

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВЕНТИЛИРОВАНИЯ ПЛОДОВ И ОВОЩЕЙ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Котов Б.И., д.т.н., проф., Грищенко В.А., ассист.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

В статье исследовано математическую модель процессов тепломассопереноса в плотном слое плодов и овощей при принудительном вентилировании.

Введение. Создание благоприятных условий, вызывающих у плодов и овощей стойкость к физиологическим заболеваниям, воздействию на них микроорганизмов и патогенной микрофлоры, является основным условием сохранности качества продукции и соответственно, задачей успешного хранения на протяжении длительного периода.

Сохранность плодоовощной продукции обеспечивается замедлением процессов жизнедеятельности в период хранения, основным из которых является процесс дыхания. С дыханием связаны процессы, которые протекают в плодах: превращение и расход углеводов, выделение и потеря воды, физиологические и инфекционные болезни, удушье. Ослабление интенсивности дыхания приводит к уменьшению потерь сочного растительного сырья при хранении.

Поскольку зависимость интенсивности дыхания от температуры среды имеет степенной характер, то радикальным способом уменьшения метаболических процессов при хранении плодоовощной продукции является холодильная обработка – охлаждение продукции перед длительным хранением и поддержание температуры среды хранения на уровне $-2^{\circ}\text{C} \dots +4^{\circ}\text{C}$.

Оптимальный температурный режим в насыпи сочного растительного сырья при его охлаждении и хранении можно обеспечить путем принудительного продувания насыпи воздухом, температура которого ниже продукта, то есть способом активного вентилирования.

Однако рекомендуемые режимы [1, 3] носят противоречивый характер: так параметры вентилируемого воздуха определяются без учета нестационарности режима охлаждения, температура продукта усредняется по времени и высоте штабеля, не учитывается влияние массообмена на теплообмен. В достаточно сложной модели тепломассопереноса [4], учитывающей эффективную теплопроводность через элементы слоя, не показано изменение массы материала и внутренней теплопроводности самого плода. Кроме того коэффициенты массообмена и теплообмена не зависят от скорости фильтрации воздуха. Численные методы моделирования с использованием компьютерных технологий, предполагают параметрическую идентификацию математической модели по данным натуральных экспериментов,

что позволяет адекватно описать переходные процессы при охлаждении продукции в продуваемом штабеле и выбрать соответствующую стратегию управления инженерным оборудованием плодоовощехранилищ с машинной системой охлаждения.

В связи с этим, целью данного исследования является усовершенствование математической модели динамики процессов охлаждения сочных растительных продуктов при активной вентиляции штабеля, ее параметрическая идентификация и реализация в компьютерной среде MatLab/Simulink.

Результаты и обсуждение. Физическая модель процесса. Рассматривается прямоугольный штабель (параллелепипед, заполненный дисперсным материалом, элементы которого характеризуются эквивалентным диаметром $d_e = 2R$, слой материала характеризуется порозностью ε). Боковые поверхности штабеля гидро и теплоизолированы, что дает возможность рассматривать объект моделирования как одномерный. Воздух, температура которого ниже температуры элементов продукта движется в одном направлении: снизу вверх. Источники тепло- и влаговыделений равномерно расположены по высоте и линейно зависят от температуры. Теплообмен между элементами продукта и продуваемым воздухом учитывается коэффициентом теплообмена и массообмена. При этом внутренняя теплопередача элемента радиусом R учитывается суммарным коэффициентом теплопередачи (Китаев, 1966):

$$k_f = \left(\frac{1}{\alpha_f} + \frac{1}{S} \frac{R}{\lambda} \right), \quad (1)$$

где α_f – коэффициент теплопередачи к воздуху, Вт/(м²·°С);

λ – коэффициент теплопроводности материала продукта.

Движущейся силой межфазного массообмена принята разность массовых концентраций (влагосодержаний) воздуха в пограничном (поверхностном) слое и в объеме слоя. Далее сделаны следующие общепринятые допущения: теплофизические параметры и коэффициенты тепло- и массообмена постоянны.

