

# О МЕХАНИЗМЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА МИКРООРГАНИЗМЫ

Е.М. ЗАЯЦ, А.Е.ЗАЯЦ (БАТУ)

**С**истематическое исследование влияния электрических полей на микроорганизмы клеточного уровня начаты в конце прошлого века. На сегодня можно считать установленным влияние частоты и напряженности электрического поля, силы и продолжительности действия тока, материала токоподводящих электродов и рН среды на микроорганизмы [1]. Тем не менее в работе [2] сделан вывод об отсутствии обоснованного механизма биологического действия электрического поля на микроорганизмы. В предлагаемой работе предпринята попытка объяснить некоторые элементы механизма влияния электрического поля на микробную клетку.

Представим микробную клетку как биологический объект, состоящий из окруженной мембраной цитоплазмы, в которой происходят процессы биосинтеза и биоэнергетического запаса энергии. Выполнение этих функций сопряжено с транспортом вещества из окружающей среды в клетку и наоборот. Сочетание транспорта вещества с сохранением и автономностью внутреннего устройства клетки и обеспечивает мембрана толщиной порядка  $10^{-9}$  м. Разрушение мембраны приводит к уничтожению клетки. Определим величины частоты и напряженности внешнего электрического поля, нарушающие диффузионные потоки вещества через мембрану клетки, а также величину

концентрации ионов вне клетки, необходимую для создания пробойной разницы потенциалов.

Рассмотрим стационарную диффузию ионов, определяющих внутриклеточные процессы. Уравнение диффузии имеет вид:

$$\frac{d^2 n}{dr^2} + \frac{2dn}{rdr} = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями:

$r = R, n = n_1$  - концентрация ионов на границе клетки;

$r = \infty, n = n_0$  - концентрация ионов в области, удаленной от клетки;  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м - радиус клетки;  $n(r)$  - концентрация ионов на расстоянии  $r$  от клетки.

Решение (1) имеет вид:

$$n(r) = n_0 + \frac{(n_1 - n_0)R}{r} \quad (2)$$

Характерное время установления стационарного состояния в диффузионном процессе определяется соотношением:

$$\tau_0 = \frac{R_u^2}{D}, \quad (3)$$

где  $D \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с - коэффициент диффузии иона в среде;  $R_u$  - радиус диффундирующего объекта, м.

Из (3) следует, что характерная частота, т.е. частота "саморегуляции" объекта при установлении диффузионного стационарного состояния равна:

$$\nu_0 = \frac{1}{\tau_0} = \frac{P}{R_u^2} \approx 10^3 \dots 10^4 \text{ Гц.} \quad (4)$$

Следовательно, в случае внешнего воздействия с частотой  $\nu > \nu_0$  биологический объект не успевает прийти в равновесное состояние и возможна гибель клетки.

Оценим величину напряженности электрического поля, достаточную для воздействия на клетку. Диффузионный поток ионов через мембрану клетки с учетом ее сферической симметрии:

$$dI = -D ndS \quad (5)$$

или

$$I = D \int ndS = -4\pi R^2 D \frac{dn}{dr},$$

где  $dS$  - элемент поверхности клетки.

Из (2)

$$\frac{dn}{dr} = -\frac{(n_1 - n_0)R}{r^2}, \quad (6)$$

при  $r=R$

$$\frac{dn}{dr} = -\frac{n_1 - n_0}{R},$$

т.е.

$$I = 4\pi RD(n_1 - n_0). \quad (7)$$

С другой стороны, по определению

$$I = n_1 \nu S = 4\pi R^2 n_1 \nu,$$

где  $\nu$  - средняя скорость движения иона.

С учетом (7) и (8) получим

$$v = \frac{n_1 - n_0}{n_1} \frac{D}{R} \quad (9)$$

Под воздействием внешнего поля ион приобретает дрейфовую скорость

$$v_0 = bE, \quad (10)$$

где  $b$  - подвижность иона в среде,  $\text{м}^2/\text{сВ}$ ;  $E$  - направленность электрического поля  $\text{В/м}$ .

Прикладывая внешнее электрическое поле, способное изменить собственную диффузионную скорость ионов  $v$ , т.е. нарушить систему жизнеобеспечения микроорганизма, можно ожидать бактерицидное действие электрического поля.

