

# К ВОПРОСУ О БАКТЕРИЦИДНОМ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ РАСТВОРОВ

Е.М. ЗАЯЦ, д.т.н., профессор; В.А. КАРАСЕНКО, к.т.н., профессор; А.Е. ЗАЯЦ, студент (БАТУ);  
З.Е. ЕГОРОВА, к.т.н., доцент (БГТУ)

Экспериментальными исследованиями и практикой подтверждена высокая эффективность обеззараживания электрическим током (промышленной частоты 50 Гц) различных растворов (питьевой воды, молока, уксуса, вин и др.), жидких и влажных дисперсных систем (кормосмесей, пищевых отходов, парниковой почвы, навоза и др.) [1, 2, 6, 8, 11 и др.]. Однако единого мнения о природе бактерицидного действия тока пока не выработано. Разноречивы толкования роли и соотношения теплового и “нетепловых” (поляризация, электролиз, изменение водородного показателя и др.) действий тока, что в значительной мере определяет энергоэкономическую эффективность электрообеззараживания.

Анализ всех возможных факторов, определяющих бактерицидные действия тока - достаточно емкая задача. Остановимся на наиболее очевидном из них - тепловом (термическом) действии тока на примере классического процесса обеззараживания - пастеризации молока.

Исследования по электропастеризации молока ведутся издавна, но достаточного понимания природы бактерицидного действия тока в этом важном процессе пока нет, как (возможно по этой причине) и его широкого практического внедрения.

Основательные теоретические и экспериментальные исследования этой проблемы провел еще в пятидесятые годы проф. Е.П. Виноградов [2]. Основное внимание он уделил высокочастотной пастеризации, (которая здесь не затрагивается), а по пастеризации током низкой частоты выводы автора свелись к утверждению, что снижение температурного уровня электропастеризации по сравнению с паровой (как основной энергоэкономический эффект электропастеризации) обусловлено действием тока не на микрофлору, а на другие компоненты молока, хотя, как известно, бактерицидный эффект тока имеет место не только в молоке, а например, в питьевой воде [8] и других подобных средах.

В последующих немногочисленных исследованиях по электропастеризации молока (Е.П. Наний, Л.В. Вишневская, В.И. Магда), обработке других жидкостных систем (иногда с иными технологическими целями) не внесена достаточная ясность в понима-

ние роли и особенностей термического действия тока в подобных средах.

Отмечая положительный технологический (в том числе бактерицидный эффект), авторы (в частности, касающейся термического действия тока) в основном конкретизировали некоторые известные преимущества тока как энергоносителя (объемный ввод энергии, высокую интенсивность нагрева, сравнительную простоту регулирования режимов и др.), а технологический эффект обычно относят к нетепловым его проявлениям, не всегда их конкретизируя и должным образом подтверждая экспериментально.

Будем рассматривать молоко - сложный по составу и свойствам коллоидный раствор упрощенно, как двухфазную дисперсную систему, в которой дисперсной фазой являются микроорганизмы и среди них микробактерии *Bact. tuberculosis* - наиболее опасный и устойчивый к внешним воздействиям возбудитель туберкулеза (туберкулезная палочка) а дисперсионной средой - остальная часть молока.

Микроорганизмы, имея одинаковые по знаку (отрицательные) электрические заряды, распределяются по объему равномерно, образуя с дисперсионной средой подобие матричной смеси. В отличие от непроводящих компонентов молока (жировые шарики, белки и др.) микроорганизмы обладают определенной электрической проводимостью и поэтому способны поглощать энергию электрического тока и трансформировать ее в тепловую.

Возбудитель туберкулеза - сложная клеточная структура, имеющая вид слегка изогнутой палочки длиной  $(0,8...5)10^{-6}$  м и толщиной  $(0,3...0,6)10^{-6}$  м. При анализе поведения в электрическом поле туберкулезную палочку упрощенно представляют в виде сферы диаметром  $10^{-6}$  м, эквивалентной по объему средним размерам палочки. В дальнейшем для сокращения будем именовать палочку термином “клетка”. Клетка имеет оболочку толщиной около  $7,5 \cdot 10^{-9}$  м, обладающую высоким электрическим сопротивлением и статической электрической емкостью. Внутри оболочки содержится вязкая полужидкая цитоплазма, имеющая удельное электрическое сопротивление близкое к сопротивлению воды. Оболочка выполняет основные защитные функции, обез-

печивает процессы жизнедеятельности, в том числе важнейший из них - обмен с окружающей средой.

