
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Н.И. Ботошан, М.К. Болога, С.Е. Берзой

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПЛАЗМОЛИЗА

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

Электроплазмолиз известен как процесс деструктивного электрического воздействия на структуру биологического сырья [1]. Разрушение клеточного строения электрическим воздействием сопровождается явлением плазмолиза, при котором подавляются жизненные функции клеток. Разрывы клеточных мембран нарушают обменные взаимосвязи между клеточными компонентами, основательно изменяя роль клеточной жидкости центральной вакуоли растительных клеток. Воздействие электрического тока инициирует перестройку клеточной жидкости, превращая структурированное биологическое сырье в смесь из остатков клеточных тканей в высвобожденной жидкости [2]. Поэтому выявление уровня электрического воздействия на биологическую среду, определяющего ее плазмолиз, позволяет установить критерии плазмолиза в технологических процессах. Очевидно, межклеточную жидкость можно освободить и другими способами – химическим, термическим или бактериальным, однако они вызывают дополнительные последствия, приводящие к структурным преобразованиям биологической среды. Например, термическое воздействие сопровождается коагуляцией цитоплазмы, образуя при температурах 40–50° С замкнутую термоизоляционную рубашку для вакуольной жидкости.

Для анализа и описания электроплазмолиза необходимо знание не только клеточного строения среды, но и функциональных особенностей мембранных перегородок [3]. Мембраны, окружающие клетку невидимой пленкой, создают полупроницаемый барьер между содержимым клетки и внешней интерстициальной средой, через которую свободно проходят вода и часть растворенных в ней веществ. Перегородки, разделяющие клетки на отсеки, построены из двойного слоя липидных молекул и практически непроницаемы для ионов и полярных молекул, растворимых в воде. В липидный слой встроены многочисленные белковые молекулы и молекулярные комплексы, обладающие пропускной селективностью для ионов и молекул. Барьерные свойства мембран и работа мембранных насосов создают неравновесное распределение частиц между клеткой и внеклеточной средой, что лежит в основе процессов внутриклеточной регуляции и передачи сигналов в виде электрических импульсов между клетками.

Поверхность мембраны исполняет роль матрицы, на которой располагаются в определенном порядке белки и белковые ансамбли, образующие такие системы, как перенос электронов, сохранение энергии в форме аденозинтрифосфата (АТФ), регуляция внутриклеточных процессов гормонами, опознание других клеток и чужеродных белков, рецепция света, механические воздействия и т.д. Гибкие и эластичные пленки, которыми по существу являются все мембраны, выполняют и определенную механическую функцию, сохраняя клетку целой при умеренных механических нагрузках и нарушениях осмотического равновесия между клеткой и окружающей средой [4].

Контактирующие с мембраной вещества могут иметь разный градиент концентраций, заряд, атомную или молекулярную массу, различные эффективные размеры. Все эти факторы в конечном итоге определяют результативность диффузии. Различная диффузионная скорость ионов является причиной генерации электрического потенциала, который в свою очередь становится фактором, сдерживающим дальнейшую диффузию одноименно заряженных частиц и, наоборот, облегчающим проникновение противоположно заряженных.

Внутриклеточные структуры представляют собой замкнутые мембранные везикулы (пузырьки). Каждый тип мембран содержит специфический набор белков – рецепторов и ферментов, но основа любой мембраны – бимолекулярный слой липидов, выполняющий в мембране две главные функции: служит барьером для ионов и молекул и структурной основой – матрицей для функционирования рецепторов и ферментов.

Диффузионные характеристики клеточного обмена

Экспериментально доказано, что между сторонами клеточной мембраны существует разность потенциала (потенциал покоя), составляющая 50–80 мВ, при этом внешняя поверхность мембраны заряжена положительно. Такая полярность наводится специальным ионным насосом, локализованным в мембране и нуждающимся в энергии. Перенос зарядов через мембрану подразделяют на активный транспорт, обеспеченный действием "насосов", и пассивный – за счет диффузии [3, 4]. Клеточная мембрана – это очень тонкая пленка толщиной порядка 50–70 Å и диэлектрической проницаемостью липидного бимолекулярного слоя $\epsilon \approx 3,5$. Исследования электрических параметров биологических мембран (Коул и Кёртис, 1935) показали повышенное электрическое удельное сопротивление $\rho \approx 10^5\text{--}10^9$ Ом·см, большую емкость 0,51 Ф/м², относительно высокую вязкость в сравнении с водой $\approx 10\text{--}100$.