В соответствии с физической моделью, принятых допущениях и отсутствии потерь во внешнюю среду динамика процессов тепло- и массообмена при охлаждении плодов в плотном неподвижном слое описывается следующей системой уравнений в частных производных:

$$\begin{aligned} m_{np} c_{np} \frac{\partial \theta_{np}}{\partial \tau} &= q_{np}(\theta_{np}) - \alpha f (\theta_{np} - t) - \beta_d f \varepsilon_i r (d_n''(\theta_{np}) - d_v), \\ m_v c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_v c_p H \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha f (\theta_{np} - t), \\ m_v \frac{\partial d_v}{\partial \tau} + G_v H \frac{\partial d_v}{\partial x} &= \beta_d f \varepsilon_i (d_n''(\theta_{np}) - d_v), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial m_{np}}{\partial \tau} = m_v \frac{\partial d_v}{\partial \tau} + G_v H \frac{\partial d_v}{\partial x},$$

$$d_n''(\theta_{np}) = a\theta_{np} + c; \quad a = 0.333, \quad c = 3.75$$

$$q_{np}(\theta_{np}) = a_1\theta_{np} + b_1.$$

Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных связано с известными математическими трудностями, для преодоления которых используют различные методы численного анализа.

Используя понятие элементарного слоя (температура и влагосодержание продукта в элементарном слое постоянны по высоте и не зависят от их положения в слое) и, заменяя систему (2) ячееистой моделью можно определить динамические характеристики объекта с распределенными параметрами применяя компьютерную среду MatLab.

Для описания процессов в элементарном слое представим уравнения системы (2) в виде двух тройных равенств:

$$c_p G_v (t_2 - t_1) = m_{np0} \left[\frac{d\theta_{np}}{d\tau} c_{np} + r \frac{du}{d\tau} + q_{np}(\theta_{np}) \right] = \alpha F \Delta T, \quad (3)$$

$$G_v (d_2 - d_1) = -m_{np0} \frac{du}{d\tau} = \beta_d f \varepsilon_i \Delta d. \quad (4)$$

В исследуемом случае, когда θ_{np} и u , по высоте слоя продукта постоянные, формулы для ΔT и Δd принимают вид:

$$\Delta T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\theta - t_1}{\theta - t_2}} \quad \text{и} \quad \Delta d = \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}}. \quad (5)$$

Подставляя значения ΔT и Δd в первую и третью части равенств (3) и (4) получим:

$$c_p G_v (t_2 - t_1) = \alpha F \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\theta - t_1}{\theta - t_2}}, \quad (6)$$

$$G_v (d_2 - d_1) = \beta_d f \varepsilon_i \frac{d_2 - d_1}{\ln \frac{d_n - d_1}{d_n - d_2}}. \quad (7)$$

Для исключения неизвестных величин t_2 и d_2 в уравнения (3) и (4) введем коэффициенты нагрева η_t (по аналогии с коэффициентом охлаждения) и увлажнения воздуха η_d :

$$\eta_t = \frac{t_2 - t_1}{\theta - t_1}, \quad \eta_d = \frac{d_2 - d_1}{d_n - d_1}. \quad (8)$$

Значение величин этих коэффициентов определяем решением уравнений (6) и (7):

$$\eta_t = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha f}{G_v c_p}\right), \quad \eta_d = 1 - \exp\left(-\frac{\beta f \varepsilon_i}{G_v}\right). \quad (9)$$

Уравнения баланса теплоты и массы для элементарного слоя дисперсного материала продуваемого воздухом при использовании коэффициентов η_t и η_d принимают вид:

$$G_v c_p \eta_t (t_1 - \theta) = m_{np} c_{np} \frac{d\theta_{np}}{d\tau} + m_{np} (a_1 \theta_{np} + c_1) + \beta_d f \varepsilon_i r (a_1 \theta_{np} + c_1 - d), \quad (10)$$

$$G_v \eta_d (a_1 \theta_{np} + c_1 - d) = m_v \frac{dd}{d\tau} \approx -\frac{dm_{np}}{d\tau}, \quad (11)$$

$$d = 0,5(d_1 + d_2).$$

Представим штабель продукции ячеистой моделью из n - элементарных слоев массой m_{npi} и высотой h_i (рис. 1) процессы тепло- и массообмена в которых описываются уравнениями (10) и (11).

