

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА (ПОЛЯ) НА МЕТАБОЛИЗМ КЛЕТОК И СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРОЦЕССОВ

А.Н. БАРАН, к.т.н., доцент; Ю.Н. СЕЛЮК (БГАТУ)

При воздействии электрического тока микроорганизмы, и, в частности, дрожжевые клетки, являются одним из элементов электрической цепи. От их свойств зависит не только характер электрического воздействия, но и его составные количественные характеристики. Анализ процессов при измерениях и интерпретация полученных результатов невозможны без модельных представлений об объекте исследований. Кроме того, моделирование позволяет оценить и оптимизировать энергетическое воздействие электрического тока на клетку с помощью численных экспериментов.

Применительно к изучению воздействия электрического тока наиболее оптимальным является моделирование клетки путем разработки ее эквивалентной электрической схемы замещения. Данный способ моделирования позволяет проводить оценку количественных и качественных параметров электрического воздействия, недоступных прямому измерению, на основании методов расчета электрических цепей, известных из электротехники. Кроме того, не вызывает затруднений исследование электрической схемы замещения на ЭВМ, что позволяет определить оптимальные параметры воздействия, не прибегая к реальным экспериментам.

Разработка электрических схем замещения производилась многими исследователями для различных объектов: [3], [2], [1] и т.д. Известны также схемы замещения клеточных

мембран [4,7]. Анализ схем замещения, приведенных в упомянутых литературных источниках, а также строение дрожжевой клетки и особенности ее метаболизма позволяют принять для исследования схему, приведенную на рис. 1.

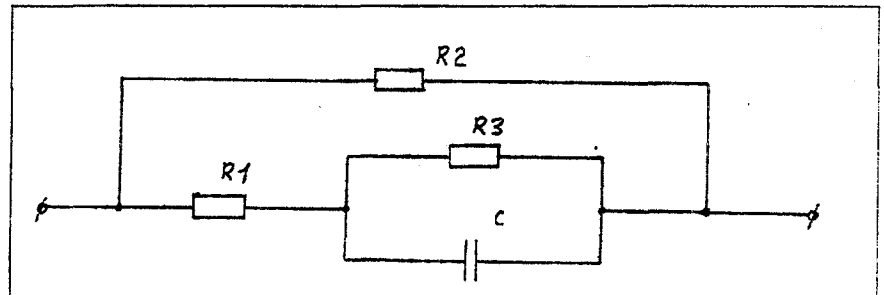


Рис. 1. Схема замещения неживой клетки. $R1$ - сопротивление мезоплазмы, $R2$ - сопротивление межклеточника, $R3, C$ - сопротивление и ёмкость мембраны.

нужных литературных источниках, а также строение дрожжевой клетки и особенности ее метаболизма позволяют принять для исследования схему, приведенную на рис. 1.

Схема, представленная на рис. 1, характеризует неживую клетку дрожжей, в которой не

протекают биологические процессы. Поэтому в схеме имеются лишь пассивные элементы и отсутствуют источники ЭДС либо тока. Однако для описания живой клетки данная схема неприемлема.

При исследовании различных клеток (микроорганизмов, водорослей, эритроцитов, мышц и т.д.) была установлена явная

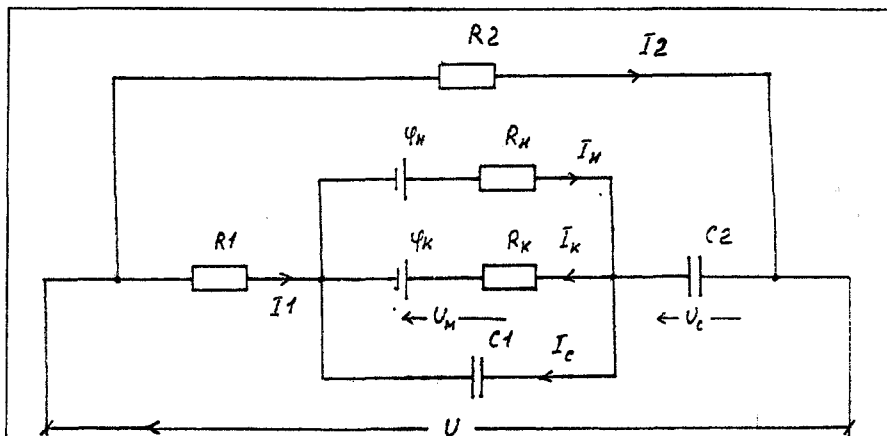


Рис. 2. Схема замещения живой клетки микроорганизмов. $R1$ - сопротивление мезоплазмы, $R2$ - сопротивление межклеточника, C - емкость мембраны, R_K, R_H - сопротивления каналов транспорта ионов калия и водорода, Φ_K, Φ_H - равновесные потенциалы для ионов калия и водорода.

