

АКУЛИЧ А.В., д.т.н., проф., проректор по научной работе

УО «Могилевский государственный университет продовольствия», г. Могилев, Беларусь

ТЕМРУК А.В., научный сотрудник

РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Беларусь

МЕТОД РАСЧЕТА КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработан метод расчета кинетики процесса сушки растительного сырья на основе обобщенного уравнения массопередачи. Получены зависимости для расчета продолжительности процесса комбинированной СВЧ-сушки различных материалов растительного происхождения. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для комбинированной сушки пищевого сырья с использованием СВЧ-излучения. Экспериментальным и расчетным путем получены кривые сушки соломки картофеля, свеклы и моркови и дан их анализ.

Ключевые слова: комбинированная СВЧ-сушка, растительное сырье, кривые сушки, метод расчета кинетики сушки.

Calculation method of raw material drying kinetics on the basis of generalized equation of mass transfer was developed. Dependences for calculation of process duration of combined microwave drying for different raw materials of vegetable origin were obtained. Experimental unit for combined microwave drying of different origin food raw materials with the use of microwave radiation was designed and constructed. Drying curves of potatoes, beetroot, carrot cut in long thin strips were obtained with the use of experimental and calculated method.

Keywords: combined microwave drying, vegetable origin, crooked dryings, method of calculation of kinetics of drying.

Обезвоживание материалов растительного происхождения при комбинированном энергоподводе с использованием СВЧ-излучения является перспективным способом сушки пищевого сырья, позволяющим значительно увеличить скорость процесса при одновременном снижении удельного энергопотребления [1, 2]. Однако, в технической литературе мало сведений о методах расчета комбинированных СВЧ-сушилок для материалов растительного происхождения. В данной статье предложена методика расчета комбинированных СВЧ-сушилок непрерывного принципа действия, в основу которой положено обобщенное уравнение массопередачи.

Для определения основных параметров установки комбинированной СВЧ-сушки пищевого сырья необходимо знать продолжительность процесса сушки продукта от начальной до заданной влажности, т.е. данные по кинетике сушки продукта при заданных параметрах процесса.

На практике время сушки материалов до заданной влажности обычно определяют, используя результаты экспериментальных исследований по кинетике сушки, которые представляют в виде кривых сушки и кривых скорости сушки для выбранных режимов процесса.

Однако, в инженерной практике более удобны аналитические методы расчета продолжительности процесса сушки.

Разработан метод аналитического определения продолжительности процесса комбинированной СВЧ-сушки, основанный на экспериментальных данных по сушке картофеля, свеклы и моркови, позволяющий описывать весь процесс, включая первый и второй периоды сушки указанных продуктов.

В основу аналитического метода расчета положено обобщенное уравнение массопередачи [3], кото-

рое применительно к процессам сушки имеет вид:

$$dw/dt = -K_C \cdot (A-w)^m \cdot (w-B)^n, \text{ мин} \quad (1)$$

где A и B – соответственно начальная и конечная влажность материала, %;

w – текущее значение влажности материала, %;

K_C – коэффициент скорости сушки;

m и n – показатели степени.

Продолжительность сушки можно выразить из уравнения (1) как:

$$\tau = \frac{1}{K_C} \int_w^{W_H} \frac{dw}{(A-w)^m \cdot (w-B)^n}, \text{ мин} \quad (2)$$

Решение уравнения предполагает, что в каждом конкретном случае при описании кривых сушки из учета минимальной дисперсии подбирается необходимая комбинация значений m и n .

Ниже приведены решения уравнения (2) для некоторых значений m и n :

$m=1$ и $n=1$

$$\tau = \frac{1}{K_C \cdot (A-B)} \ln \frac{(W_H - B) \cdot (A - w)}{(A - W_H) \cdot (w - B)}, \text{ мин} \quad (3)$$

$m=0,5$ и $n=1$

$$\tau = \frac{1}{K_C \cdot \sqrt{(A-B)}} \ln \frac{(\sqrt{(A-w)} + \sqrt{(A-B)}) \cdot (\sqrt{(A-W_H)} - \sqrt{(A-B)})}{(\sqrt{(A-w)} - \sqrt{(A-B)}) \cdot (\sqrt{(A-W_H)} + \sqrt{(A-B)})}, \text{ мин} \quad (4)$$