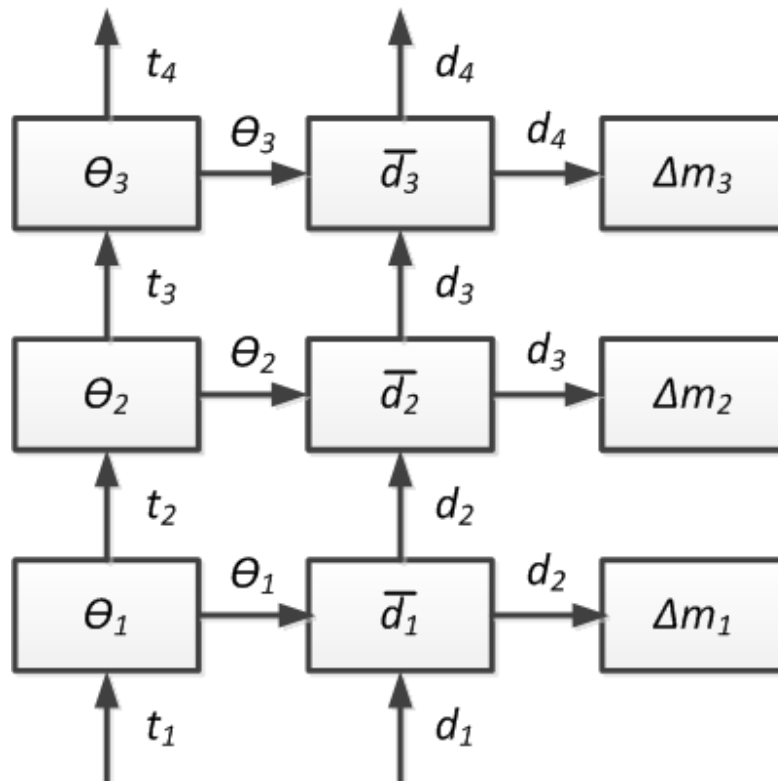


Рис. 1 – Схема ячеистой модели вентилируемого слоя дисперсного материала

В соответствии с представленной схемой (рис. 1) и уравнениями элементарного слоя представим математическую модель в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta_1}{d\tau} &= -A\theta_1 - Pt_1 + B\bar{d}_1 - D; & t_1 &= const, \\
\frac{d\theta_2}{d\tau} &= -A\theta_2 - Pt_2 + B\bar{d}_2 - D; \\
t_2 &= t_1(1-\eta_t) + \eta_t\theta_1; & d_2 &= d_1(1-\eta_d) + \eta_d(a\theta_1 + c - \bar{d}_1); & \bar{d}_2 &= 0.5(d_1 + d_2); \\
\frac{d\theta_3}{d\tau} &= -A\theta_3 - Pt_3 + B\bar{d}_3 - D; \\
t_3 &= t_2(1-\eta_t) + \eta_t\theta_2; & d_3 &= d_2(1-\eta_d) + \eta_d(a\theta_2 + c - \bar{d}_2); & \bar{d}_3 &= 0.5(d_1 + d_2); \\
&\dots \\
\frac{d\theta_n}{d\tau} &= -A\theta_n - Pt_n + B\bar{d}_n - D; \\
t_n &= t_{n-1}(1-\eta_t) + \eta_t\theta_{n-1}; & d_n &= d_{n-1}(1-\eta_d) + \eta_d(a\theta_{n-1} + c - \bar{d}_{n-1}); & \bar{d}_n &= 0.5(d_1 + d_2); \\
\frac{dm_{np1}}{d\tau} &= \eta_d G(a\theta_1 + c - \bar{d}_1); \\
&\dots \\
\frac{dm_{npr}}{d\tau} &= \eta_d G(a\theta_n + c - \bar{d}_n).
\end{aligned} \tag{12}$$

В уравнениях (12) обозначено:

$$A = \frac{G_v c_p \eta_t + \beta f \varepsilon_i r a}{m_{np} c_{np}}; \quad P = \frac{G_v c_p \eta_t}{m_{np} c_{np}}; \quad B = \frac{\beta f \varepsilon_i r}{m_{np} c_{np}}; \quad D = \frac{c_1}{c_{np}} + \frac{\beta f \varepsilon_i r}{m_{np} c_{np}} c.$$