Потенциал мембраны в основном определяется различной концентрацией ионов Na⁺ и K⁺ по разные ее стороны. На противоположные стороны мембраны влияет концентрация различных ионов: внутри клетки (in) мало ионов натрия и много ионов калия, а вне клетки (out) – наоборот. К примеру, в клетке аксона кальмара Na_{in}⁺ ≈ 50 ммоль/л, K_{in}⁺ ≈ 400 ммоль/л, а на внешней поверхности мембраны Na_{out}⁺ ≈ 460 ммоль/л, K_{out}⁺ ≈ 10 ммоль/л. Поверхность липидной мембраны усеяна сквозными порами диаметром 5–10 Å, площадь которых составляет примерно 0,06% поверхности всей мембраны. Радиусы ионов Na⁺ $\approx 1,9$ Å и K⁺ $\approx 2,66$ Å. В водной среде они приобретают размеры гидратации, притягивая полярные молекулы воды, причем размер гидратации калия меньше натрия.

В [5] предложено изящное пояснение действия "насосов" при помощи известного процесса "рассасывания" объемного заряда из замкнутого проводящего объема. Рассматривается замкнутая область проводящей среды сферической формы. Если среда, заключенная в этой области, обладает абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ_a и удельной избыточной проводимостью $|\sigma_+ - \sigma_-|$, тогда за время τ_M во внутренней области замкнутого объема произойдет полное "рассасывание" избыточной плотности зарядов. При этом поверхностная плотность заряда, определенная процессом "рассасывания", возрастает по закону [6]:

$$\rho_Q = \frac{Q}{4\pi R_c^2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_M}} \right),$$

где Q – суммарный избыточный заряд в замкнутом объеме. Рассмотрен случай объема радиуса R_c . Отметим, что для процесса "рассасывания" геометрическая форма замкнутого объема не принципиальна. Процесс "рассасывания" зарядов внутри клетки предопределяет активный транспорт через мембрану. Частичная гидратация натрия и калия во внутренней области клетки приводит к соотношению между их диаметрами $D_K > D > D_{Na}$, где D – средний диаметр мембранных пор. Если бы клетка находилась в свободном состоянии (вне среды), тогда на внешней поверхности ее мембраны образовывался бы избыток положительного заряда, перенесенный ионами натрия через поры мембраны. Во внутреннем объеме клетки останется избыток отрицательного заряда, равный по величине заряду, недостающему для нейтрализации среды, унесенному ионами натрия. Например, для макроклетки аксона кальмара эта разность зарядов составляет всего 20 ммоль/л, однако достаточна для обеспечения высокой напряженности электрического поля на мембране порядка $10^4\text{--}10^5$ В/см из-за ее малой толщины.

Напряженность поля на мембране E_Q отлична от нуля прежде всего в области толщины мембраны и равна:

$$\vec{E}_Q = \frac{Q\vec{r}}{4\pi\epsilon_a r^3}, (R_c - \delta \leq r \leq R_c),$$

где Q – избыток заряда на поверхности мембраны. Поскольку среда не обладает свободным зарядом (нейтральная среда), его избыток равен заряду "рассасывания" из внутриклеточного замкнутого объема.

Экспериментальные исследования осмотических явлений в растительных клетках датским ботаником Х. де Фризом (1848–1935) послужили ученым Вант-Гоффу и Аррениусу основой для создания физико-химических теорий осмотического давления и электролитической диссоциации. В 1888 г. немецкий физик-химик В. Нернст вывел уравнение диффузионного потенциала, а в 1902 г. Ю. Бернштейн впервые привлек для объяснения электрических свойств живых клеток мембранную гипотезу.

То, что живая клетка не находится в свободном состоянии, а всегда окружена обменной средой, определяет наличие активного мембранного транспорта, в результате чего вблизи клетки возникает потенциал Нернста:

$$E_H = E_0 + \frac{0,058}{n \rightarrow Z_i} \lg C,$$

где C – концентрация раствора в окружении клетки, $n \rightarrow Z_i$ – валентность ионов, E_0 – энергия их активации.

Фактически потенциал Нернста показывает, что границей клетки в среде является не клеточная оболочка, а окружающее клетку облако ионного заряда, взаимосвязанного с состоянием и мембранным транспортом клетки. Поэтому в среде вблизи клеток течет диффузионный ток I_D , вызванный стремлением ионов выравнять концентрацию путем нейтрализации избыточного заряда внешней оболочки клетки. Именно процесс выравнивания концентрации вблизи клетки обеспечивает обмен ее веществ с окружающей средой, и в этом состоит секрет живой клетки.

Схематически график полного миграционного тока, проходящего в окружающем клетку растворе, представлен на рис. 1. На участке ОА проявляется остаточный ток, на АВ – скачок тока, соответствующий процессу зарядки мембраны путем "рассасывания" зарядов в замкнутом объеме внутри клетки, ВС – участок сатурации, где сила тока лимитирована скоростью диффузии ионов.