$m=1$ и $n=0,5$

$$\tau = \frac{1}{K_C \cdot \sqrt{(A-B)}} \ln \frac{(\sqrt{(w-B)} - \sqrt{(A-B)}) \cdot (\sqrt{(W_H-B)} + \sqrt{(A-B)})}{(\sqrt{(w-B)} + \sqrt{(A-B)}) \cdot (\sqrt{(W_H-B)} - \sqrt{(A-B)})}, \text{ мин} \quad (5)$$

$m=0,5$ и $n=0,5$

$$\tau = \frac{2}{K_C} \cdot \left(\arcsin \frac{\sqrt{(A-W_H)}}{\sqrt{(A-B)}} - \arcsin \frac{\sqrt{(A-w)}}{\sqrt{(A-B)}} \right), \text{ мин} \quad (6)$$

где W_H – влажность исходного продукта, %;

w – текущее значение влажности, %;

A – влажность продукта в начале процесса сушки, %;

B – конечная влажность продукта, %;

K_C – коэффициент скорости сушки.

Существуют также частные решения уравнения (2) для других значений показателей степени m и n .

Величина константы K_C , характеризующая кривую сушки на всем её диапазоне, определяется из теплового баланса для частицы продукта в момент максимальной скорости сушки, когда все подводимое к частице тепло идет на испарение влаги. Следовательно, величина K_C определяется скоростью и тем-

пературой сушильного агента, а также удельной мощностью СВЧ-излучения.

$$K_C = \frac{N \cdot (m+n)^{m+n}}{m^m \cdot n^n \cdot (A-B)^{m+n}} \quad (7)$$

где N – максимальная скорость сушки продукта, %/мин.

Разработана и изготовлена лабораторная установка для комбинированной сушки пищевого сырья с

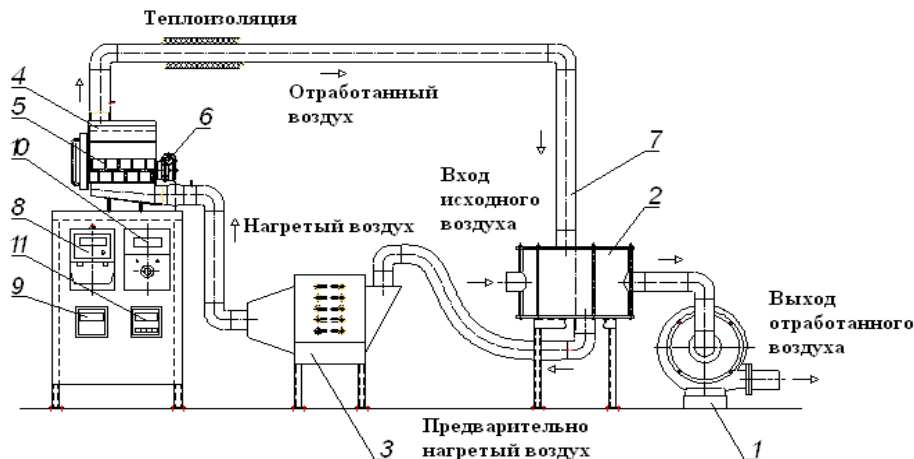


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для комбинированной сушки пищевого сырья с использованием СВЧ – излучения: 1 – центробежный вентилятор; 2 – спиральный теплообменник; 3 – электрокалорифер; 4 – комбинированная СВЧ- сушилка; 5 – барабан; 6 – мотор-редуктор; 7 – воздухопроводы; 8 – счетчик потребляемой электрической энергии электрокалорифера; 9 – счетчик потребляемой электрической энергии СВЧ-генератора; 10 – регулятор частоты вращения; 11 – измеритель-регулятор температуры сушильного воздуха

использованием СВЧ – излучения [4]. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Устройство и принцип действия установки.

Рабочая камера комбинированной СВЧ-сушилки оборудована съёмным барабаном 5, в который загружают высушиваемый продукт. В процессе сушки исходный воздух подаётся с помощью центробежного вентилятора 1 в спиральный теплообменник 2, где происходит предварительный нагрев исходного воздуха за счет теплообмена с отработанным сушильным агентом. Затем предварительно нагретый воздух попадает в электрокалорифер 3, где подогревается и далее нагнетается в рабочую камеру комбинированной СВЧ-сушилки 4. Сырьё, подаваемое в рабочую камеру комбинированной СВЧ-сушилки, попадает под действие восходящего потока нагретого воздуха и СВЧ-излучения. В процессе сушки барабан с продуктом непрерывно вращается с помощью мотор-редуктора 6, что обеспечивает равномерную обработку материала СВЧ-волнами, исключает слеживание и локальное подгорание материала. Влага, испарившаяся из продукта, уносится из рабочей камеры сушилки с отработанным сушильным агентом, который направляется в спиральный теплообменник 2 для нагрева исходного воздуха и далее в атмосферу. Воздух перемещается между отдельными узлами установки по системе воздухопроводов 7. Потребление электроэнергии электрокалорифером измеряется с помощью счетчика электрической энергии 8, энергопотребление СВЧ- генератора фиксируется счетчиком