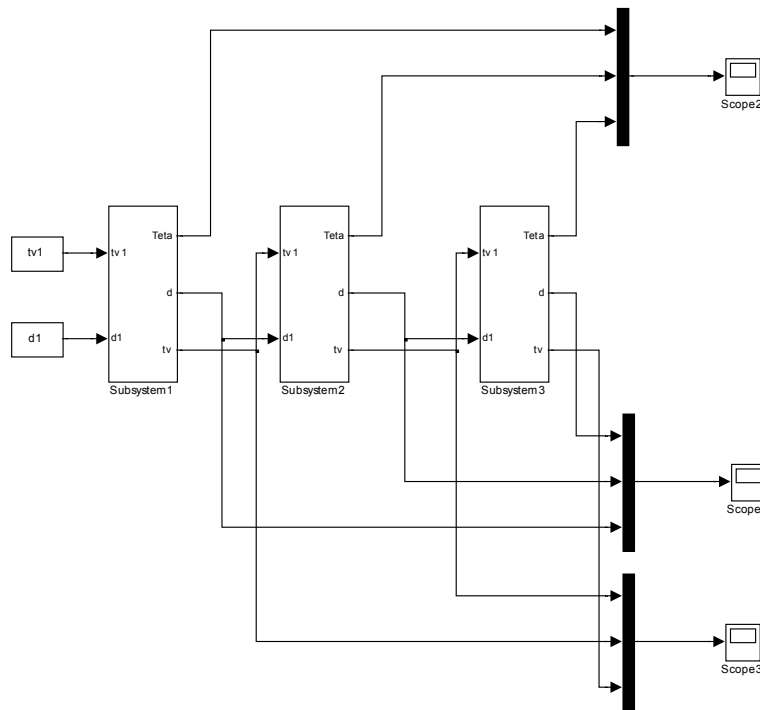


Рис. 2 – Имитационная модель вентилируемого слоя дисперсного материала (пакет Simulink/MatLab)

На основе математического описания (12) и схемы процесса разработана имитационная модель (пакет Simulink/MatLab) в виде функциональных блоков (рис. 2). Результаты симуляции имитационной модели представлено на рис. 3.