неравномерность в распределении различных ионов между клетками и окружающей их средой [4,7]. Общепринятой теорией, объясняющей данное явление, является в настоящее время теория активного транспорта ионов через клеточную мембрану [4,5,6]. Механизм активного транспорта базируется на работе ионных насосов. По современным представлениям [7], они представляют собой молекулярные механизмы, локализованные в мембране и способные транспортировать вещества, используя энергию, высвобождающуюся при расщеплении АТФ. Полная классификация ионных насосов представлена в литературе [4].

Клетки растений и микроорганизмов приспособлены к резким колебаниям температуры, осмотического давления и т. д. Поэтому они обладают жесткой полисахаридной оболочкой и в их мембране локализованы протонные насосы, которые обеспечивают приспособляемость клетки к изменяющимся внешним условиям. Доказательством существования в клетках дрожжей протонно-калиевых насосов служит то, что во время ферментации микроорганизмами сахаров в присутствии в среде солей калия имеет место значительная аккумуляция катиона калия клетками и выход из них в среду эквивалентного количества водородных ионов [5]. Однако данный механизм не является специфичным для ионов калия [8,10] и способен перемещать внутрь клетки различные неорганические одновалентные катионы в зависимости от их концентрации в окружающей среде, однако наибольшие скорость и вероятность перемещения — у ионов калия, поэтому насос можно назвать протонно-калиевым. Накопление в клетке неорганических катионов необходимо, очевидно, для созда-

1. Токи и напряжения схемы замещения.

U ₁ , В	I ₁ , × 10 ⁻¹² А	I ₂ , × 10 ⁻¹² А	I _н , × 10 ⁻¹³ А	I _к , × 10 ⁻¹³ А	I _с , × 10 ⁻¹² А	U _м , В	U _с , В
1	2	3	4	5	6	7	8
синусоидальное напряжение							
0,01	0,618	0,617	3,137	1,898	0,622	0,0025	0,0075
0,02	1,234	1,234	3,216	1,837	1,236	0,005	0,015
0,03	1,851	1,851	3,296	1,778	1,852	0,0075	0,023
0,04	2,468	2,468	3,376	1,718	2,468	0,01	0,03
0,05	3,085	3,085	3,455	1,658	3,085	0,013	0,038
0,06	3,702	3,702	3,535	1,599	3,7	0,015	0,045
0,07	4,319	4,319	3,615	1,54	4,318	0,018	0,053
0,08	5,059	5,059	3,71	1,467	5,058	0,0205	0,061
0,09	0,028	0,0005	3,057	1,957	0,008	0,0003	0,0003
пилообразное напряжение							
0,01	0,515	0,51	5,33	3,889	0,549	0,002	0,0061
0,02	1,01	1,007	5,373	3,865	1,027	0,004	0,012
0,03	1,512	1,511	5,412	3,839	1,524	0,006	0,018
0,04	2,076	2,076	5,458	3,814	2,085	0,008	0,025
0,05	2,58	2,58	5,498	3,79	2,586	0,01	0,031
0,06	3,083	3,082	5,539	3,768	3,088	0,012	0,037
0,07	3,587	3,586	5,58	3,745	3,59	0,014	0,043
0,08	4,089	4,089	5,622	3,723	4,093	0,016	0,049
0,09	5,138	5,138	5,71	3,68	5,141	0,021	0,061
прямоугольное напряжение							
0,01	2,228	2,227	6,236	3,825	2,233	0,002	0,007
0,02	4,432	4,432	6,358	3,737	4,432	0,005	0,014
0,03	6,681	6,681	6,482	3,65	6,682	0,007	0,022
0,04	9,226	9,226	6,651	3,54	9,226	0,01	0,03
0,05	9,651	9,651	6,36	3,734	9,652	0,009	0,027
0,06	11,58	11,58	6,409	3,698	11,58	0,011	0,034
0,07	13,51	13,51	6,459	3,663	13,51	0,013	0,039
0,08	15,44	15,44	6,509	3,628	15,44	0,015	0,046
0,09	20,78	20,78	6,681	3,521	20,78	0,023	0,068
выпрямленная синусоида							
0,01	0,202	0,111 А	1,957	3,39	0,147	0,0003	0,001
0,02	0,05	0,225 А	1,957	3,39	0,147	0,0003	0,0003
0,03	0,05	0,338 А	1,957	3,39	0,147	0,0003	0,0003
0,04	2,933	0,45 А	3,634	3,393	3,047	0,006	0,018
0,05	3,673	0,56 А	3,634	3,394	3,786	0,008	0,022
0,06	4,414	0,675 А	3,64	3,401	4,525	0,009	0,027
0,07	5,154	0,788 А	3,644	3,404	5,265	0,011	0,031
0,08	5,984	0,9 А	3,648	3,4	6,006	0,012	0,036
0,09	6,634	1,01 А	3,653	3,404	6,746	0,014	0,04