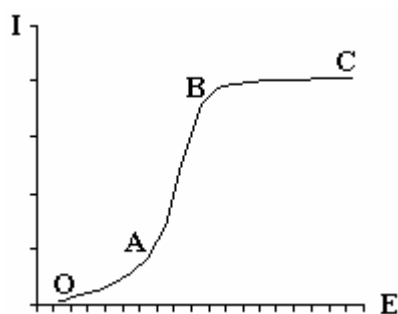


Рис.1. Кривая миграционного тока в окружающем клетку растворе

Заметим, что диффузионный клеточный ток определяет процесс перестройки клетки, то есть фазовые преобразования структуры. Преобразования радикального характера могут привести к дегидратации, вырыванию жирных молекул из мембраны, изменениям окислительно-восстановительных процессов как в области, непосредственно примыкающей к поверхности клетки, так и внутри ее. Естественно, самое сильное воздействие электрического тока – это полный плазмолиз клеток при разрушении структуры замкнутого проводящего объема.

Процесс уноса заряда при определенных условиях переноса и "рассасывания" зарядов внутри клетки является обратимым, и лишь длительное действие поля, превышающее возможности стабилизации, разрушает жизнеспособность структуры клетки [6]. Однако значения E_0 очень велики, и их превышение возможно только в высоковольтных полях. Разрушение клеточного строения путем электрических разрядов в биологической среде приводит к образованию проводящих токовых каналов и сильному нагреву сырья, вплоть до горения.

Оказывается, воздействовать на состояние клетки и ее структуру можно и миграционным током через окружающий клетку раствор. Согласно графику рис. 1 существует область значений напряженности внешнего поля (участок АВ), при которых происходит усиление обменного процесса через мембрану. Активация последнего за определенные промежутки времени приводит к дестабилизации структуры клетки – электроплазмолизу в умеренном токовом режиме.

Возможность разрушения жизнеспособной структуры можно рассмотреть на примере клетки сферической формы, обладающей способностью накапливать заряды на модельном конденсаторе емкости:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_c(R_c - \delta)}{\delta},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая восприимчивость среды, R_c – внешний радиус оболочки клетки, δ – внутренний радиус клеточной липидной мембраны.

Учитывая, что толщина клеточной мембраны $\delta \ll R_c$, для оценки значения C получаем выражение

$$C_{\text{кл}} = 4\pi\epsilon_a \frac{R_c^2}{\delta},$$

где ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость липидной клеточной мембраны. Кстати, поверхностная емкость мембраны пропорциональна отношению ϵ_a/δ , что позволяет оценить ее толщину.

Биологическая среда состоит из миллиардов клеток, составляющих в электрическом поле решетку $mC_{\text{кл}}$ параллельных и $C_{\text{кл}}/n$ последовательных соединений, и в принципе обладает значительной реактивной емкостью. Для оценки емкости среды можно применить аппроксимацию:

$$C = \frac{S}{2kR_c d} C_{\text{кл}},$$

где S – площадь поперечника контактных электродов, d – расстояние между электродами, R_c – радиус клеточной оболочки. Здесь k – коэффициент упаковки клеток сырья. Плотной упаковке соответствует $k = 1$, в общем случае $k > 1$.

Разрушительная способность тока будет проявляться в случае перекрытия напряженностью поля обработки области скачка диффузионного тока (рис. 1). Разрушительный процесс лучше проявляется в цепи переменного (импульсного) тока, так как разрушению способствует не само значение тока, а быстрота его изменения. В цепи переменного (импульсного) тока наряду с чисто реактивным емкостным сопротивлением $X_c = -\frac{1}{\omega C}$ (ω – частота переменного тока) биологическая среда обладает омическим (активным) сопротивлением R , которое следует учитывать при определении полного сопротивления.

В начальной стадии электрической обработки биологической среды наличие тока связано с изменением емкости, которое впоследствии приводит к разрушению клеточного строения путем дестабилизации клеточного потенциала мембраны.

Удобной характеристикой для описания воздействия тока на вещество является разность фаз ψ между током и напряжением. Известно, что ток, обеспеченный реактивной емкостью, отстает по фазе от активного на $-\pi/2$. В таком случае разность фаз ψ является отрицательной величиной, заключенной в интервале значений $(-\pi/2, 0)$, и определяется отношением реактивной и активной составляющих полного сопротивления. Исчезновению реактивного емкостного сопротивления среды соответствует стремление разности фаз ψ к нулю или разрушение клеточного строения.

В [6] показано, что уничтожение мембранного потенциала, являющегося характеристикой жизнеспособности клетки, можно реализовать уносом заряда с внешней оболочки клетки или усилением миграционного обмена, разрушающего электрические характеристики структуры клетки, приводящего к исчезновению разности фаз между реактивным и активным сопротивлениями среды. Исчезновение разности фаз между реактивным и активным сопротивлениями среды является признаком полной дестабилизации структурного равновесного состояния клетки.

