

А.М. Даниленко, М.П. Купчик, И.С. Гулий, В.М. Фалес

СОЗДАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО УСТРОЙСТВА СВЧ-ОБРАБОТКИ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ

*Украинский государственный университет пищевых технологий,
ул. Владимирская, 68, Киев-33, 01033, Украина*

Главная задача сахарного производства – повышение выхода сахара и уменьшение его потерь до стандартов сахароварения в Европе.

Эффективность обессолаживания свекловичной стружки зависит от степени плазмолиза мембран клеток свекловичной ткани. Тепловая обработка стружки в типовых экстракторах с целью плазмолиза клеток путем контактного или рекуперативного теплообмена не обеспечивает равномерный нагрев стружки до температуры, установленной техническим регламентом [1]. Известно, что степень плазмолиза клеток отличается для различных способов нагрева. Наибольшая степень плазмолиза по сравнению с обычным тепловым ошпариванием достигается при обработке стружки в электрическом поле [1, 2]. Однако достичь равномерного воздействия электрического тока при приложении потенциала к массе стружки без помещения ее в проводящую среду не всегда удается. Объясняется это тем, что электрический ток проходит через проводник по пути наименьшего сопротивления, поэтому часть стружки, находящаяся вне непосредственного контакта с электродами, может оказаться вне действия электрического поля. Равномерное взаимодействие фактора электрического пробоя мембран клеток растительной ткани возможно лишь при обработке стружки в электромагнитном поле СВЧ, имеющем достаточно однородную структуру.

Известны результаты исследований термообработки свекловичной стружки в СВЧ-поле [3]. Нагрев проводился в стандартной прямоугольной резонансной камере, используемой в СВЧ-печи. Конструкция такой камеры, хотя и имеет достаточно однородное распределение электромагнитного поля, однако не обеспечивает высокого коэффициента полезного действия и имеет существенные энергетические потери.

Задача создания эффективного устройства СВЧ-обработки свекловичной стружки сводится к определению типа и геометрии СВЧ-облучателя, при котором мощность СВЧ-колебаний рассеивается непосредственно в образце диэлектрика, а потери на отражение не превышают 0,05 дБ ($K_{СВН} < 1,02$). Для этого способ ввода мощности в обрабатываемый материал должен обеспечивать максимальное согласование плоскости падения электромагнитной волны на слой диэлектрика. Достижение минимального значения нормализованного фазового параметра в плоскости апертуры облучателя позволяет исключить потери мощности в отраженной волне, а согласование на границе диэлектрика уменьшает потери мощности, рассеиваемой внутри экранирующей камеры.

В качестве устройства ввода мощности была исследована проводящая структура полоскового типа. Проведен анализ распределения электрического и магнитного поля в прилегающих к поверхности полосковой структуры областях, а также разработан метод расчета, упрощающий численный анализ структуры.

Рассмотрим экранированные связанные передающие линии в виде двух полосок, расположенных одна на другой (рис. 1).

Система имеет две плоскости симметрии $0-a$ ($y=0$) и $0-b$ ($x=0$). Учитывая симметрию структуры и возможность формулировки граничных условий на плоскостях симметрии, можно ограничиться рассмотрением полосковой линии, находящейся в первом квадранте ($0 \leq y \leq h$; $0 \leq x \leq l$). Линия передачи имеет слоистое диэлектрическое заполнение с различными значениями ϵ и μ в каждом слое.

В общем случае слоистого заполнения полосковой структуры строгое описание распределения электромагнитного поля включает в себя следующее:

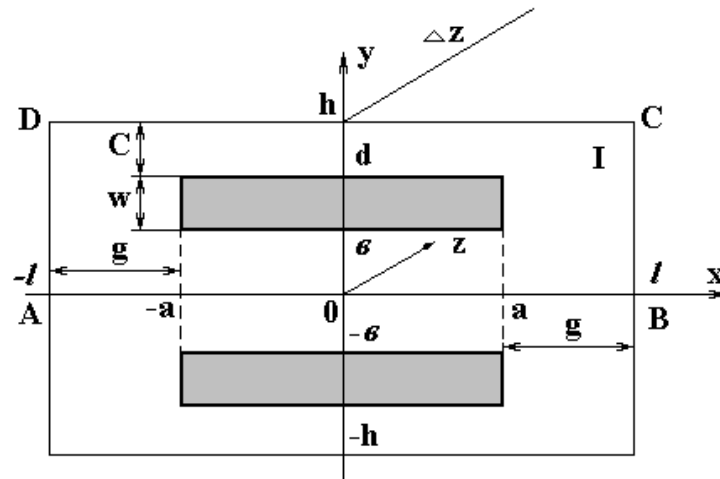


Рис. 1. Модель проводящей структуры полоскового типа.