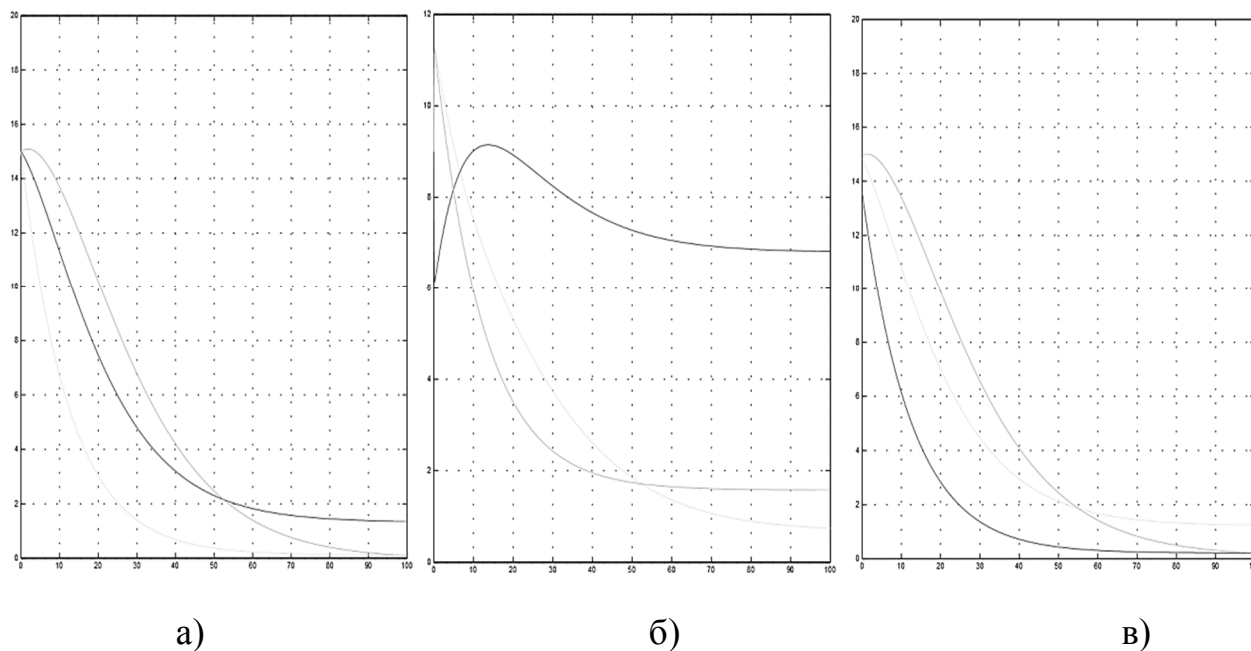


Рис. 3 – Результаты симуляции имитационной модели:
 а) температура яблок; б) влагосодержание воздуха; в) температура воздуха

Выводы

1. Разработана математическая модель динамических режимов вентилируемой насыпи плодоовощной продукции как объекта с распределенными параметрами.

2. Полученную имитационную модель можно использовать для синтеза системы автоматического управления температурно-влажностными режимами хранения плодоовощной продукции.

Список использованных источников

1. Бедин Ф.П., Белан Е.Ф., Чумак Н.И. Технология хранения растительного сырья. Физиологические, теплофизические и транспортные свойства. - Одесса: Астропринт, 2002. – 306 с.
2. Бодров В.И. Хранение картофеля и овощей. - Горький: Волго-Вятское изд.-во, 1985. - 224 с.
3. Волкинд И.Л. Промышленная технология хранения картофеля, овощей и плодов. - М.: Агропромиздат, 1989 - 239 с.
4. Берман М.И., Календерьян В.А. Тепломассоперенос в плотном продуваемом слое плодов и овощей // Инж. физ. Журнал. – 1986 - №2. – С. 266-272.
5. Чумак И. Г., Чепурненко В. П., Чуклин С. Г. Холодильные установки /2-е изд. перераб. и доп. -М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 349 с.

Анотація

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРИМУСОВОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ПЛОДІВ І ОВОЧІВ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

Котов Б., Грищенко В.

У статті досліджено математичну модель процесів тепломасопереносу в щільному шарі плодів і овочів при примусовому вентиляванні.

Abstract

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC REGIMES OF FORCED VENTILATION OF FRUITS AND VEGETABLES IN THE DENSE LAYER

B. Kotov, V. Gryshenko

In the article the mathematical model of heat and mass transfer processes in a dense layer of fruits and vegetables with forced ventilation.

УДК 631.365.22

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ МІКРОНІЗАЦІЇ ЗЕРНА ПРИ ЗМІНІ ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ЗА КООРДИНАТОЮ

Котов Б.І., д.т.н., проф., Калініченко Р.А., к.т.н., доц., Кифяк В.В., пошукач
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Наведено математичний опис динаміки нагріву зерна ІЧ-опромінюванням при змінній в напрямку руху потужності нагрівачів.

Вступ. Поживна цінність зернової частини комбікормів в значний мірі залежить від якості попередньої підготовки. Особливе місце в новітніх технологіях обробки зерна належить інфрачервоному опроміненню (ІЧВ). Одним із перспективних способів обробки є мікронізація – нагрівання зерна інтенсивним потоком ІЧ-випромінювання. В результаті мікронізації підвищується поживність корму, відбувається інактивація грибної та бактерицидної мікрофлори зерна, знижується потреба в кормах. Але підвищені енергозатрати стримують впровадження цього методу в господарствах.

Для зниження енергоємності процесу застосовують наближене розташування випромінювачів до поверхні шару зерна, що зумовлює небезпеку перегріву і навіть підгоряння частини зернівок. Для виключення можливості перегріву зерноматеріалу необхідно стабілізувати температуру зерна на крайовому рівні на протязі всього часу обробки. Однак без чітко сформульованої математичної моделі кількісно оцінити ефективність цього заходу проблематично.