Условие, при котором возможно нарушение вирулентности микробной клетки, имеет вид:

$$v_0 \geq v \quad (11)$$

Отметим подвижность ионов:

$$b_{\text{K}^+} = 689 \cdot 10^{-10};$$

$$b_{\text{N}^+} = 450 \cdot 10^{-10};$$

$$b_{\text{H}^+} = 3263 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{сВ}.$$

Используя (9) и (10) получим

$$E > \frac{n_1 - n_0}{n_1} \frac{D}{Rb} \quad (12)$$

При  $n_0 = 0$   $E > 10^5$   $\text{В/м}$ . Полученный результат с достаточно высокой степенью точности совпадает с данными работ, цитируемых в [1].

Концентрация ионов внутри живой клетки может в десятки раз отличаться от их концентрации во внешней среде, причем наблюдаются градиенты концентрации ионов разных знаков. Это связано с динамикой ионного транспорта через мембрану и зависит от свойств конкретной клетки. Разность концентрации ионов вне и внутри клетки создает разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой в 50...70 мВ. Эта разность потенциалов меньше напряжения пробоя мембраны (100...200 мВ) и, по-видимому,

безвредна для нее.

Рассчитаем градиент концентрации ионов на границе клетки, при создании которого возникает разность потенциалов, достаточная для пробоя мембраны.

Как показано в (9)

$$\bar{v} = \frac{n}{n_1} \frac{D}{R}, \quad (13)$$

где  $n/n_1$  - градиент концентрации ионов на мембране клетки. В свою очередь дрейфовая скорость иона связана с разностью потенциалов:

$$v_0 \approx b \frac{\phi}{l}, \quad (14)$$

где  $l$  - расстояние между областями с равными потенциалами,  $\text{м}$ .

Примем  $l = 1,5 h$ , где  $h$  - толщина мембраны.

Из (13) и (14) следует:

$$\frac{n}{n_1} \frac{D}{R} = b \frac{\phi}{l}, \quad (15)$$

$$\phi = \frac{n}{n_1} \frac{Dl}{Rb}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет рассчитать градиент концентрации ионов вне и внутри клетки, обеспечивающий требуемую разность потенциалов  $\phi$ .

Положим, что пробивная разность потенциалов для мембраны  $\phi_{\text{пр}} = 150$  мВ. Тогда из (16) получим необходимый градиент концентрации для соответствующих ионов:

$$\text{K}^+ \quad n/n_1 = 350$$

$$\text{Na}^+ \quad n/n_1 = 230$$

$$\text{H}^+ \quad n/n_1 = 1500$$

Используя уравнение Нернста:

$$\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_1}{c_2}$$

при  $c_1/c_2 = 230$  получим  $\phi = 144$  мВ, т.е. результаты практи-

чески идентичны.

Выражение (16) позволяет по известному градиенту  $n/n_1$  рассчитать возникающую при этом разность потенциалов, причем градиент концентрации может быть направлен в обе стороны т.е. меняя ионный состав среды, например, рН можно менять электрический заряд и поведение клетки.

Соотношение (16) получено в предположении ионного транспорта лишь одного вида ионов через мембрану. В общем случае (16) имеет вид:

$$\phi = \frac{Dl}{Rb} \left[ \frac{n_{(1)}}{n} + \dots + \frac{n_{(n)}}{n} \right], \quad (17)$$

где  $n(i)/n$  - градиент  $i$ -го вида ионов, участвующих в транспорте через мембрану.

Таким образом, в предлагаемой работе высказано предположение, что транспорт ионов, обуславливающий нормальное функционирование биологической клетки, зависит от величины внешнего (не зависящего от концентрации ионов внутри клетки) и внутреннего (обусловленного зарядом ионов вокруг и в самой клетке) электрического поля.

В рамках этого предположения на основе решения уравнения стационарной диффузии и определения величины ионного потока через мембрану клетки получены выражения для расчета частоты и напряженности внешнего электрического поля, а также градиента концентрации ионов на границах мембраны, при которых может происходить нарушение ионной системы питания клетки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудельский Л. А., Савлук О. С., Дейнага Е. Ю. Влияние электрического поля на процессы обеззараживания воды. - К.: "Знание", 1980.

2. Волькенштейн М. В. Биофизика. - М.: Наука, 1981.