– нахождение составляющих напряженностей электрического и магнитного полей волн основного типа, распространяющийся в линии;

– нахождение вихревых решений уравнений Максвелла (LE и LM - решения).

Ограничимся рассмотрением случая распространения в линии только основного типа волны, хотя это и ограничивает геометрические размеры полосковой структуры следующим условием: поперечные размеры линии передачи должны быть много меньше рабочей длины волны СВЧ-колебания. Основным типом волны в рассматриваемой линии передачи является T -волна. Электромагнитное поле T -волны описывается потенциальной скалярной функцией $V(x,y)$:

$$\vec{E}(x,y) = -\text{grad}V(x,y), \quad \vec{H}(x,y) = I/\rho_T [\vec{z}_0 \vec{E}], \quad (1)$$

где ρ_T - характеристическое сопротивление T -волны

Функции $V(x,y)$ удовлетворяет уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 V(x,y) = 0 \quad (2)$$

и следующим граничным условиям:

$V(x,y)=0$ – на экранирующих плоскостях $x=l$, $0 \leq y \leq h$; $y=h$, $0 \leq x \leq l$;

$V(x,y)=V_0$ – на плоскостях полоски $0 \leq x \leq a$, $y=l$; $b \leq y \leq d$, $x=a$;

$\frac{\partial V(x,y)}{\partial x} = 0$ – на линии $x=0$, $E_x=0$;

$\frac{\partial V(x,y)}{\partial y} = 0$ – на линии $y=0$, $0 \leq x \leq l$, $H_x=0$ (условие “магнитной” стенки);

$V(x,y)=0$ – на линии $y=0$, $H_x=0$ (условие “электрической” стенки).

Уравнение Лапласа (2) в области 1 (рис. 1) с учетом граничных условий (3) решается методом Шварца [4].

В результате проведения соответствующих выкладок, которые вследствие громоздкости здесь и далее опускаются, получены выражения функции $V(x,y)$ для каждой из частичных областей. Подставляя значение функции $V(x,y)$ в выражение (1), получим систему решений волновых уравнений для поперечных составляющих электрического и магнитного поля, позволяющих определить оптимальное взаимное расположение экранирующих стенок и связанных полосковых линий:

$$\begin{aligned}\vec{E}(x,y) &= \vec{x}_0 \frac{\partial V(x,y)}{\partial x} - \vec{y}_0 \frac{\partial V(x,y)}{\partial y}; \\ E_x &= -\frac{\partial V(x,y)}{\partial x}; \\ E_y &= -\frac{\partial V(x,y)}{\partial y}.\end{aligned}\quad (4)$$

Погонную емкость связанной полосковой линии (СВПЛ) со слоистым диэлектрическим заполнением можно определить по формуле

$$C = q/V_0, \quad (5)$$

где q – электрический заряд на единичной длине СВПЛ; V_0 – разность потенциалов между полосками и экраном.

Для тонкого слоя СВПЛ вдоль оси Z длиной ΔZ заряд внутри объема согласно теореме Гаусса равен

$$\theta = -\Delta Z \oint_L D_n di, \quad (6)$$

где L – контур АВ с ДА, отсюда

$$C = -\frac{1}{V_0} \oint_L D_n di. \quad (7)$$

Подставляя в (8) полученное ранее выражение для составляющих электрического и магнитного поля (4), после соответствующих преобразований получим основные уравнения для случая слоистого заполнения структуры экранированных связанных полосковых линий, которые позволяют определить геометрические размеры СВПЛ для случая заполнения пространства между внутренними плоскостями полосок однородным диэлектриком с эквивалентным значением диэлектрической проницаемости.

