

УДК 664.8.047.(075.8)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ СУШКИ НАРЕЗАННЫХ ОВОЩЕЙ

Рудобаишта Станислав Павлович, профессор кафедры теплотехники гидравлики и энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Грабов Иван Александрович, инженер кафедры теплотехники гидравлики и энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Столбова Анна Сергеевна, инженер кафедры теплотехники гидравлики и энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

***Аннотация.** Сформулирована математическая модель, описывающая кинетику сушки нарезанных овощей пластинчатой формы, особенностью которой является учет усадки материала в процессе сушки. В совокупности с полученными ранее авторами данными по усадке нарезанных моркови и свеклы она может быть использована для расчета кинетики сушки этих материалов теоретическим методом, использующим данные только по теплофизическим характеристикам материалов.*

***Ключевые слова:** сушка, нарезанные овощи, усадка, кинетика.*

Сушка нарезанных на дольки овощей и фруктов (например, моркови свеклы, яблок, груш и проч.) широко применяется в производстве. Высушенные таким образом продукты допускают длительное хранение, хорошо при этом сохраняясь, упрощается их транспортировка на большие расстояния (например, в район Крайнего Севера), высушенная продукция занимает небольшой объем при хранении.

Для кинетического расчета процесса сушки материалов, целью которого является определение габаритов аппарата, обеспечивающего заданную производительность, в рассматриваемом случае может быть использован теоретический метод, основанный на решении дифференциального уравнения массопроводности для единичного тела (нарезанной дольки) при соответствующих краевых условиях задачи. Это обусловлено тем, что нарезанные на дольки продукты имеют достаточно правильную геометрическую форму, допускающую применение математических методов расчета кинетики на основе решения дифференциального уравнения массопроводности.

Однако, в отличие от многих капиллярно-пористых материалов с жесткой структурой нарезанные на дольки овощи в процессе сушки дают значительную усадку, что необходимо учитывать в расчете кинетики процесса.

Целью данной работы являлось составление математической модели кинетики конвективной сушки частиц, учитывающей их усадку. При ее формулировке примем, что частица имеет форму пластины. Усадка материала проявляется не только в том, что уменьшаются размеры частицы, но и в том, что появляется внутренний конвективный перенос влаги в результате движения матрицы материала. Поэтому в неподвижной системе координат перенос влаги в пластине через плоскость с координатой x следует выразить уравнением

$$i(\tau) = -k\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + v\rho_0 u, \quad (1)$$

где i – плотность потока влаги, кг/(м² с); τ – время, с; k – коэффициент массопроводности, м²/с; v – скорость конвективного переноса влаги вследствие усадки, м/с; u – локальное влагосодержание материала, кг/(кг сух. м-ла); x – декартова координата, м; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³.

При симметричной сушке пластины толщиной $2R$ скорость v может быть представлена в виде (начало координат помещено в центральную плоскость пластины)

$$v = \frac{dR}{d\tau} \frac{x}{R}, \quad (2)$$

В соответствии с уравнением (2) максимальную скорость имеет поверхность пластины, а ее центральная плоскость имеет нулевую скорость.

Уравнению (1) соответствует следующее дифференциальное уравнение, описывающее массоперенос в пластине

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + v \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad 0 < x < R(\tau), \quad \tau > 0, \quad (3)$$

Запишем к нему краевые условия:

- начальное условие

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_n = \text{const} \quad 0 \leq x \leq R(\tau), \quad (5)$$

- граничное условие у поверхности тела при постоянных параметрах сушильного агента (полагаем, что задача массообмена является чисто внутренней)

$$u(R, \tau) = u_p = \text{const}; \quad (6)$$

- условие симметрии в центральной плоскости пластины

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad \tau > 0. \quad (7)$$

Здесь дополнительно к предыдущему u_p – равновесное влагосодержание, которое выбирается по параметрам сушильного агента, кг/(кг сух. м-ла).

Среднеобъемное влагосодержание пластины равно

$$\bar{u}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^{R(\tau)} u(x, \tau) dx. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (3) является нелинейным, поскольку коэффициент теплопроводности k зависит от влагосодержания материала. Его аналитическое решение отсутствует. В [3] было получено приближенное аналитическое решение задачи (3)-(8) при условии $k = \text{const}$ и $v = \text{const}$ и на его основе было проанализировано влияние конвективной составляющей массопереноса на кинетику сушки. Для более точных инженерных расчетов необходимо использовать численные методы расчета (например, такие, как *mathcad*, *matlab*, *ansys*, *comsol multiphysics* и др.).