электроэнергии 9. Расход воздуха через сушилку изменяется с помощью регулятора частоты вращения 10 электродвигателя центробежного вентилятора 1. Температура сушильного агента, подаваемого в рабочую камеру комбинированной сушилки, поддерживается измерителем-регулятором температуры 11.

На разработанной установке проведены опыты по сушке соломки картофеля, свеклы и моркови при комбинированном энергоподводе с использованием СВЧ-излучения. Установлено, что процессу комбинированной СВЧ-сушки указанных продуктов при температуре сушильного агента $t=60^{\circ}\text{C}$, расходу сушильного агента $Q=250 \text{ м}^3/\text{ч}$ и удельной мощности СВЧ-излучения $R_{\text{уд.СВЧ}}=1 \text{ кВт/кг}$ влаги соответствуют показатели степени $m=0,5$ и $n=0,5$.

Методика аналитического расчета продолжительности комбинированной СВЧ-сушки [5] в данном случае заключается в следующем:

- 1) Подставляем значения экспериментальных данных (A , B , N) в формулу (7) и определяем коэффициент скорости сушки K_c , который соответствует выбранному режиму процесса;
- 2) По формуле (6), которая соответствует показателям степени $m=0,5$ и $n=0,5$, аналитически определяем продолжительность процесса комбинированной СВЧ- сушки продукта от начальной до заданной влажности.

На рис. 2, 3, 4 представлены кривые комбинированной СВЧ-сушки соломки картофеля, свеклы и моркови, построенные по экспериментальным дан-

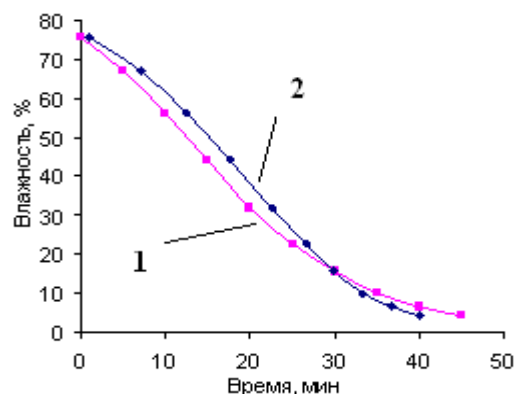


Рис. 2. Кривые комбинированной СВЧ-сушки соломки картофеля: 1- экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

ными (кривые сушки 1) и данным полученным расчетным путем (кривые сушки 2).

Из анализа полученных зависимостей следует, что кривые сушки, полученные расчетным путем хо-

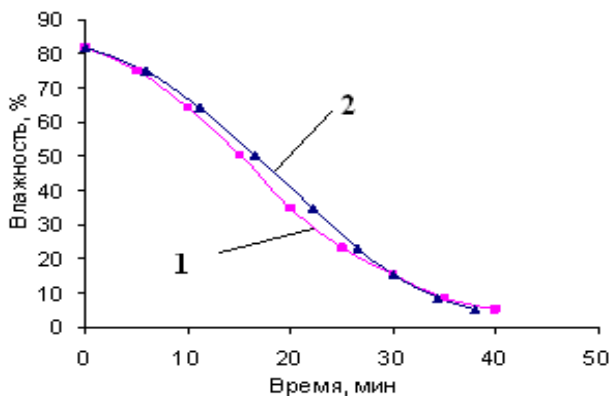


Рис. 3. Кривые комбинированной СВЧ-сушки соломки свеклы: 1- экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

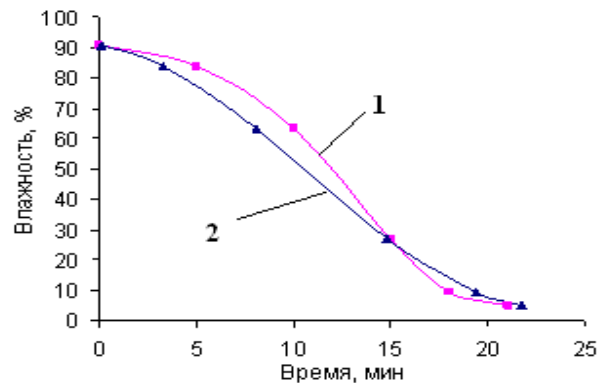


Рис. 4. Кривые комбинированной СВЧ-сушки соломки моркови: 1- экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

рошо сочетаются, с экспериментальными.