Для выполнения роли термического фактора в бактерицидном действии тока применительно к пастеризации молока воспользуемся некоторыми технологическими параметрами процесса, установленными экспериментально и принятыми в практике низкочастотной электропастеризации [2, 10, 11]. Обработку производят в трехфазных камерах обычно с плоскопараллельной системой электрохимически инертных электродов при напряжении питания 380/220 В. Напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве принимают в диапазоне  $(25...50)10^2$  В/м. Молоко поступает в рабочие камеры пастеризатора из регенератора, имея температуру около 40°C. По условиям технологии конечная температура пастеризации 71°C при скорости нагрева 1,7°C/с (могут быть и иные температурные режимы).

Удельную электрическую проводимость молока при 20°C можно принять равной 0,48 См/м [2, 4, 5]. Температурная характеристика электрической проводимости молока [4]

$$\gamma_t = \gamma_{20} + 1,18 \cdot 10^{-2} (t - 20).$$

При средней температуре молока в камере обработки  $t=55^\circ\text{C}$  расчетная удельная проводимость молока

$$\gamma_t = 0,48 + 1,18 \cdot 10^{-2} \cdot 35 = 0,9 \text{ См/м,}$$

или удельное объемное сопротивление молока, принятое в дальнейших расчетах

$$\rho_M = 1,11 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Примем напряженность поля в межэлектродном пространстве  $E=4400$  В/м, тогда при фазном напряжении  $U=220$  В межэлектродное расстояние  $\ell_3=0,05$  м.

Принятые значения параметров рабочей камеры могут отклоняться в ту или иную сторону, но суть рассмотрения и конечные выводы от этого не меняются.

Клетки обладают определенной электрической проводимостью, отличной от средней проводимости молока, и часть общего

тока проходит через клетки, осуществляя термические и иные физико-химические действия. Величина тока через клетки (которая определяет, по сути, КПД использования энергии тока) зависит от электрических свойств клеток и их концентрации. Среднее содержание клеток в молоке (спустя 24 часа после доения и хранения при температуре 10°C) имеет порядок  $10^{10}$  кл/м<sup>3</sup>\*. Суммарный объем, занимаемый всеми клетками в 1 м<sup>3</sup> молока:

$$V_{\text{кл.}\Sigma} = V_{\text{кл}} N = \pi d_{\text{кл}}^3 \frac{N}{6} = \frac{3,14 \cdot (10^{-6})^3 \cdot 10^{10}}{6} = 0,523 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 / \text{м}^3,$$

где  $V_{\text{кл}}$  - объем одной клетки м<sup>3</sup>;  $N = 10^{10}$  кл/м<sup>3</sup>.

Как видно, суммарный объем клеток в молоке составляет ничтожную долю и не может оказывать заметного влияния на его электро- и теплофизические свойства.\*\* По этой причине установить непосредственное термическое воздействие тока на клетки обычными экспериментальными методами весьма сложно.

Электрофизические свойства молока и населяющих их микроорганизмов (в том числе и возбудителя туберкулеза) достаточно изучены и представлены в литературе. Поскольку электрохимическая система это и электрическая цепь, то зная параметры элементов цепи и используя известные в электро-

**Средние значения физических параметров молока и *Bact. tuberculosis*, принятые в расчетах**

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Численные значения	Источники
Плотность молока	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1010	[2, 5]
Удельная теплоемкость молока	$c$	Дж/(кг°C)	3890	[2, 5]
Удельная электрическая проводимость молока при 20°C	$\gamma$	См/м	0,48	[2, 4, 14]
Содержание клеток в молоке	$N$	кл./м <sup>3</sup>	$10^{10}$	[2, 5]
Диаметр клеток	$d_{\text{кл}}$	м	$10^{-6}$	[2, 13]
Толщина оболочки клетки	$\delta_{\text{об}}$	м	$7,5 \cdot 10^{-9}$	[12, 13]
Удельное поверхностное электрическое сопротивление оболочки клетки	$\rho_{\text{об}}^S$	Ом м <sup>2</sup>	0,1	[12, 15]
Удельное объемное электрическое сопротивление цитоплазмы клетки	$\rho_{\text{цп}}^V$	Ом м	5	[12, 15]
Удельная электрическая емкость оболочки клетки	$C_{\text{об}}^S$	Ф/м <sup>2</sup>	$10^{-2}$	[3, 13, 15]

\* Во избежание повторений, литературные источники, из которых заимствованы цифровые значения параметров молока и клеток, приведены в таблице. Этими источниками не охватывается обширная литература по рассматриваемому вопросу.

