внутрь соответственно.

Чтобы определить вероятности $p_1(1\ 0)$, $p_2(0\ 1)$, а также $p_3(1\ 1)$ и $p_4(0\ 0)$ рассмотрен Марковский процесс в виде следующего графа (рис. 2):

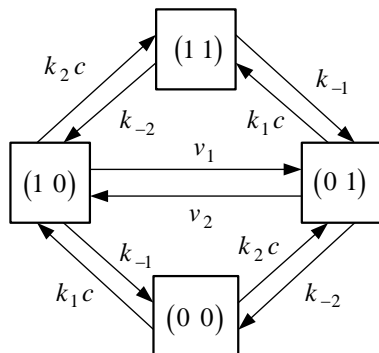


Рис. 2 – Марковский процесс переходов между отдельными состояниями для трехбарьерного канала

На рис. 2 k_1 , k_2 , k_{-1} , k_{-2} – константы, характеризующие интенсивность процесса преодоления одним ионом бокового барьера в прямом и обратном направлении. При движении ионов внутрь мембраны учет их концентрации снаружи и внутри клетки учитывается умножением соответствующей константы на концентрацию c .

Как известно [5], вероятности состояний Марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем можно вычислить с помощью нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова [6]:

$$\begin{aligned} \frac{d p_1}{d t} &= J_2 e^{\psi \varphi_2} p_2 + k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} p_3 + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} p_4 - \\ &\quad - \left(J_1 e^{-\psi \varphi_2} + k_1 c e^{\psi \varphi_3} + k_{-2} e^{\psi \varphi_1} \right) p_1; \\ \frac{d p_2}{d t} &= J_1 e^{-\psi \varphi_2} p_1 + k_{-1} e^{\psi \varphi_1} p_3 + k_2 c e^{\psi \varphi_3} p_4 - \\ &\quad - \left(J_2 e^{\psi \varphi_2} + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} + k_{-2} c e^{-\psi \varphi_3} \right) p_2; \\ \frac{d p_3}{d t} &= k_2 c e^{\psi \varphi_3} p_1 + k_1 c e^{-\psi \varphi_1} p_2 - \\ &\quad - \left(k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} + k_{-1} e^{\psi \varphi_1} \right) p_3; \\ \frac{d p_4}{d t} &= k_{-1} e^{\psi \varphi_1} p_1 + k_{-2} e^{-\psi \varphi_3} p_2 - \\ &\quad - \left(k_1 c e^{-\psi \varphi_1} + k_2 c e^{\psi \varphi_3} \right) p_4, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\psi = \frac{z F}{2 R T}$;

- z – валентность иона;
- T – абсолютная температура;
- R – газовая постоянная;
- F – число Фарадея.

Решение системы (6) проводится с использованием начальных условий $p_1(0)$, $p_2(0)$, $p_3(0)$,

$p_4(0)$. Поскольку процесс дыхания плодов фруктов, то есть процесс перемещения ионов электролита внутренней среды через каналы в мембранах митохондрий может начаться из любого первоначального состояния, решение системы уравнений Колмогорова получено в предположении начальных условий $p_4(0) = 1$, остальные начальные условия равны нулю.

На основании выражений (6) был проведен численный анализ процесса переноса ионов через мембрану клетки при отсутствии и наличии внешнего электромагнитного поля. Расчет проводился с учетом возможности частичной и полной блокировки канала, по которому происходит движение ионов.

Вначале система уравнений Колмогорова (6) была решена для случая, когда движение ионов через мембрану и процесс дыхания осуществляется под воздействием естественного электрохимического потенциала в отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля.

Полученные результаты показали, что примерно через 1 с. после начала процесса дыхания в отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля система переходит в стационарное состояние. При этом она с вероятностью порядка 0,3 будет находиться или в состоянии (1 0) или (0 1). Иначе говоря, с вероятностью порядка 0,6 будет занят только один выход из канала движения ионов. Вероятность состояния (0 0) (оба выхода из канала дыхания свободны) становится также порядка 0,3. Следовательно, это свидетельствует о низкой вероятности отсутствия перемещения ионов по каналу в обе стороны, если на них воздействует только электрохимический потенциал клетки, а в самом канале для них нет препятствий. Открытое состояние одного из концов канала позволяет беспрепятственно перемещаться иону сквозь канал и выходить из него наружу. Данный результат говорит о том, что процесс дыхания с большой вероятностью порядка 0,9 проходит без блокировки.

При наложении на мембраны клетки внешнего электромагнитного поля с частотой 33,5...36 ГГц и искусственно создаваемого потенциала на мембране величиной 120 мВ ситуация принципиально меняется.