Электроплазмолиз и эффекты стабилизации клеточного обмена

Электропроводность биологической среды на разных стадиях плазмолиза различна. Например, на начальной стадии, когда основная доля жидкой фракции сырья заключена во внутриклеточных вакуолях, электропроводность среды незначительна ($\approx 10^{-5} - 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). В результате плазмолиза среда превращается в смесь клеточных тканей в жидкости, обладая электропроводностью, аналогичной электропроводности растворов. Клеточный обмен через мембрану продиктован условием уноса заряда с внешней поверхности, приводящий к нарушению баланса носителей заряда между противоположными поверхностями мембраны. Необратимость такого процесса определена разрушением клеточной мембраны или плазмолизом клетки. В [7] обоснована модель стабилизации клеточного обмена, содержащая параметры генерации λ и уничтожения избыточного заряда κ во внутриклеточном объеме. Генерация избыточного заряда определена условием различной подвижно-

сти разнозарядных ионов. Рассасывание плотности избыточно-подвижных ионов во внутриклеточном объеме происходит за время релаксации $\tau_M = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{|\sigma_+ - \sigma_-|}$, которое определяет стабилизацию разности потенциала на мембране. Убыль и нейтрализация заряда с внешней стороны мембраны в принятой модели определены отношением скоростей уноса γ и генерации λ , соотношением $n_+ - n_- = -\frac{\gamma}{\lambda} n_Q$, где n_Q – число унесенных с поверхности мембраны единиц положительного заряда. Равновесная концентрация зарядов на мембране зависит от отношения скоростей генерации и отторжения ее соотношением $C_S = \frac{\lambda}{\kappa n_0} = \frac{n_S}{n_0}$. Формула стабилизации разности потенциала на мембране и концентрации носителей по обе стороны мембраны совпадает по форме с уравнением Ферхюльста-Перла [8], общее решение которого имеет вид $C(t) = \frac{C_S}{1 - (1 - C_S) \exp(-\lambda t)}$ и описывает эволюцию системы зарядов в клетке, а также стабилизацию мембранного потенциала.

На рис. 2 представлена зависимость концентрации от времени через параметр $x = \lambda t$ при различных значениях C_S равновесной концентрации носителей заряда на поверхности клеточной мембраны (интервал значений (0,1)). График подтверждает асимптотическое поведение в виде ступеней стабилизации потенциала.

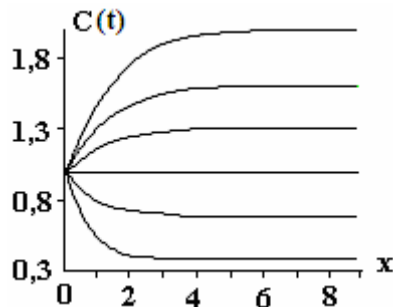


Рис. 2. Кривые стабилизации разности мембранного потенциала при заданной равновесной концентрации C_S на ее поверхности

Таким образом доказывается, что потенциал покоя на клеточной мембране создается селективно-пропускной способностью мембраны и принципом отторжения избыточно-подвижных ионов биохимических реакций во внутриклеточном объеме. Генератором избыточной плотности зарядов во внутренней области клетки является различие подвижностей ионов среды $|\sigma_+ - \sigma_-|$, притом на границу проводящего объема будут отторгаться ионы, подвижность которых больше [7]. Полное число генерируемых избыточно-подвижных ионов определяется соотношением $n_0 = \frac{|\sigma_+ - \sigma_-|}{\kappa \epsilon_0 \epsilon}$, где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость внутриклеточной среды. Принимая известное соотношение $\sigma = n_0 e u$ для проводимости через ионную подвижность u , получаем выражение для коэффициента отторжения зарядовой плотности $\kappa = \frac{e |u_+ - u_-|}{\epsilon_0 \epsilon}$ через характеристики среды. Фактор внешнего воздействия на клетку путем уноса заряда с внешней стороны мембраны порождает дополнительный отрицательный заряд во внутреннем объеме клетки ($Q_- = e \frac{\gamma}{\lambda} n_Q$), поддерживающий эластичную мембрану в напряженном состоянии (тургор), то есть в состоянии шарообразной формы. Накопленный избыток отрицательного заряда на внутренней стороне мембраны плотностью $\rho = \frac{e \gamma n_Q}{4 \pi \lambda r^2}$ создаст на нее давление $P = \frac{e^2 \gamma^2 n_Q^2}{16 \pi^2 \epsilon_0 \epsilon r^4}$, где r – радиус шарообразной клетки. Квадратичное усиление

фактора внешнего воздействия n_Q в выражении для давления указывает на способность к разрушению клеточного строения, разрыву мембраны токовым уносом и нейтрализации заряда с поверхности клеточной оболочки. Жесткое импульсное воздействие электрического тока на биологическое сырье сопровождается плазмолизом клеток – электроплазмолизом.