Волновое сопротивление СВПЛ с однородным диэлектрическим заполнением при распространении в линии квази – T -волны имеет следующий вид:

$$|Z_\epsilon| = \frac{188,5}{\sqrt[4]{\epsilon_d} \sqrt{C_{ON}^0 C_{eN}^0}}, \quad (8)$$

где C_{ON}^0, iC_{eN}^0 – функции координат полосок для четных и нечетных полей. Сравним это выражение с волновым сопротивлением однородно заполненной полосковой линии, эквивалентной СВПЛ, при возбуждении одной из связанных полосковых линий. Эквивалентность сравниваемых линий заключается в тождественности волновых сопротивлений и параметров c -среды, обеспечивающих такие же коэффициенты фазы затухания T -волны, как и в СВПЛ. Из сравнения получаем:

коэффициент распространения T -волны

$$\gamma = \kappa_0 \sqrt{\epsilon_{\text{эк}} \mu} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{|\epsilon_{\text{эк}}|} \left(\cos \frac{v_0}{4} - i \sin \frac{v_0}{4} \right) = \beta - i\alpha, \quad (9)$$

где коэффициент фазы

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{|\epsilon_{\text{эк}}|} \cos \frac{v_0}{4} = \frac{2\pi}{\lambda_\epsilon} \left(\frac{\text{pad}}{m} \right); \quad (10)$$

коэффициент затухания

$$\alpha = \beta \text{tg} \frac{v_0}{4} \left(\frac{H_n}{m} \right) = 8,68 \beta \text{tg} \frac{v_0}{4} \left(\frac{\partial B}{m} \right). \quad (11)$$

Длина волны в эквивалентной полосковой линии

$$\lambda_\epsilon = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\left[\sqrt{|\epsilon_{\text{эк}}|} \cos \frac{v_0}{4} \right]}, \quad (12)$$

$$|\epsilon_{\text{эк}}| = \sqrt{|\epsilon_d|} = \sqrt{|C_{ON}|/C_{ON}^0}; \quad v_0 = \text{arctg}(C_{ON}''/C_{ON}').$$

Задавая в формулах (10)–(13) параметры конкретной диэлектрической среды: усредненной однородной смеси свекловичной стружки и воздуха, заполняющего пространство между стружкой, частотные характеристики электромагнитного поля, а также учитывая граничные условия, можно составить алгоритм вычислений γ , α , β , λ_e в зависимости от геометрии полосковой линии.

На основании проведенного численного расчета была разработана экспериментальная установка для изучения эффективности СВЧ-обработки свекловичной стружки в камере термообработки полоскового типа (рис. 2).

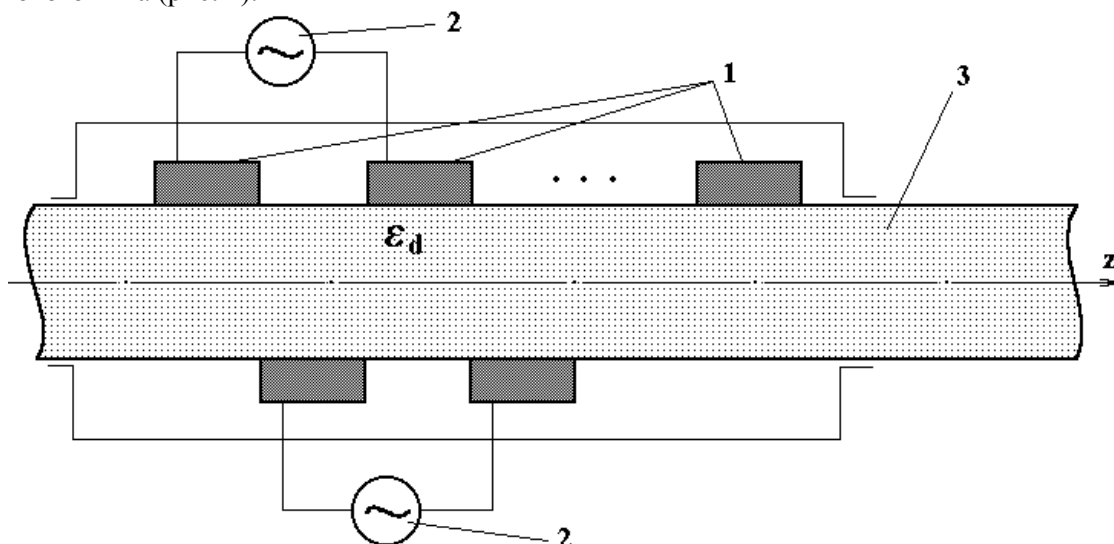


Рис. 2. Экспериментальная установка с рабочей камерой полоскового типа для СВЧ-обработки свекловичной стружки.