Погрешность разработанного метода расчета продолжительности процесса комбинированной СВЧ-сушки продуктов от начальной до заданной влажности для всех периодов сушки не превышает 10%, что вполне приемлемо для проектного инженерного расчета комбинированных СВЧ-сушилок.

Производительность комбинированной СВЧ-сушилки по высушенному продукту определяется кинетикой его сушки конкретного продукта при выбранных параметрах процесса обезвоживания, а также влажностью продукта до и после сушки.

$$P = \frac{60(M_{np} - \Delta W)}{\tau}, \text{ кг/час} \quad (8)$$

где M_{np} – масса загруженного продукта, кг;

ΔW – масса удаленной влаги из продукта за время τ , кг;

τ – продолжительность сушки продукта при выбранных параметрах процесса обезвоживания, мин.

Основными геометрическими параметрами рабочей камеры комбинированной СВЧ-сушилки непрерывного принципа действия являются длина и

ширина газораспределительной решетки.

Длина газораспределительной решетки определяется по следующей зависимости:

$$L = 60 \tau \cdot v, \text{ м} \quad (9)$$

где τ – время сушки продукта от начальной W_H до заданной W_K влажности, мин;

v – скорость транспортирования продукта через рабочую камеру сушилки, м/с.

Ширину плоской газораспределительной решетки находим по следующей зависимости:

$$S = \frac{M_{np}}{\rho_{np} \cdot L \cdot H}, \text{ м} \quad (10)$$

где M_{np} – масса загруженного продукта, кг;

ρ_{np} – насыпная плотность продукта, кг/м³;

L – длина газораспределительной решетки, м;

H – высота слоя продукта над газораспределительной решеткой, м.

Разработанный метод расчета кинетики процесса сушки растительного сырья может быть положен в основу инженерного расчета комбинированных сушилок с конвективным энергоподводом и СВЧ-излучением.

Поступила 06.2011

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулич, А.В. Способ сушки дисперсных материалов с комбинированным энергоподводом. / А.В. Акулич, А.В. Темрук // Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств» [Текст]. - 22-23 мая 2007 г., Могилев: УО МГУП, 2007, С.232.
2. Акулич, А.В. Исследование процесса сушки выжимок ягод в СВЧ-поле [Текст] / А.В. Акулич, А.В. Темрук // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. - № 1(4), 2008. – С. 87-92.
3. Акулич, А.В. Исследование процесса сушки пищевых дисперсных материалов в вихревых аппаратах с одновременной их сепарацией [Текст] / А.В. Акулич, М.А. Нестерук // Тезисы докладов и сообщений 5-го Минского международного форума по тепло-и массообмену – ММФ-2004, 24-28 мая 2004 г., Минск. - т.2. – с.199 - 201.
4. Патент Республики Беларусь № 12404 от 30.10.2009: Способ сушки дисперсного материала, МПК F26B 3/02 [Текст] / А.В. Акулич, А.В. Темрук // Учреждение образования «Могилевский государственный университет продовольствия».
5. Акулич, А.В. Расчет продолжительности сушки картофеля при комбинированном энергоподводе [Текст] / А.В. Акулич, А.В. Темрук // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Новітні технології, обладнання, безпека та якість харчових продуктів: сьогодення та перспективи», Киев, Национальний університет пищевых технологий, 27-28 сентября 2010 г., ч.1., 2010. – с.77.

УДК 66.06

ПОНОМАРЕНКО В.В., канд. техн. наук.

Національний університет харчових технологій, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРООБРОБКИ ЦУКРОВОГО РОЗЧИНУ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ

В статті розглянуто вплив змінного, постійного та комбінованого електричного поля на якісні показники цукрового розчину. В результаті експериментального вивчення цього явища запропонована раціональна послідовність обробки цукрового розчину.

Спосіб електрообробки захищений патентом України на винахід та корисну модель.

Ключові слова: цукровий розчин, електричне поле, електро-статичний стакан, чистота.