\*\* Понятно, что КПД технологического использования энергии электрического тока (применительно к задаче обеззараживания) также весьма низок. Снижение при электропастеризации температурной границы процесса может определенным образом характеризовать этот КПД.

технике методы расчета электрических цепей, можно с достаточной для инженерной практики достоверностью расчетным путем оценить термические (и другие) действия электрического тока, сверяясь в то же время, с имеющимися экспериментальными результатами. Такой подход оправдан и нередко его применяют там, где экспериментальные исследования (как в данном случае) представляют значительные трудности. Необходимые для расчетов значения параметров молока и клеток приведены в таблице.

Для составления электрической схемы замещения фрагмента молока с клетками, необходимой для расчетов, оценим количество клеток, которое может оказаться на пути линий тока между электродами. Суммарная площадь поверхности проекции всех клеток в 1 м<sup>3</sup> молока на поверхность, перпендикулярную линиям тока при условии равномерного их распределения по объему (матричная смесь)

$$A_{жс\sigma} = A_{жс} N = 0,785d_{жс}^2 \cdot N = 0,785 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{10} = 0,785 \cdot 10^{-2}$$

т.е. клетки перекрывают менее 1% площади поверхности на пути тока.

Выделим в объеме между электродами элементарную трубочку молока диаметром равным диаметру клетки. Из приведенного расчета видно, что в такой трубочке на пути тока может быть не более 1 клетки (притом только в одной из 127 элементарных трубочек, а остальные будут с "чистым" молоком).

Упрощенная электрическая схема замещения элементарной трубочки молока с клеткой может быть представлена (на частотах до 1 кГц) в виде (рис. 1,а) последовательного соединения сопротивления молока в трубочке  $r_M$  и комплексного сопротивления клетки, включающего комплексное сопротивление оболочки  $R_{OB} - C_{OB}$  (изображенного по схеме конденсатора с утечкой) и последовательно соединенного сопротивления цитоплазмы  $r_{ЦП}$ . В схеме замещения трубочки молока без клетки (рис. 1,б) фигурирует лишь сопротивление молока  $r_M$ . В обоих случаях имеет место одно и то же значение  $r_M$ , так как размер клетки  $d_{КЛ}$  пренебрежимо мал по сравнению с межэлектродным расстоянием  $l_Э$ .

Схема замещения трубочки молока с клеткой представляет собой пассивный двухполюсник, для которого ак-

тивные сопротивления  $r_{МК}$  (индекс "МК" означает цепь молоко-клетка, "М" - молоко, "К" - клетка), реактивные  $x_{МК}$  и модуль комплексного сопротивления  $Z_{МК}$  определяют по известным формулам электротехники [7], используя векторные диаграммы токов и напряжений (рис. 2,а) а также треугольник сопротивлений (рис. 2,б).

Для принятой схемы замещения:

- активная составляющая комплексного сопротивления цепи молоко-клетка

$$r_{МК} = r_M + r_{КЛ} = r_M + r_{OB} + r_{ЦП}, \quad (1)$$

где  $r_{OB}$  - активная составляющая комплексного сопротивления оболочки клетки:

$$r_{OB} = \frac{R_{OB}}{1 + (\omega C_{OB} R_{OB})^2}, \quad (2)$$

где  $R_{OB}$  - активное сопротивление оболочки;

- реактивное сопротивление оболочки клетки:

$$x_{OB} = \frac{-\omega \cdot C_{OB} \cdot R_{OB}^2}{1 + (\omega \cdot C_{OB} \cdot R_{OB})^2}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что

$$x_{OB} = x_{КЛ} + x_{МК}. \quad (4)$$

Модуль комплексного сопротивления оболочки

$$Z_{OB} = \sqrt{r_{OB}^2 + x_{OB}^2}. \quad (5)$$

аналогично - для клетки  $Z_{КЛ}$  и цепи молоко-клетка  $Z_{МК}$ .