Двухкомпонентная модель электроплазмолиза

Явления переноса в двухкомпонентной модели биологического сырья и подразделением среды на две фракции – жидкую и тканей сухого вещества изложены в [9]. Для учета плазмолиза жидкую фракцию растительного сырья подразделяют на две части, которые по-разному участвуют в явлениях переноса. Доля внеклеточной жидкости имеет непосредственный контакт с внешней средой, а внутриклеточная – только через "сэндвич" из биологических мембран и желеобразного содержимого цитоплазмы. Удельные характеристики переноса жидких составляющих примерно равны. Составляющая тканей сухих веществ определяется удельной характеристикой, являющейся средней арифметической всех компонент сухого вещества среды. Для описания характеристик среды в динамике следует учесть, что составляющая внутриклеточной жидкости, равнозначная по удельным характеристикам внеклеточной, изолирована от прямого участия в процессах переноса и может активироваться лишь в результате плазмолиза [10].

Моделированный коэффициент удельной электропроводности биологического сырья является функцией долей составляющих (x, z) и удельных значений электропроводностей компонент (σ_L – жидкой и σ_S – сухих веществ):

$$\sigma(x, z) = \sigma_L \frac{\sigma_S(1-x) + xz(\sigma_L - \sigma_S)}{\sigma_S(1-x) + z(\sigma_L - \sigma_S)}.$$

Важной особенностью процесса электроплазмолиза является скорость изменения коэффициента электропроводности с варьированием соотношения между долями внеклеточной и внутриклеточной жидкостей:

$$\chi(x, z) = \frac{d\sigma(x, z)}{dx} = \frac{\sigma_L(\sigma_L - \sigma_S)^2 z^2}{[\sigma_S(1-x) + z(\sigma_L - \sigma_S)]^2}.$$

Скорость изменения удельной электропроводности модельной биологической среды связана со стадией процесса плазмолиза и определяется как заведомо положительная величина с квадратичной зависимостью от разности удельных характеристик составляющих среды и доли тканей сухих веществ z .

Скорость изменения удельной электропроводности свежего сырья определяется как:

$$\chi(0, y, z) = \frac{\sigma_L(\sigma_L - \sigma_S)^2 z^2}{[\sigma_S(1-z) + z\sigma_L]^2}.$$

В конце плазмолиза скорость изменения удельной электропроводности перестает зависеть от доли тканей сухих веществ:

$$\chi(x, 0, z) = \frac{(\sigma_L - \sigma_S)^2}{\sigma_L}.$$

Таким образом, скорость изменения коэффициента электропроводности по окончании плазмолиза является чисто материальной характеристикой, не зависящей от долей составляющих сырья.

Динамика процесса электроплазмолиза определяется удельной электропроводностью посредством изменения соотношения между долями компонент жидкой фракции. Доля составляющей тканей сухих веществ (при соблюдении условия полноты) остается всегда постоянной и указывает уровень потенциально возможного плазмолиза сырья. Отметим, что в случае обмена между средой и окружением (испарения жидкости или ее выход из среды) она перестает быть постоянной величиной.

Динамический параметр $\zeta(z)$, характеризующий отношение удельной электропроводности полностью плазмолизованного свежего сырья, определяет эффективность электроплазмолиза:

$$\zeta(z) = \frac{\sigma_P}{\sigma_N} = \frac{[z\sigma_S + (1-z)\sigma_L][(1-z)\sigma_S + z\sigma_L]}{\sigma_L\sigma_S}.$$

Эту характеристику можно выразить другим удельным коэффициентом переноса, например теплопроводностью сырья [2]. Характерный график эффективности плазмолиза $\zeta(z)$ представляет собой куполообразную кривую, выраженную производной

$$\frac{d\zeta(z)}{dz} = \frac{(\sigma_L - \sigma_S)^2}{\sigma_L \sigma_S} (1 - 2z).$$

Таким образом, наибольшую интенсификацию процессов переноса плазмолизом следует ожидать в биологических средах с содержанием тканей сухих веществ $z \neq 0,5$. В самом деле, эксперименты [11] указывают, что эффективность плазмолиза некоторых растительных сред ниже рыбного сырья [12], у которого доля составляющей тканей сухих веществ выше.

Хотя электроплазмолиз представляет собой один из эффективных способов усиления переноса электричества, тепла и массы, его применение не всегда энергетически выгодно, поскольку процесс осуществляется с затратами энергии на обработку сырья, которая при определенных условиях и удельных характеристиках компонент является неприемлемой. Поэтому представленный анализ плазмолиза двухкомпонентной модели биологической среды определяет критерии его эффективности и энергетической целесообразности одновременно.