ния разности потенциалов на мембране, необходимой для функционирования систем транспорта веществ в клетку и из нее.

Значения параметров схем замещения определяли, используя экспериментальные данные по изучению дрожжевых клеток [8,9,10]. В соответствии с некоторыми, протонно-калиевый насос не является электрогенным. Поэтому ветвь с системой активного транспорта исключена из схемы замещения живой клетки. Представленная на рис. 2 схема учитывает раз-

дельное движение ионов калия и водорода через клеточную мембрану (транспорт других ионов для упрощения не рассматривается).

Величины сопротивлений мембраны для каналов транспорта ионов калия и водорода определены из значений проводимости по уравнениям закона Ома [4]. Ток определен по скорости изменения содержания ионов в дрожжевых клетках в процессе ферментации [8,10], равновесные мембранные потенциалы — по формуле Нернста [4]. В результате

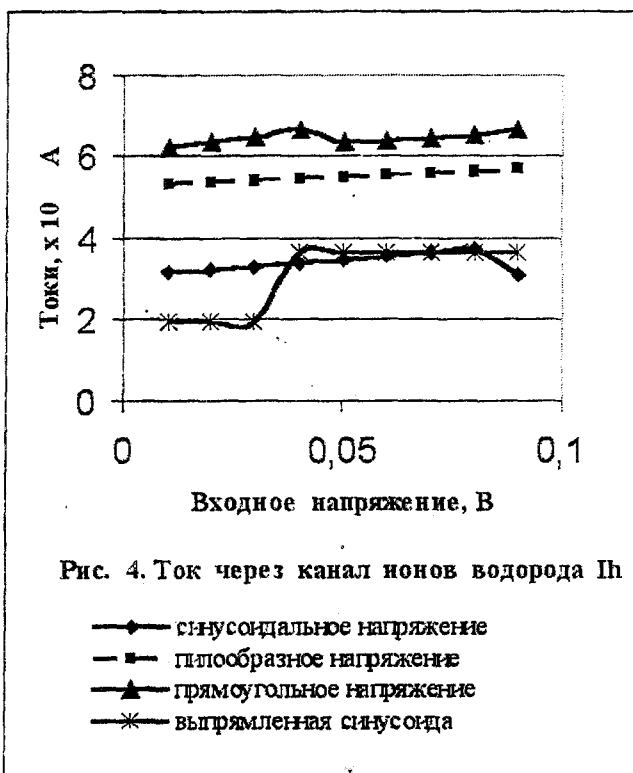
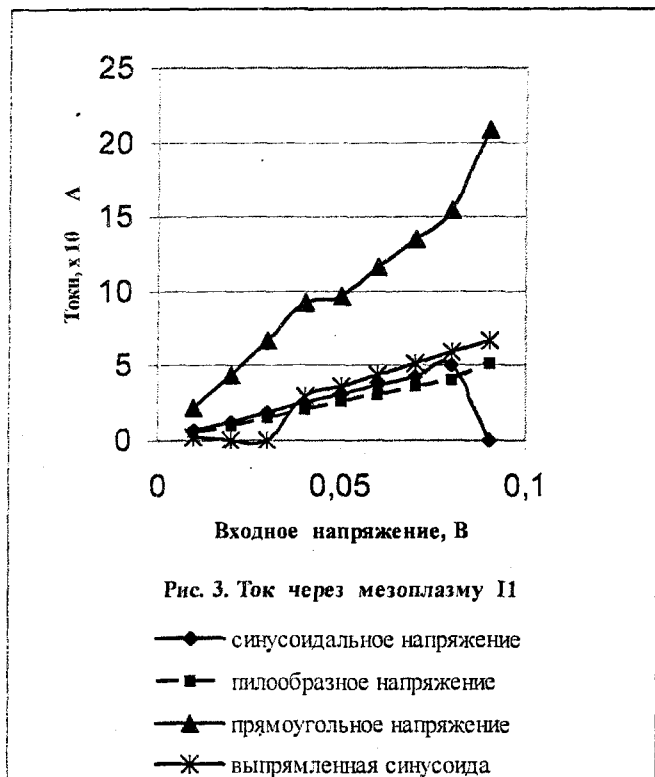
2. Ионные потоки клетки при воздействии напряжения 0,05 В и без воздействия напряжения