Выразим элементы схемы замещения через их

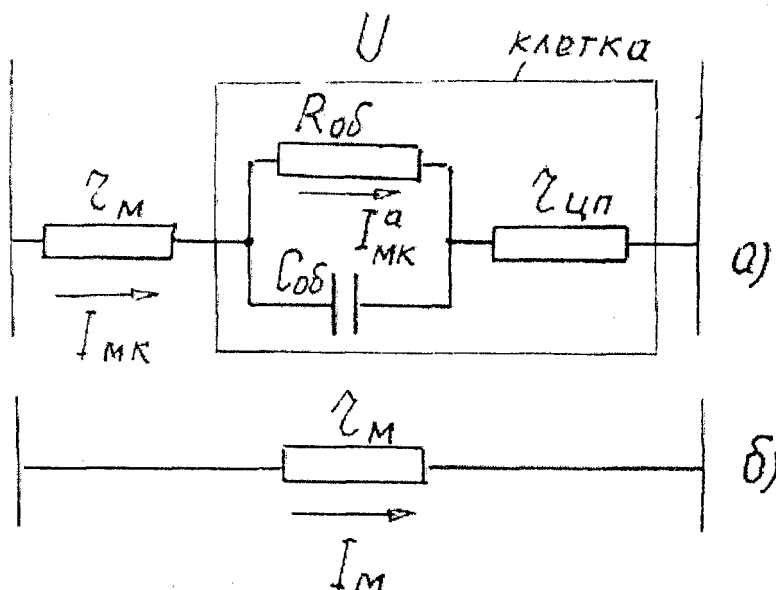


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема замещения трубочки молока с клеткой (а) и без клетки (б).

параметры

$$r_M = \frac{\rho_M^v \cdot \ell_{\text{Э}}}{S} = \frac{r_M^S}{S}, \quad (6)$$

$$R_{OB} = \frac{\rho_{OB}^S}{S}, \quad (7)$$

$$r_{OB} = \frac{r_{OB}^S}{S}, \quad (8)$$

$$r_{III} = \frac{\rho_{III}^S \cdot \delta_{III}}{S} = \frac{r_{III}^S}{S} \quad (9)$$

$$C_{OB} = C_{OB}^S \cdot S, \quad (10)$$

где  $\rho_i^v$  - удельное объемное (Ом·м)  $\rho_i^S$  и  $r_i^S$  - удельное поверхностное (Ом·м<sup>2</sup>) сопротивления  $i$ -го элемента;  $C_{OB}^S$  - удельная электрическая емкость оболочки Ф/ м<sup>2</sup>;  $\delta_{III}$  - толщина цитоплазмы клетки ( $\delta_{III} \cong d_{KLI} = 10^{-6}$  м); S - площадь поверхности сечения гипотетической трубочки молока, м<sup>2</sup>.

Так как площадь поверхности сечения S всех элементов трубочки одинакова ( $S = 0,785 \cdot d_{KLI}^2 = 0,785 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>), то для упрощения вычислений параметры элементов схемы замещения будем выражать через удельные поверхностные сопротивления  $r^S$ ,  $X^S$ ,  $\rho^S$  (Ом·м<sup>2</sup>) и удельную емкость  $C_{OB}^S$  (Ф/м<sup>2</sup>), а силу токов в элементах схемы - плотностью токов  $j_i = \frac{I_i}{S}$ .

Перейдем к определению численных значений элементов схемы замещения, используя приведенные в таблице данные.

Удельное поверхностное сопротивление молока в трубочке

$$r_M^S = \rho_M^v \cdot \ell_M = \frac{1}{\gamma_M} \ell_{\text{Э}} = 1,11 \cdot 0,05 = 0,056 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2,$$

где принято  $\ell_M = \ell_{\text{Э}}$ .