Формула для эффективности плазмолиза, представленная в виде

$$\zeta(z) = \frac{(1 + \gamma)^2}{4\gamma} - \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma} (z - 0,5)^2,$$

указывает на изменение коэффициента переноса в зависимости от отношения удельных характеристик компонент $\gamma = \frac{\sigma_L}{\sigma_S}$, то есть чем больше параметр γ , тем значительнее эффект плазмолиза.

Однако потребительский эффект плазмолиза определяется не изменением обобщенного коэффициента электропроводности, а теплопроводностью в интенсификации теплообмена, или диффузии экстракции, или отделении жидкой фракции от тканей сырья [13].

Моделирование переноса тепла в растительных средах основывается на составном коэффициенте теплопроводности из компонентов сырья (λ_a – жидкой и λ_m – сухих веществ). Теплопроводность растительного сырья позволяет оценить эффективность теплопереноса. Коэффициенты теплопроводностей жидкой фракции и клеточной оболочки практически одинаковы у большинства растительных сред ($\lambda_a=0,58$ Вт/(м·К) и $\lambda_m=0,1$ Вт/(м·К)).

Учитывая, что для отношения удельных коэффициентов теплопроводности составляющих двухкомпонентной модели $\gamma \approx 6$, эффект плазмолиза в интенсификации теплопереноса определяется значениями $4 < \zeta(z) < 8$. Зависимость эффективности плазмолиза от доли сухих веществ для параметра $\gamma = 10$ представлена на рис. 3.

В однородном сырье, для которого $\gamma = 1$, эффект плазмолиза вообще не зависит от составляющей доли сухих веществ z и равен четырем. Таким образом, даже при одинаковых удельных характеристиках составляющих жидкой фракции и тканей сухих веществ эффективность электроплазмолиза равна четырем. Зависимость от z весьма ощутима при больших значениях γ , что обычно характерно для отношения коэффициентов электропроводности составляющих растительных сред. Поэтому для усиления эффекта электроплазмолиза или понижения уровня неэффективных затрат энергии при обработке сырья иногда целесообразно предварительно модифицировать долю тканей сухих веществ удалением или добавлением жидкости в обрабатываемую током среду. Эффект плазмолиза будет максимален для сред, у которых $z \approx 0,5$, однако скорость плазмолиза для них очень низкая.

Длительность обработки сырья током при электроплазмолизе зависит от скорости изменения обобщенного коэффициента электропроводности, а отношение скорости плазмолиза к коэффициенту электропроводности жидкой фракции стремится к нулю, когда $\gamma \approx 1$:

$$\frac{\chi(x, y, z)}{\sigma_L} = \frac{(1 - \gamma)^2 z^2}{[\gamma(1 - x) + z(1 - \gamma)]^2},$$

являясь заведомо положительной величиной.

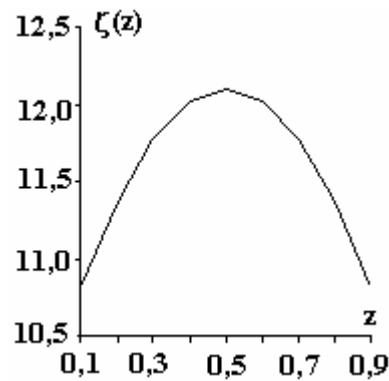


Рис. 3. Зависимость эффективности процесса переноса от доли сухих веществ

Таким образом, для сред, у которых $\gamma \approx 1$, электроплазмолиз вообще не осуществим. Для большинства растительных сред $\gamma \approx 10^{-10^2}$, что является четким критерием целесообразности электроплазмолиза [14]. Поэтому, когда удельная электропроводность жидкой фракции низкая, необходимо добавить в сырье растворенные соли и затем осуществить процесс плазмолиза.

Развитая модель сырья носит общий характер при описании процессов переноса электричества, тепла и массы. Согласование с экспериментом указывает на качественное и количественное совпадение результатов [14].

Интенсификации теплопереноса электроплазмолизом

Первичный аспект внедрения электроплазмолиза в технологиях переработки растительного сырья связан с высвобождением вакуольной жидкости и улучшением диффузии составляющих клетки, усилением экстракции веществ и жидкостей [15]. Например, высвобождение жидкости из клеток клюквенной кожицы повышает выход красящих веществ, а из кожицы виноградных гроздей – облагораживает ароматические характеристики вина.