Форма напряжения	синусоидальное	пилообразное	прямоугольное	выпрямл. синусоида	без напряжения
Поток ионов калия, $\times 10^{-16}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	2,07	4,97	4,93	4,48	0,25
Поток ионов водорода, $\times 10^{-16}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	4,56	7,25	8,39	4,8	0,25

дать следующие выводы:

1. Электрический ток протекает непосредственно по биологической клетке, при этом одним из факторов, определяющих величину тока, является его форма.

2. Можно предположить, что наибольшее влияние на транспорт ионов водорода через клеточную мембрану оказывает напряжение прямоугольной формы,



вычислений были получены следующие значения: $\varphi_K = -0,082$ В, $\varphi_H = 0,096$ В, $R_1 = 0,08$ Ом, $R_2 = 0,08$ Ом, $R_K = 3,67 \cdot 10^{11}$ Ом, $C_1 = 7,85 \cdot 10^{-13}$ Ф, $R_H = 8,96 \cdot 10^{12}$ Ом.

Исследования схем замещения заключались в определении токов и напряжений в ветвях схем и их анализе. Расчет приемов замещения живой клетки проводился методом контурных токов. Все расчеты проводились с использованием вычислительной системы Mathcad 2000, при этом исследовалось воздействие на клетку переменного напряжения синусоидальной, прямоугольной, пилообразной и выпрямленной синусоидальной формы промышленной частоты. Результаты исследований представлены в таблицах 1 и 2.

На рис. 3 – 6 представлены зависимости токов в элементах схемы от величины напряжения и его формы. По результатам можно сде-

несколько менее выражено воздействие пилообразного напряжения.

3. Влияние переменного и выпрямленного синусоидального напряжения практически одинаково, однако зависимость тока через ионный канал от приложенного напряжения при наличии постоянной составляющей имеет сложный характер.

4. В отношении транспорта ионов калия наименьшее влияние оказывает синусоидальное напряжение, результаты воздействия других изученных форм близки.

5. Как следует из рис. 6, воздействие напряжения на дрожжевую клетку значительно увеличивает поток ионов калия и водорода через мембрану, что приводит, вероятно, к изменению интенсивности метаболизма клетки.

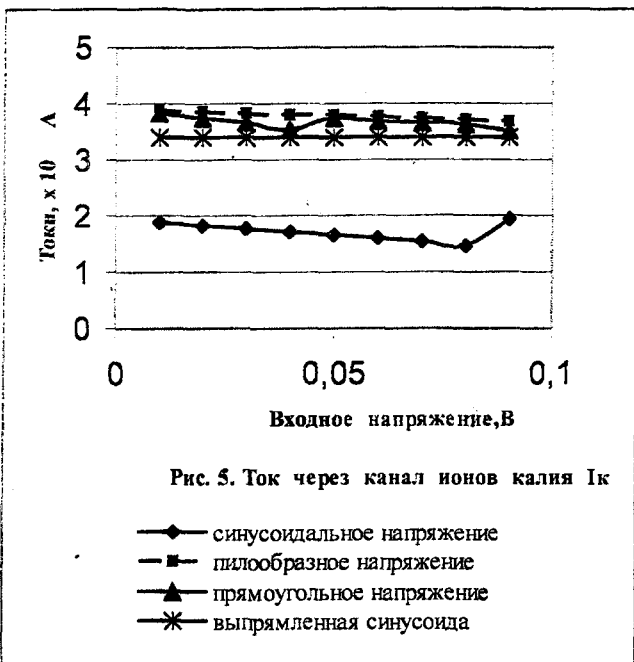
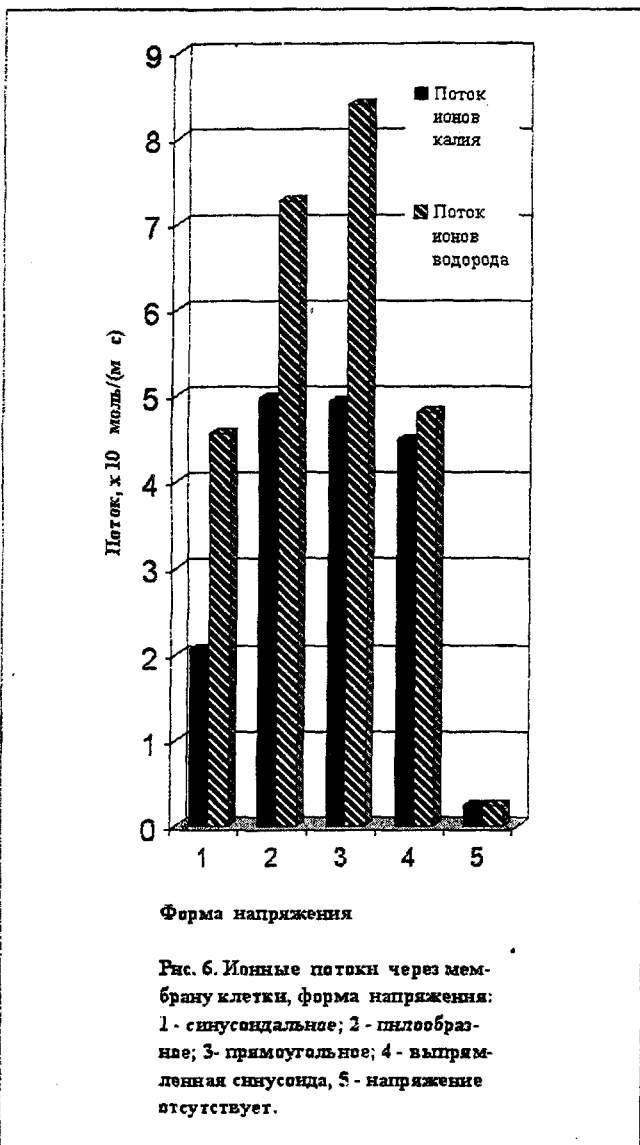