Активная составляющая удельного комплексно-

го поверхностного сопротивления оболочки клетки

$$r_{OB}^S = \frac{\rho_B^S}{1 + (\omega C_{OB}^S \rho_{OB}^S)^2} = \frac{0,1}{1 + (314 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1)^2} = 0,091 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Удельное поверхностное сопротивление цитоплазмы клетки

$$r_{III}^S = \rho_{III}^v \cdot d_{KLI} = 5 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Так как  $r_{OB}^S \gg r_{III}^S$ , то активная составляющая удельного комплексного поверхностного сопротивления клетки

$$r_{KLI}^S = r_{OB}^S + r_{III}^S \cong r_{OB}^S = 0,091 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Активная составляющая удельного комплексного поверхностного сопротивления цепи молоко-клетка

$$r_{MK}^S = r_M^S + r_{KLI}^S = 0,056 + 0,091 = 0,147 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Удельное реактивное поверхностное сопротивление цепи молоко-клетка по (3)

$$x_{MK}^S = \frac{-\omega \cdot C_{OB}^S \cdot (\rho_{OB}^S)^2}{1 + (\omega \cdot C_{OB}^S \cdot \rho_{OB}^S)^2} = \frac{-314 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1^2}{1 + (314 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1)^2} = -0,029 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Величина  $x_{MK}^S$  определяется удельным реактивным поверхностным сопротивлением оболочки клетки, так что

$$x_{MK}^S = x_{OB}^S = -0,029 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Модуль полного удельного поверхностного сопротивления клетки

$$Z_{KLI}^S = \sqrt{(r_{KLI}^S)^2 + (x_{KLI}^S)^2} = \sqrt{0,091^2 + 0,029^2} = 0,096 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Модуль полного удельного поверхностного сопротивления цепи молоко-клетка

$$Z_{MK}^S = \sqrt{(r_{MK}^S)^2 + (x_{MK}^S)^2} = \sqrt{0,147^2 + 0,029^2} = 0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Косинус угла сдвига тока относительно напряжения цепи молоко-клетка

$$\cos \varphi = \frac{r_{MK}^S}{Z_{MK}^S} = \frac{0,147}{0,15} = 0,98.$$

Плотность тока в трубочке молока с клеткой при фазном напряжении 220 В

$$j_{MK} = \frac{U}{Z_{MK}^S} = \frac{220}{0,15} = 1467 \text{ А/м}^2.$$

Активная составляющая плотности тока  $j_{МК}$

$$j_{МК}^a = j_{МК} \cdot \cos \varphi = 1467 \cdot 0,98 = 1437 \text{ А/м}^2.$$

Плотность тока в трубочке молока без клетки (измеряемая плотность тока в молоке)

$$j_M = \frac{U}{\rho_M^S} = \frac{U}{\rho_M^v \cdot \ell_{\Sigma}} = \frac{220}{1,11 \cdot 0,05} = 3964 \text{ А/м}^2.$$

Поверхностная плотность теплового потока в клетке (создаваемого электрическим током)

$$\varphi_{КЛ}^S = (j_{МК}^a)^2 \cdot r_{КЛ}^S = 1437^2 \cdot 0,091 = 1,88 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Так как  $r_{КЛ}^S \cong r_{ОБ}^S$  и  $\varphi_{КЛ}^S \cong \varphi_{ОБ}^S$ , то практически все тепловыделение происходит в оболочке клетки.

Объемная плотность теплового потока в оболочке

$$\varphi_{ОБ}^v = \frac{\varphi_{ОБ}^S}{\delta_{ОБ}} = \frac{1,88 \cdot 10^5}{7,5 \cdot 10^{-9}} = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^3.$$

Тепловой поток, выделяемый в клетке (оболочке)

$$\Phi_{ЖО} = \Phi_{МЗ} = \varphi_{МЗ}^v \cdot V_{МЗ} = \varphi_{МЗ}^v \cdot \pi \cdot d_{ЖО}^2 \cdot \delta_{МЗ} =$$

$$= 2,5 \cdot 10^{13} \cdot 3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 7,5 \cdot 10^{-9} = 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ Вт.}$$

Объемная плотность теплового потока, отнесенная ко всему объему клетки

$$\varphi_{КЛ}^v = \frac{\Phi_{ОБ}}{V_{КЛ}} = \frac{\Phi_{ОБ}}{\left(\frac{\pi \cdot d_{КЛ}^3}{6}\right)} = \frac{5,8 \cdot 10^{-7}}{0,523 \cdot 10^{-18}} = 1,1 \cdot 10^{12} \text{ Вт/м}^3.$$

Следует отметить, что полученные значения тепловыделений в клетке не учитывают дополнительные тепловыделения, обусловленные протеканием поляризационных процессов в оболочке и появлением токов абсорбции, что требует отдельного рассмотрения.