Другой аспект внедрения связан с интенсификацией процесса переноса тепла электроплазмолизом [13]. Теплопроводность плазмолизованной биологической среды всегда больше, чем неплазмолизованного сырья. Этот факт определен высоким значением теплопроводности жидкой фракции сырья по сравнению с теплопроводностью составляющих сухих веществ [14]. Кроме интенсификации выпаривания жидкости электроплазмолиз также минимизирует потери тепла, являющиеся традиционным недостатком оборудования термической обработки [16]. Примером интенсификации диффузии предварительным электроплазмолизом служит процесс мацерации сула в производстве вина.

Плазмолиз биологической среды при температурах ниже коагуляции белков уравнивает роль теплопроводящих компонент в отношении переноса тепла, разрушая термоизоляционную преграду доступа к вакуольной жидкости, что способствует увеличению коэффициента теплопроводности для томатной мезги от начального значения $\lambda_n=0,4$ Вт/(м·К) до конечного $\lambda_p=0,55$ Вт/(м·К). Эффективность переноса тепла электроплазмолизом томатной мезги в производстве томат-пасты 27,3%.

Процесс передачи тепла в биологических средах характеризуется нестационарной теплопроводностью. Теплопроводность среды зависит нелинейно от содержания внеклеточной жидкости, доля которой определяется уровнем ее плазмолиза [13]:

$$\lambda(x, z) = \lambda_a \frac{\lambda_m(1-x) + zx(\lambda_a - \lambda_m)}{\lambda_m(1-x) + z(\lambda_a - \lambda_m)}$$

Формула указывает, что чем меньше доля сухой составляющей, тем ближе значение теплопроводности среды по отношению к воде, что характерно для двухкомпонентных смесей.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента теплопереноса в биологической среде от уровня внеклеточной высвобожденной жидкости x . Изменение теплопроводности наиболее существенно для биологических сред с большим содержанием сухих веществ. Основным результатом предварительного плазмолиза является сближение теплопереноса биологической среды к теплопереносу в жидкости. Поэтому по окончании плазмолиза различные виды биологического сырья по содержанию уровня биологических тканей имеют почти одинаковый по величине коэффициент теплопереноса. На приведенных кривых коэффициент теплопроводности (рис. 4) доли сухих веществ указан на каждой

отдельно. Изменение теплопроводности наиболее существенно для сред с большим содержанием сухих веществ. Малое содержание биологических тканей указывает на необходимость разрушения их малого объема, что способствует слабой интенсификации теплопереноса.

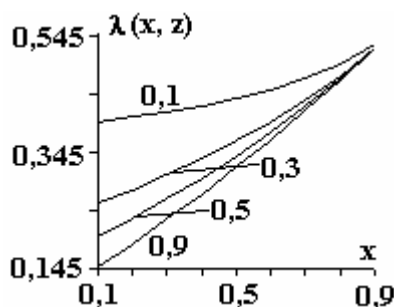


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопереноса в биологической среде от уровня высвобожденной жидкости при различном содержании сухих веществ

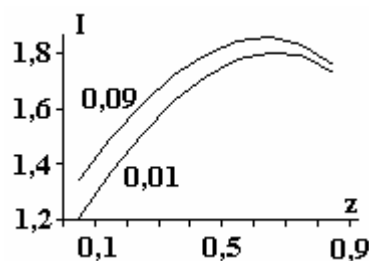


Рис. 5. Интенсивность выпаривания томат-пасты требуемой концентрации сухих веществ при заданном z_0 сырья

Скорость изменения теплопереноса в биологической среде зависит от величины z , указывающей наличие тканей в клеточном строении среды, что позволяет оценить энергетические затраты на предварительную обработку сырья для интенсификации процесса. Скорость изменения теплопереноса среды плазмолизом можно определить аналогично скорости электроплазмолиза, вычисляя производную теплопроводности $\lambda(x, z)$ по содержанию высвобожденной влаги x .

Оптимизация процесса выпаривания

В большинстве случаев термическая обработка направлена на удаление части жидкой фракции в процессах концентрации или сушки биологического сырья. Разработаны специальные установки, проектирование которых учитывает как термические характеристики сырья, так и параметры режимов обработки. Это особенно важно, когда термическая обработка может пройти с потерей качества конечного продукта. Поэтому интенсификация теплообмена всегда сталкивается с определенными ограничениями режимов обработки и параметров установок. Кроме того, оптимизация процесса предполагает минимум тепловых потерь.

Скорость испарения жидкой фракции зависит от состояния среды, режима и параметров установки следующим образом [13]:

$$a_k = \frac{K\lambda(T_0 - T_c)}{q\rho d^2},$$

где K – коэффициент, определяющий способ нагрева.

Учитывая скорость выпаривания, можно вычислить длительность термообработки для получения необходимой концентрации сухого вещества z в конечном продукте:

$$\tau_{\text{обп}} = \frac{q\rho d^2}{k(T_0 - T_c)} \int_{z_0}^z \frac{dz}{\lambda(z)},$$

где $k = 2$ или 8 в зависимости от способа нагрева – с одной или двух поверхностей; z_0 и z – начальная и конечная доли содержания сухих веществ. Интенсивность процесса выпаривания предварительным электроплазмолизом сырья можно оценить временем обработки.