Рис. 5. Ток через канал ионов калия I_k

- ◆ синусоидальное напряжение
- пилообразное напряжение
- ▲ прямоугольное напряжение
- * выпрямленная синусоида



Форма напряжения

Рис. 6. Ионные потоки через мембрану клетки, форма напряжения: 1 - синусоидальные; 2 - пилообразные; 3 - прямоугольные; 4 - выпрямленная синусоида, 5 - напряжение отсутствует.

Литература

1. Сорочану Н. С. Исследование растительной ткани как элемента электрической цепи. - ЭОМ, 1/1983.
2. Баран А. Н. Технологическое действие электрического тока и оптимизация его параметров при обработке соломы в щелочных средах: Автореф. дис. на соиск. ученой степени к. т. н. - Челябинск, 1984. - 22 с.
3. Бородин И. Ф. Выбор электрической схемы моделирования зерновой массы. - МиЭСХ, 1/1971.
4. Мартиросов С. М. Бионасосы - роботы клетки? - М.: Радио и связь, 1981. - 320 с.
5. Трошин А. С. Распределение веществ между клеткой и средой. - Л.: Наука, 1985. - 192 с.
6. Веренинов А. Л. Транспорт ионов через клеточную мембрану. Анализ потоков. - Л.: Наука, 1978. - 286 с.
7. Руководство по цитологии. В 2-х томах. - М. - Л.: Наука, 1965 - 800с.
8. Rothstein A., Hayes A. D. The relationship of the cell surface to metabolism. Archives of biochemistry and biophysics, 1956, vol. 63.
9. Личко Л. П. Компартиментация неорганических ионов и регуляция их уровня в цитоплазме эукариотических микроорганизмов. Автореф. дисс. на соискание ученой степени к. б. н. - Пушкино - на - Оке, 1981. - 25 с.
10. Conway E. J., Moore P. T. A sodium - yeast and some of its properties. The Biochemical Journal, 1954, vol. 57

Читайте в следующем номере:

Анонс

М.В. Колончук "ТЕСТИРОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ДОИЛЬНЫХ УСТАНОВОК"

В зимнее время под воздействием отрицательных температур воздуха пластмассовые трубы молочных трубопроводов в конце кормовых проездов остывают и сжимаются сильнее, чем резиновые муфты. Это приводит к большим зазорам в стыке муфт и значительному подосу воздуха через них. В процессе эксплуатации зазоры между деталями вакуумного насоса увеличиваются. Интенсификация перетекания воздуха из нагнетательной полости во всасывающую снижает производительность вакуумного насоса. По этим причинам рабочий вакуум на эксплуатируемых доильных установках составляет зачастую 80% от требуемой величины - 50 кПа. Доеение коров низким вакуумом снижает на 3...25% надои молока, вынуждает устанавливать дополнительные вакуумные насосы и повышать затраты электрической энергии.