В данном случае вероятности p_1 или p_2 состояний (1 0) или (0 1) со временем становятся порядка 0,1, то есть в сумме порядка 0,2. Вероятность состояния (0 0), когда канал открыт с обоих концов, меньше 0,1. Таким образом, суммарная вероятность свободного движения ионов по каналам равна примерно 0,3. В то же время вероятность блокировки каналов, то есть вероятность p_3 состояния (1 1), возрастает до 0,7. Следовательно, при наложении на хранящиеся фрукты внешнего электромагнитного поля СВЧ диапазона с указанными выше параметрами вероятность возможной блокировки каналов движения ионов возрастает практически в семь раз. Соответственно в семь раз будет замедляться и обмен веществ на уровне мембран клетки и процесс их дыхания, что естественно скажется на сроках хранения фруктов.

Выводы. Интенсивность дыхания и, следовательно, длительность сохранности фруктов зависит от

того, насколько активно происходит перенос ионов и протонов через мембрану митохондрий. Возможность регуляции этого переноса, а именно его торможение, должно привести к большим срокам хранения фруктов без существенной потери их свойств.

При наложении сверхвысокочастотного электромагнитного поля концентрация токопереносящих ионов в мембране повышается, что приводит соответственно к повышению их взаимодействия и возможному запираанию канала.

Скорость транспорта в канале зависит от вероятности заполнения ионами участков связывания на границах мембраны, что может приводить к заполнению обоих мест связывания и блокировке канала при повышении интенсивности перемещения ионов под воздействием внешнего ЭМП СВЧ.

В отсутствие внешнего искусственного электромагнитного поля система переходит в стационарное состояние. При этом процесс дыхания с большой вероятностью порядка 0,9 проходит без блокировки.

При наложении внешнего искусственного ЭМП СВЧ оптимальными для максимальной блокировки движения ионов через каналы в мембране клетки являются частота поля 33,5...36 ГГц, а искусственно создаваемый потенциал на мембране – 120 мВ.

Наличие в помещении, где хранятся фрукты, внешнего электромагнитного поля СВЧ диапазона с указанными выше параметрами повышает вероятность возможной блокировки каналов движения ионов

практически в семь раз

Список литературы

1. *Медведев С. С.* Электрофизиология растений: учебное пособие / С. С. Медведев. – СПб. : Изд-во С.-Петербургского университета, 2012. – 122 с.
2. Проблемы регуляции в биологических системах. Биофизические аспекты / ред. А.Б.Рубин.- М. : Институт компьютерных исследований, 2007. - 480 с.
3. *Бинги В. И.* Магнитобиология. Эксперименты и модели / В. И. Бинги. М. : Милта, 2002. 592 с.
4. *Антонов В. Ф.* Биофизика. / В. Ф. Антонов. – М. : Владос, 2000. – 288 с.
5. *Булинский А. В., Ширяев А. Н.* Теория случайных процессов. / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – М. : Физматлит, 2005. – 408 с.

References (transliterated)

1. Medvedev S. S. *Elektrofiziologiya rasteniy: uchebnoe posobyie* [Plant electrophysiology: tutorial]. Saint Petersburg, St. Petersburg University Publ., 1997. 122 p.
2. Rubin A. B., ed. *Problemy regulatsii v biologicheskikh sistemakh. Biofizicheskie aspekty* [Problems in the regulation of biological systems. Biophysical aspects]. Moscow, Institute of Computer Science Publ., 2007. 480 p.
3. Bingi V. I. *Magnitobiologiya. Eksperimenty I modeli* [Magnetobiology. The experiments and models]. Moscow. Milta Publ., 2002. 592 p.
4. Antonov V. F. *Biofizika* [Biophysics]. Moscow, Vlados Publ., 2000. 288 p.
5. Bulinskiy A. V., Shiryayev A. N. *Teoriya sluchainykh protsessov* [The theory of stochastic processes]. Moscow, Physmatlit Publ., 2005. 408 p.

Поступила (received) 01.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделювання процесу переносу іонів крізь мембрани клітин під впливом зовнішнього електромагнітного поля / І. І. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 18–21. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Моделирование процесса переноса ионов через мембраны клеток под воздействием внешнего электромагнитного поля / И. И. Бородай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 45 (1217). – С. 18–21. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.

Modeling of transfer ions across cell membranes by an external electromagnetic field / I. I. Borodai // Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 45 (1217). – P. 18–21. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бородай Ірина Іванівна – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, аспірант кафедри технотроніки і теоретичної електротехніки; тел.:(067) 707–39–88; e-mail: pirel@ukr.net.

Бородай Ірина Іванівна – Харьковський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, аспірант кафедри технотроніки і теоретичної електротехніки; тел.:(067) 707-39-88; e-mail: pirel@ukr.net.

Borodai Iryna Ivanivna – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, graduate student at the Department of technotronics and theoretical engineering; tel.: (067) 707-39-88; e-mail: pirel@ukr.net.