1 – цепочка полосковых линий; 2 – источник СВЧ-мощности; 3 – свекловичная стружка.

Установка состоит из цепочки полосковых линий (1), попарно запитываемых от автономных источников СВЧ-мощности (2) через коаксиально-полосковые переходы. Верхние и нижние пары полосок сдвинуты друг относительно друга с определенным шагом. Свекловичная стружка (3) перемещается по каналу из пищевого радиопрозрачного полимерного материала через зону СВЧ-нагрева. Масса обрабатываемой стружки 400 г. Источниками СВЧ-мощности являются генераторы на магнетроне ХИНА с выходной мощностью 600 Вт и частотой 915 МГц, а также генераторы на магнетроне М-105 с выходной мощностью 600 Вт и частотой 2450 МГц. Контрольные измерения проводились при транспортировке стружки через стандартную прямоугольную резонансную камеру с числом вариаций по любой из координат $n = 5$.

Результаты измерений представлены на рис. 3,а–в и в таблице. Анализ экспериментальных данных показал, что камера нагрева полоскового типа (рис. 3,в) обеспечивает наиболее равномерное распределение температур в слое свекловичной стружки по сравнению с прямоугольной резонансной камерой (рис. 3,б). Это указывает на достаточно однородную структуру СВЧ-поля в камерах полоскового типа и обеспечивает полную и равномерную СВЧ-обработку и высокую степень плазмолиза свекловичной ткани.

Качественные показатели диффузионного сока при СВЧ-обработке свекловичной стружки в камерах резонансного и полоскового типа

Температура $T, ^\circ\text{C}$	рН		Ч, %		Цветность, ед. опт. плотности на 100 г СВ	
	камера резонансного типа	камера полоскового типа	камера резонансного типа	камера полоскового типа	камера резонансного типа	камера полоскового типа
30	6,33	6,31	91,17	91,28	10,82	10,58
40	6,18	6,17	91,24	91,35	12,08	11,76
50	6,09	6,05	91,29	91,41	12,34	11,88
60	6,11	6,04	90,13	90,85	10,53	9,71
70	6,18	6,12	89,31	90,11	7,12	6,24

Из полученных данных следует, что тепловая СВЧ-обработка свекловичной стружки в камере полосткового типа обеспечивает снижение энергозатрат и уменьшение длительности технологического процесса. При этом наблюдается улучшение качества показателей диффузионного сока.