Объемная плотность теплового потока в трубочке молока без клетки (в массе молока)

$$\varphi_M^v = j_M^2 \rho_M^v = 3964^2 \cdot 1,11 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3.$$

Полученная цифра имеет один порядок с тепловой нагрузкой рабочей зоны промышленных паровых пастеризаторов, что подтверждает достоверность приведенных расчетов.

Как видно, объемные тепловыделения в клетке (практически ее оболочке) на порядки превышают тепловыделения в массе молока. Это не является неожиданным и вытекает из известного в электротехнике положения о распределении мощностей в элементах электрической цепи.

Однако тепловыделения в клетке, сами по себе, еще не решают вопрос о ее температуре, которая по требованиям технологии к пастеризации должна быть не ниже 60°C, а также о соотношении температур клетки и массы молока (энергoэкономический

эффект электропастеризации). Для выяснения этого вопроса обратимся к другой стороне процесса - теплообмену клетки с окружающей средой.

Теплообмен клетки происходит в условиях слабой естественной конвекции, обусловленной наличием локальных температурных полей, и характеризуется очень малым, трудноопределимым критерием Рейнольдса. В литературе отсутствуют достоверные сведения по расчету теплообмена подобных микротел с внутренними источниками теплоты, а численные значения критериев подобия, фигурирующие в литературе по теплопередаче, не охватывают микротела, соизмеримые с клетками.

Наиболее близким по природе и порядку тепловых нагрузок греющей поверхности (в данном случае оболочки клетки) является теплообмен при нагреве и кипении воды на поверхности, непосредственно обогреваемой электрическим током [9]. Важным является и то, что коэффициент теплоотдачи, в этом случае, мало зависит от размера теплоотдающей поверхности и определяется значением поверхностной плотности теплового потока  $\varphi^S$  и давлением  $P$ .

В диапазоне значений  $\varphi^S = 5 \cdot 10^5 \dots 10^6 \text{ Вт/м}^2$  (в который укладываются полученные нами расчетные значения  $\varphi^S$  для поверхности оболочки клетки) и при атмосферном давлении экспериментальная зависимость имеет простой вид [9]:

$$\alpha = 3(\varphi^S)^{0,7}.$$

Для рассматриваемого случая:

$$\varphi^S = 1,88 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2, \text{ тогда}$$

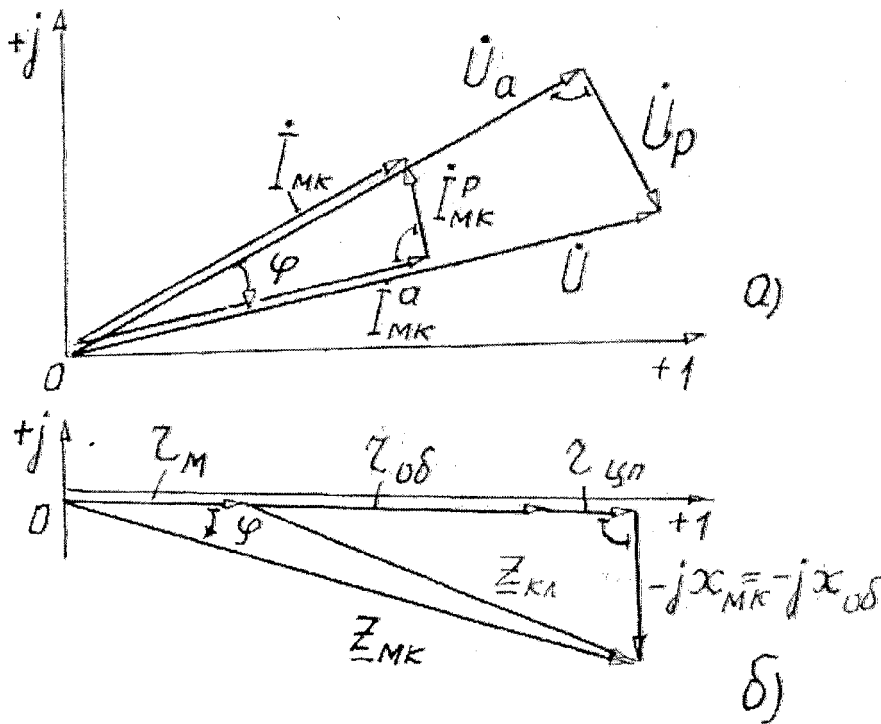
$$\alpha = 3(1,88 \cdot 10^5)^{0,7} = 1,51 \cdot 10^4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