Линейная усадка пластины из свеклы и моркови в процессе сушки исследована в [1, 2], рассмотрение полученных в этих работах экспериментальных данных показывает, что они могут быть выражены единой для обоих материалов зависимостью

$$l = l_0(1 + \varepsilon_l \bar{u}), \quad (9)$$

где и для свеклы, и для моркови линейный коэффициент усадки ε_l можно принять равным: $\varepsilon_l = 0,205$; l_0 - толщина абсолютно сухого образца. Единое значение линейного коэффициента усадки для обоих материалов объясняется схожестью их морфологического строения.

Для инженерных расчетов процессов сушки, подверженных усадке, необходимо также знать объемный коэффициент усадки ε_v , который можно выразить через линейный коэффициент усадки следующим образом [3, 4]

$$\varepsilon_v = 3\varepsilon_l. \quad (10)$$

В заключение отметим, что в данной работе сформулирована математическая модель, описывающая кинетику сушки единичного тела пластинчатой формы, учитывающая его усадку, и приведена зависимость для расчета линейного коэффициента усадки для свеклы и моркови. С привлечением уравнений материального и теплового баланса расчет по представленной модели можно распространить на всю совокупность частиц, находящихся в аппарате.

Библиографический список

1. Рудобашта, С.П. Усадка нарезанной свеклы при сушке / С.П. Рудобашта, И.В. Грабов, В.М. Дмитриев // Сб. научных трудов Седьмой МНПК «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2020», 13–15 октября 2020, Москва, Изд. ООО «Мегаполис». – 2020. – С. 187-189.
2. Рудобашта, С.П. Усадка нарезанной моркови при сушке / С.П. Рудобашта, А.С. Столбова, В.М. Дмитриев // Сб. научных трудов Седьмой МНПК «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ – 2020», 13–15 октября 2020, Москва, Изд. ООО «Мегаполис». – 2020. – С. 189-191.

3. Рудобашта, С.П. Математическое моделирование процесса конвективной сушки материалов с учетом их усадки / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, Г.А. Зуева // Инж.- физ. журнал. (ноябрь-декабрь). – 2020. – Т.3. – № 6 – С. 1446-1454.

4. Pakowski, Z. The Comparison of Two Models of Convective Drying of Shrinkage Materials Using Apple Tissue as an Example / Z. Pakowski and A. Adamski // Drying Technology. – 2007. – V. 25. – P. 1139-1147.

УДК 620:631

РАЗРАБОТКА ДВУХРЕЗОНАТОРНОЙ СВЧ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЗМОРАЖИВАНИЯ И РАЗОГРЕВА КОРОВЬЕГО МОЛОЗИВА

*Новикова Галина Владимировна, профессор ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»*

*Михайлова Ольга Валентиновна, профессор ГБОУ ВО
«Нижегородский государственный инженерно-экономический университет»*

*Ершова Ирина Георгиевна, старший научный сотрудник ФГБНУ
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»*

***Аннотация.** Разработано конструктивное исполнение резонаторов в виде усеченных конусов с общим перфорированным основанием, позволяющих разделить процессы размораживания и разогрева коровьего молозива. СВЧ установка непрерывно-поточного действия без экранирующего корпуса обеспечивает электромагнитную безопасность.*

***Ключевые слова:** коровье молозиво, разогрев и размораживание, сверхвысокочастотная установка, конические резонаторы.*

Известно, что многие показатели кормовой ценности коровьего молозива (иммуноглобулин, белки, витамин А) существенно снижаются (на 20-50%) если процесс размораживания и разогрева длится более 30 мин. По сравнению с коровьим молоком, молозиво имеет более высокое содержание питательных веществ (27,6%, по сравнению с 12,3%), более высокое содержание белка (14,9% против 2,8%), и жира (6,7% против 4,4%). Содержание иммуноглобулина более 50 мг/мл. Традиционные размораживатели коровьего молозива из-за длительности процесса (до 2 часов, в зависимости от объема бутылок) не в полной мере сохраняют содержание иммуноглобулина. Поэтому возникает *проблема* сохранения кормовой ценности размороженного коровьего молозива путем разработки микроволновой технологии и сверхвысокочастотной установки непрерывно-поточного действия с обеспечением электромагнитной безопасности.

Нами разработаны 8 моделей СВЧ установок с нетрадиционными резонаторами для размораживания и разогрева коровьего молозива в одном