## Линейные нормы расхода топлива на автомобили и оборудование

МАРКА АВТОМОБИЛЯ И ОБОРУДОВАНИЯ	ВИД ТОПЛИВА	НОРМА РАСХОДА	
		л/100 км	л/маш-час
Легковой автомобиль Ford Escort 1,3	бензин	8,0	-
Легковой автомобиль Ford Escort 1,6	бензин	9,6	-
Легковой автомобиль Ford Escort 1,8Д	дизельное	7,0	-
Легковой автомобиль Ford Mondeo 1,6i	бензин	9,2	-
Легковой автомобиль Ford Mondeo 1,8ТД	дизельное	7,2	-
Легковой автомобиль Ford Scorpio 2.9i	бензин	13,7	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz 190 2. 0i	бензин	9,0	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz 200	бензин	9,2	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz 200Д	дизельное	8,8	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz 300Д	дизельное	9,4	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz G300	дизельное	12,0	-
Легковой автомобиль Mercedes-Benz E 320i	бензин	13,5	-
Легковой автомобиль BMW-520 i 2.0	бензин	10,0	-
Легковой автомобиль BMW-525i ( 123 кВт)	бензин	11,9	-
Легковой автомобиль BMW-530 3.0i	бензин	13,4	-
Легковой автомобиль Opel Ascona 1.3	бензин	8,2	-
Легковой автомобиль Opel Cadett 1.6 i	бензин	7,8	-
Легковой автомобиль Opel Cadett 1.7 Д	дизельное	5,8	-
Легковой автомобиль Opel Vectra 1.6 i	бензин	7,8	-
Легковой автомобиль Opel Vectra 1.8i	бензин	8,4	-
Легковой автомобиль Opel Vectra 2..0	бензин	9,1	-
Легковой автомобиль Opel Senator 3.0 i	бензин	13.0	-
Легковой автомобиль Volkswagen Passat 1.6	бензин	8,5	-
Легковой автомобиль Volkswagen Passat 1. 8Т	бензин	10,1	-
Легковой автомобиль Volkswagen Passat 1.9 ТД	дизельное	7,5	-
Легковой автомобиль Volkswagen Jetta 1.8i	бензин	8,6	-
Легковой автомобиль Peugeot 406 2.0	бензин	10,0	-
Легковой автомобиль Peugeot 605 2.0 (84 кВт)	бензин	10,4	-
Легковой автомобиль Peugeot 605 3.0i (123 кВт)	бензин	12,9	-
Легковой автомобиль Peugeot 605 3 0i (147 кВт)	бензин	13,5	-
Легковой автомобиль Volvo S-40 2.0i	бензин	10,8	-
Легковой автомобиль Volvo-850 T-5 2.3i	бензин	12,5	-
Легковой автомобиль Toyota Carina 1.6i	бензин	8,9	-
Легковой автомобиль Toyota Corolla 1.6i	бензин	8,9	-
Легковой автомобиль Alfa Romeo Sport Wagon 1.3	бензин	8,5	-
Легковой автомобиль Alfa Romeo 164L 3.0i	бензин	12,7	-
Легковой автомобиль Nissan Patrol 3.3 Д	дизельное	12,0	-
Легковой автомобиль Lancia Thema 3.0i	бензин	12,0	-
Легковой автомобиль Scoda Favorit 135	бензин	8,8	-
Легковой автомобиль Rasez Daewoo 1.5	бензин	9,0	-
Легковой автомобиль Fiat Punto 1.1i	бензин	8,0	-
Легковой автомобиль МЗМА-2141 с двиг. УМЗ-3313	бензин	10,5	-
Легковой автомобиль Daewoo Nexia 1.5i	бензин	8,4	-
Легковой автомобиль ВАЗ-21044 1,7i	бензин	8,8	-
Автобус ПАЗ-3207	сжижен. газ	47,3	-
Автобус Neoplan 216 Н с двиг. Скания	дизельное	32,0	-
Микроавтобус Volkswagen Transporter 1,6 Д	дизельное	8,6	-
Микроавтобус Volkswagen Transporter 2,0 I	бензин	13,5	-
Микроавтобус Volkswagen Caravella 2,0	бензин	13,5	-
Микроавтобус Volkswagen Caravella 2,5	бензин	14,7	-
Микроавтобус Volkswagen Sharan 2,0i	бензин	11,5	-