Разность температур между клеткой и молоком определим, рассматривая клетку как цилиндр с внутренними источниками теплоты [9] диаметром, равным диаметру клетки и объемом, равным объему клетки

$$\Delta t = \frac{\varphi_{КЛ}^v \cdot d_{КЛ}}{4 \cdot \alpha} = \frac{1,1 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,51 \cdot 10^4} = 18 \text{ °C}.$$

Таким образом, на примере молока показано, что при обеззараживании электрическим током подобных систем в результате прямого избирательного термического воздействия тока температура бактериальных клеток существенно превышает среднюю температуру окружающего продукта. Не отрицая возможности воздействия других, "нетепловых" факторов, можно утверждать о важнейшей роли термического действия тока в снижении температурной границы электропастеризации молока.

Полученная цифра превышения температуры в 18°C является, разумеется, приближенной, но одно-



го порядка с результатами практики электропастеризации (6...10°C).

Постоянная времени нагрева клетки ничтожно мала, поэтому превышение ее температуры над температурой массы молока устанавливается практически мгновенно. Так, если поступающее в рабочую камеру молоко имеет 40°C, то температура клетки (теоретически) сразу становится равной (применительно к нашему расчету) 58°C. В действительности не все клетки (по разным причинам) "поражаются" сразу: некоторые из них инактивируются только на доли или несколько секунд, после чего на какое-то время возвращаются в обычное состояние несмотря на протекание тока [15]. Существенно снижается эффект пастеризации при обработке предварительно неочищенного молока (частицы примесей экранизируют клетки, "принимают удар на себя"). В дальнейшем температура клетки возрастает вместе с повышением температуры массы молока, которая в отличие от клетки нагревается менее интенсивно в силу меньших, как показано выше, тепловыделений. Температурный перепад между клеткой и молоком  $\Delta t$  остается практически неизменным, так что температурный уровень процесса пастеризации может быть снижен на величину  $\Delta t$ . Если же, пропуская ток, молоко одновременно охлаждать, сохраняя первоначальную температуру, то температура клетки не достигает необходимого для инактивации уровня (60°C) и подавления микроорганизмов не происходит.

Этот простой, но убедительный эксперимент нео-

провержимо доказывает решающую роль термического действия тока при обеззараживании растворов. Впервые это отметил проф. Е.П.Виноградов, пытаясь выявить "специфические", нетепловые бактерицидные действия тока. Поскольку эксперимент не дал положительных на этот счет результатов, автор объяснял причину снижения температурного уровня электропастеризации неодинаковым поведением некоторых компонентов молока (коагуляцией альбумина, жира) при электро- и обычной пастеризации, а также олигодинамическим эффектом (влиянием на микрофлору ионов металлов электродов). Однако последнее, достаточно известное явление, подтверждается лишь частично, при использовании электродов из благородных металлов.

Таким образом, можно утверждать, что в основе бактерицидного действия электрического тока при обеззараживании растворов и снижения температурного уровня процессов лежит непосредственное термическое действие тока на микроорганизмы. Учитывая возрастающую народнохозяйственную и экологическую важность проблемы, необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования процессов обеззараживания различных жидких и влажных сельскохозяйственных и других сред для полного выявления всех факторов бактерицидного действия тока и широкой практической реализации этой прогрессивной энергосберегающей технологии.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Байер В. Биофизика. Пер. с англ. - М.: ИЛ, 1962.
2. Виноградов Е.П. Электропастеризация молока. - Харьков, изд-во Харьковского университета, 1955.
3. Волькенштейн М.В. Молекулярная биофизика. - М.: Наука, 1975.
4. Вишневская Л.В., Магда В.И. Определение удельной электропроводности коровьего молока. "Сб. науч. тр. Харьковского института механизации и электрификации с.-х.", 1971, вып. 14, 16 т.1.
5. Горбатова К.К. Биохимия молока и молочных продуктов. - М.: Колос, 1997.
6. Заяц Е.М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов. - Мн.: Ураджай, 1997.

7. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. Учеб. для вузов - М.: Высш. шк., 1999.
8. Кульский Л.А. и др. Влияние электрического поля на процесс обеззараживания воды. - Киев, Знание, 1980.
9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче.- Л.: Госуд. энергет. изд-во, 1959.
10. Наний Е.П. Исследование и разработка электрических нагревателей для животноводческих ферм колхозов и совхозов. Автореф. канд. техн. наук. - М.: Москов. с.-х. акад. им. К.А.Тимирязева, 1962.
11. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. - М.: Агропищепромиздат, 1988.
12. Слюсарев А.А. Биология с общей генетикой. - М.: Медицина, 1978.
13. Тарусов Б.Н. Биофизика. - М.: ИЛ., 1968.
14. Stuart N.O. Electrical properties of agricultural products. "Trans. ASAE", 1973, 16, № 2.
15. Thompson D.R., Zacharian G.L. Dielectric theory and bioelectrical measurements. Part 1. "Trans. ASAE", 1971, 14, № 2.

УДК 621.923.7

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Л.М.КОЖУРО, д.т.н., профессор; В.И.ГАЛЬГО, к.т.н., доцент (БАТУ);  
А.П.РАКОМСИН, инженер (ГП "МАЗ")

**В**озбуждение электрического разряда и установление процесса - важные технологические операции электромагнитной наплавки (ЭМН), оказывающие влияние на производительность, качество покрытия, расход порошка и электроэнергии.

Установлено [1], что процесс ЭМН для системы с постоянной подачей порошка в рабочую зону происходит в несколько стадий: формирование "щетки" порошка на рабочем торце полюсного наконечника, замыкание цепи первой цепочкой-электродом, нагрев цепочки-электрода протекающим током, возбуждение, горение и погасание электрической дуги с замыканием цепи последующими цепочками-электродами.

Признаком установления стабильного процесса ЭМН является групповое перекрываемое горение цепочек-электродов в рабочей зоне.

В работе [1] при исследовании протекания электрического разряда в рабочей зоне показано, что образовавшиеся при электрическом разряде объемы жидкого металла выбрасываются из зоны расплавления. Однако точное место зарождения и развития электрического разряда с учетом того, что цепочка-электрод состоит из отдельных зерен, не указано. Определение точки, в которой происходит дуговой разряд в цепочке и управление его местоположением, важно для повышения производительности процесса, срока службы полюсного наконечника, снижения расхода ферропорошка и энергетических затрат.

Согласно теории термической ионизации, возбуждение и развитие электрического дугового разряда происходит в месте выделения наибольшего количества теплоты в системе "токопроводящий наконечник - электрод - деталь".

Для определения места возбуждения электрического разряда в цепочке-электроде и факторов, позволяющих управлять этим процессом, необходимо установить распределение температуры по длине токопроводящей цепочки-электрода в момент, предшествующий зарождению и развитию дугового разряда.

Из теории процессов сварки известно [2], что соприкосновение электрода с основным металлом характеризуется резким падением напряжения и нарастанием силы тока короткого замыкания. Цепочка-электрод на участке между заготовкой и токопроводящим наконечником нагревается протекающим током, согласно закону Джоуля-Ленца. В месте выделения наибольшего количества теплоты происходит перегорание цепочки-электрода и возникновение дугового разряда.

Известно [3], что при ЭМН электрод состоит из  $N$  дискретных частиц порошка, между которыми существуют дополнительные контактные сопротивления  $R_{12}, R_{23}, \dots, R_{(N-1)N}$ . Для рассмотрения нагрева цепочки-электрода принимаем ряд допущений: порошок состоит из одинаковых по форме зерен - эллипсоидов вращения с размерами большой и малой осей соответственно  $a$  и  $b$ ; в окрестности точки  $A$  (рис. 1)