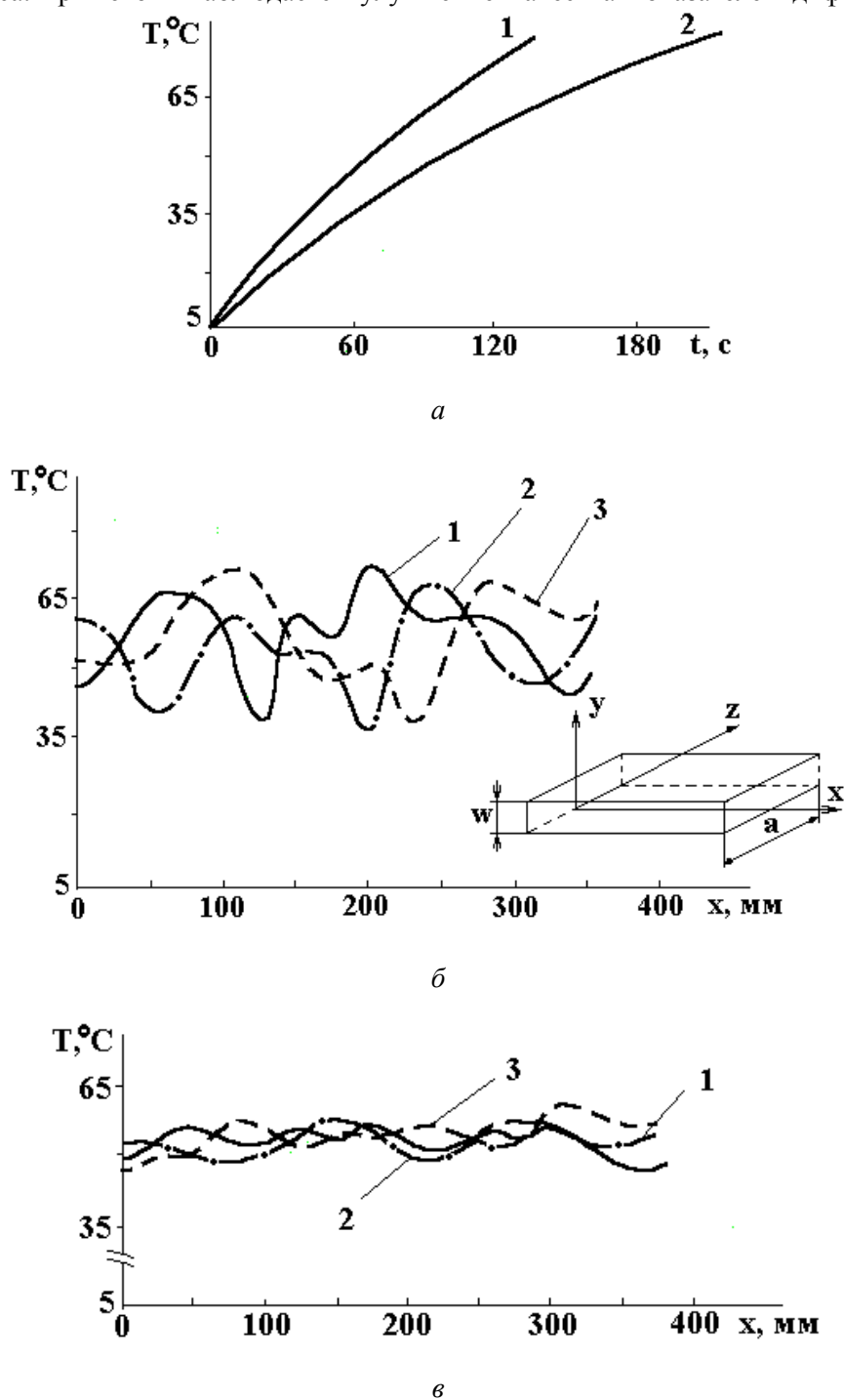


Рис. 3. а: зависимость температуры нагрева от длительности воздействия СВЧ-поля (1 – камера нагрева полосткового типа; 2 – прямоугольная резонансная камера нагрева); б: распределение температур в среднем слое стружки при тепловой обработке в прямоугольной резонансной камере (1 – $z=0$; 2 – $z=-(a/2)$; 3 – $z=a/2$; $y=w/2$, $t_{\text{нагр.}} = 120 \text{ c}$); в: распределение температур в среднем слое стружки при тепловой обработке в камере полосткового типа (1 – $z=0$; 2 – $z=-(a/2)$; 3 – $z=a/2$).

Полученный диффузионный сок содержит меньше цветных веществ при неизменной кислотности. С учетом достаточной технологичности конструкции камеры полосткового типа можно рекомендовать ее к применению в полупромышленных испытаниях технологии предварительной обработки свекловичной стружки в электромагнитном поле СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Купчик М.П., Гулый И.С., Манк В.В. Перспективы создания новых технологий в сахарной промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 1998. № 4.
2. Бажал И.Г., Гулый И.С., Бобровник Л.Д. и др. Экстракция сахара из свеклы в постоянном электрическом поле // Там же. 1983. № 8.
3. Купчик М.П., Ворона Л.Г., Шулика В.А. и др. Обработка свекловичной стружки токами СВЧ // Промышленная теплотехника. 1985. Т. 7. № 2.
4. Справочник по расчету и конструированию СВЧ-полосковых устройств / Под ред. В. Ивольмана. М., 1982.

Поступила 01.12.99

Summary

The article considers the issue of whether SHF (super high frequency) can be used for a heat treatment of beet shaving. Based on calculations an experimental unit was designed for studying beet shaving SHF-treatment in a heat treatment stripe camera. Based on the data received, it established that heat SHF-treatment of beet shaving in the stripe camera provides decrease in energy loss, reduction of technological process duration, and enhancement of qualitative indexes of diffuse juice in comparison with right-angled resonance camera. The optimum temperature of beet tissue SHF-treatment was determined as being 50°C.