МАРКА АВТОМОБИЛЯ И ОБОРУДОВАНИЯ	ВИД ТОПЛИВА	НОРМА РАСХОДА	
		л/100 км	л/маш-час
Микроавтобус Ford Transit 2,5 Д (9 и 12 мест)	дизельное	10,0	-
Микроавтобус Ford Transit 2,5 ТД (9 мест)	дизельное	11,2	-
Микроавтобус Mercedes-Benz 308 Д (14мест)	дизельное	10,8	-
Микроавтобус Mercedes-Benz 314 E (Sprinter) (9 мест)	бензин	13,9	-
Микроавтобус Toyota Hiace 2,5 Д (9 мест)	дизельное	9,5	-
Микроавтобус ГАЗ-3221 "Газель"(9мест)	бензин	16,3	-
Микроавтобус ГАЗ-32213"Газель"(13мест)	бензин	17,0	-
Седельный тягач DAF - 95/400	дизельное	25,5	-
Седельный тягач Volvo FH - 12	дизельное	25,0	-
Седельный тягач Volvo F - 12	дизельное	24,5	-
Седельный тягач Iveco 190-36	дизельное	24,1	-
Седельный тягач МАЗ - 64229 (дв. ЯМЗ - 238Н форсир.)	дизельное	34,0	-
Грузовой автомобиль - фургон Ford Transit 2,0	бензин	15,2	-
Грузовой автомобиль - фургон Ford Escort VAN 1,3	бензин	8,0	-
Грузовой автомобиль - фургон Iveco 3510	дизельное	11,0	-
Грузовой автомобиль - фургон Iveco 4912 TD	дизельное	10,3	-
Грузовой автомобиль - фургон Volkswagen LT - 50	дизельное	13,5	-
Грузовой автомобиль - фургон Mazda E220 0	дизельное	9,0	-
Грузовой автомобиль - фургон Magirus Deutsch 130	дизельное	14,6	-
Грузовой автомобиль - фургон MAN - 12.192	дизельное	19,7	-
Грузовой автомобиль - фургон MAN - 19.321	дизельное	28,1	-
Грузовой автомобиль - фургон MAN - 24.292	дизельное	26,9	-
Грузовой автомобиль-фургон Mercedes-Benz 709 D	дизельное	16,0	-
Грузовой автомобиль-фургон Mercedes-Benz 809 D	дизельное	15,0	-
Грузовой автомобиль - рефрижератор Mercedes - Benz 1617	дизельное	20,7	-
Грузовой автомобиль - пикап Scoda Pickup	бензин	9,2	-
Грузовой автомобиль - пикап Scoda Forman Plus	бензин	8,1	-
Грузовой автомобиль - фургон Fiat Ducato 2,5D	дизельное	8,5	-
Грузовой автомобиль - фургон ЗИЛ - 43317В	дизельное	24,5	-
Грузовой автомобиль автовоз Mercedes - Benz 1624	дизельное	28,0	-
Грузовой автомобиль с цельнометаллическим фургоном ГАЗ - 2705 "Газель"	бензин	15,6	-
Грузопассажирский автомобиль DAF-400	дизельное	-	-
Специальный грузопассажирский автомобиль ГАЗ-33021 "Газель"	бензин	15,6	-
Спецавтомобиль с экскаватором УДС-114 А на шасси Tatra- 815	дизельное	42,0	7,3
-отопитель	дизельное	0,9	-
Спецавтомобиль с экскаватором 4421 на шасси КраЗ-255Б1А	дизельное	51,0	9,2
Спецавтомобиль с автокраном КС-3574 на шасси Урал-5557-01	дизельное	46,0	8,0
Специальный грузовой автомобиль-фургон ГАЗ-4301	дизельное	21,6	-
-отопитель фургона	дизельное	-	0,8
Лесовоз МАЗ-54352 с манипулятором Loglift-65	дизельное	45,0	5,0
Бензовоз АТЗ-4,4 на шасси ЗИЛ-131	бензин	48,0	-
- наполнение (слив) 1 цистерны	бензин	-	3,5
Бензовоз Урал-375 (АЦ-5,5)	бензин	61,0	-
- наполнение (слив) 1 цистерны	бензин	-	4,0
Транспортер-тягач ГТ-СМ-1	бензин	80,0	-
Транспортер-тягач ГАЗ-3403-11	бензин	80,0	-
Экскаватор ЭО4225-02	дизельное	-	16,0
Компрессорная станция ПКСА-5,25 ДУ	дизельное	-	6,5
Компрессор W2900	дизельное	-	20,0
Автопогрузчик Штиль Р-70-30	дизельное	-	2,0