Зависимость интенсификации выпаривания томатной пасты с начальным содержанием сухих веществ $z_0 = 0,01 - 0,09$ представлена на рис. 5. Для томат-пасты эффект интенсификации выпаривания незначительно зависит от доли содержания сухих веществ в начале термообработки.

Принцип оптимизации состоит в поддержании фиксированной температуры и нулевого потока тепла на самой отдаленной изотермической поверхности от поверхностей нагрева. Развитая методика оптимизации процесса выпаривания позволяет увязать основные характеристики термообработки – степень интенсификации и длительность процесса для достижения заданного уровня содержания сухих веществ в конечном продукте с режимом нагрева, параметрами установки и удельными тепловыми характеристиками компонентов среды.

Производственные характеристики интенсификации теплопереноса подтверждаются результатами аналитической модели. Модельные характеристики позволяют прогнозировать как эффектив-

ность предварительного плазмолиза для интенсификации теплопереноса, так и энергетические затраты предварительной обработки сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ботошан Н.И., Берзой С.Е.* Явление электроплазмолиза биологических сред и перспективы ее применения в пищевой перерабатывающей промышленности // *Электронная обработка материалов.* 1994. № 2. С. 73–76.
2. *Берзой С.Е., Ботошан Н.И., Болога М.К.* Электроплазмолиз – состояние развития и некоторые перспективы // *Электронная обработка материалов.* 2000. № 5. С. 126–132.
3. *Нобел П.* Физиология растительной клетки. М.: Мир, 1973. 288 с.
4. *Жолкевич В.Н. и др.* Водный обмен растений. М.: Наука, 1989. 256 с.
5. *Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е.* Время релаксации Максвелла и электризация проводящих сред // *Электронная обработка материалов.* 2003. № 6. С. 44–52.
6. *Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е.* Некоторые особенности разрядных и токовых режимов электроплазмолиза // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 2. С. 59–63.
7. *Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е.* Клеточная модель электроплазмолиза // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 5. С. 60–64.
8. *Эбелинг В.* Образование структур при необратимых процессах. М., 1979.
9. *Ботошан Н.И., Папченко А.Я., Чебану В.Г., Берзой С.Е., Лымарь А.С.* Явление гистерезиса при электрообработке биологических сред // *Электронная обработка материалов.* 1988. Кишинев, Т: 141(3). С. 70–74.
10. *Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е.* Модель описания электроплазмолиза двухкомпонентного биологического сырья // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 2. С. 64–68.
11. *Ботошан Н.И., Берзой С.Е., Болога М.К., Чебану В.Г., Папченко А.Я.* Динамические характеристики процесса электроплазмолиза растительного сырья // *Электронная обработка материалов.* 1989. Кишинев, Т: 149(5). С. 58–62.
12. *Болога М.К., Берзой С.Е., Ботошан Н.И., Захарчук А.В., Скимбов А.А.* Применение электроплазмолиза в производстве жира из светящегося анчоуса // *Электронная обработка материалов.* 1988. Кишинев, Т. 6. С. 67–72.
13. *Ботошан Н.И., Болога М.К., Берзой С.Е.* Интенсификация теплообмена в биологической среде электроплазмолизом // *Электронная обработка материалов.* 2005. № 1. С. 68–75.
14. *Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И.* Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
15. *Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Щеглов Ю.А. и др.* Электроплазмолиз. Кишинев, 1978.
16. *Стабников В.Н., Баранцев В.И.* Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1983. 327 с.

Поступила 29.09.05

Summary

The analysis of an electropasmolysis of biological raw material is lead(carried out, spent), the basic singularities of process in correlation with performances of a cell-like interchanging and requirement of stabilization of a potential on a membrane are secured (discharged). The measure(test) of a plasmolysis on a difference in phase between a current through capacity reactive and fissile environmental resistances is submitted. Is shown, that the factor of ablation of a charge from a cell-like envelope by a current frames square-law intensifying of pressure in a cell resulting in to a plasmolysis. The bipropellant model is considered which parts a fluid fraction of raw material on two parts – inside and exocellular. The nature of model consists in unique exposition of transport phenomenas – electrical conductivity, thermal conduction or diffusion. On the establishment of model of raw material the parameters describing efficacy and intensification of transmission are deduced (removed). The basic analytical performances of process of transmission are well compounded with experimental datas in a wide gamut of the attitude amounting of raw material - fluid fraction and dry matters. On an example of process of an evaporation at concentration or drying of vegetative raw material the optimization on a minimum level of heat wastes surveyed.