Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Выпуск 6 (25) 2014 ноябрь – декабрь http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN614.pdf

DOI: 10.15862/130TVN614 (http://dx.doi.org/10.15862/130TVN614)

УДК 007

Чохонелидзе Александр Николаевич
Тверской государственный технический университет
Россия, Тверь[1]
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: a444595@pochta.ru

Форгор Лемпого
Тверской государственный технический университет
Россия, Тверь
Аспирант
Ганский университет технологии
Гана, Аккра
Преподаватель
E-mail: forlempo@yahoo.co.nz

Виллиам Браун-Аквей
Тверской государственный технический университет
Россия, Тверь
Аспирант
Ганский университет технологии
Гана, Аккра
Преподаватель
E-mail: wbrownacquaye@hotmail.com

Математическая модель для процесса термообработки какао-бобов

[1] 170024, Тверь, Проспект Ленина, 25

Аннотация. Статья посвящена разработке математической модели процесса термообработки слоя какао-бобов в конвективной сушилке с учетом реакции ферментативного потемнения. Процесс термообработки какао-бобов рассматривается как многостадийный на основе структурно-по-элементарного подхода и каждый из его лимитирующих стадии описывается дифференциальное уравнение в частных производных. Составлена система дифференциальных уравнений в частных производных теплопереноса для однородного слоя какао-бобов и кинетики термообработки, моделирующая реальный слой какао-бобов. Аналитическое решение модели отказалось весьма сложным для проведения численных инженерных расчетов. Модель решалась численным методом, использующий разностную схему Кранка-Николсона и разностные уравнения решены методом прогонки. Представлены и обсуждены полученные результаты моделирование. Достоверность полученных численных результатов модели подтверждается корреляцией с полученными результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: какао; математическая модель; реакция ферментативного потемнения; термообработка; аналитическая решение; численное решение.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Чохонелидзе А.Н., Форгор Лемпого, Виллиам Браун-Аквей Математическая модель для процесса термообработки какао-бобов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6 http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN614.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/130TVN614

Введение

Математическая модель представляет собой набор уравнений, объединяющий все технологические параметры, и набор ограничений в виде неравенств, адекватно описывающих поведение системы [1]. Процессы термообработки можно полностью описать, используя соответствующую математическую модель сушки, которая состоит из дифференциальных уравнений тепло- и массообмена внутри продукта и в фазе взаимодействия с сушильным агентом [2,3]. Математическое описание процесса термообработки основано на физических механизмах внутреннего тепло- и массообмена, которые управляют стойкостью к технологической обработке, а также на предположениях о структурных и термодинамических свойствах, сформулированных для создания модели [1].

Решение этих уравнений должно позволить вычислить параметры процесса как функцию времени в любой точке процесса термообработки только на основании первоначального состояния. Свойства материала, необходимые для решения таких уравнений переноса, – это диффузность влаги, теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость и коэффициенты межфазной теплоемкости и массопереноса. Эти свойства иногда объединяют в один параметр, называемый константой сушки [4].

Математические модели можно разделить на эмпирические (модели Вана и Сингха), полуэмпирические (модели Льюиса, Page, модифицированная модель Page, Хендерсона и Пабиса, логарифмическая, двучленная модель, двучленная экспоненциальная модели, модель аппроксимации диффузии, модель Верма и др.) и теоретические модели [3]. Теоретический подход применяется либо к уравнениям диффузии, либо к уравнениям тепло- и массопереноса [5,1].

Полуэмпирические и эмпирические модели рассматривают только внешнюю устойчивость к влагопереносу между продуктом и воздухом. Эмпирические уравнения тонкого слоя выводятся из экспериментальных данных непрерывной сушки. Главным основанием для применения уравнений таких моделей является удовлетворительное соответствие всем экспериментальным данным и последующее преимущество в описании сушки глубокого слоя. Эмпирические уравнения точны и надежны, пока анализ проводится в пределах экспериментальных наблюдений. При полуэмпирическом подходе рассматриваются приближенные теоретические решения.

Основанием для использования теоретических уравнений является необходимость как в физическом объяснении, так и в понимании процесса переноса. Уравнения аппроксимации проще, для их решения требуется меньше времени по сравнению с теоретическими уравнениями, при этом они обеспечивают некоторое понимание процесса переноса [3].

Существующие математические модели (например, в работах [3,6,7,8,9,10,11]) термообработки какао-бобов не рассматривали вопросы реакции ферментативного потемнения какао-бобов при их термообработке. Решению данной задачи и посвящена данная работа.

Математическая модель и аналитическое решение

Проведенные экспериментальные исследования показывает, что процесс термообработки может рассматриваться как совокупность периодов, каждый из которых вносит определенный вклад в скорость суммарного процесса [3,6,7,10]. Предложенная математическая модель основана на периодах нагрева, постоянной и падающей скорости термообработки и отличается использованием в качестве источникового члена на периодах постоянной и падающей скорости, тепловыделение за счёт реакции ферментативного потемнения какао-бобов при их термообработке. В основу модели положены дифференциальные уравнения теплопереноса в процессе термообработки слоя какао-бобов, находящегося в конвективном оборудовании.

В качестве основных допущений при описании математической модели принято:

- все бобы идентичны по размеру, по физическим и химическим свойствам;
- температура воздуха постоянная и равна средней по высоте камеры величине;
- слой какао-бобов считается эквивалентной однородной гигроскопической пластиной;
- теплообмен идентичен на всей поверхности слоя;
- теплофизические характеристики слоя какао-бобов и воздуха постоянны;
- пренебрегается перенос тепла при помощи фильтрационного движения парогазовой смеси;
- принимается условие конвективного теплообмена без учета сопряжения с температурным полем в слой;
- принимается для движущегося слоя уравнение энергии вида одномерного уравнения Фурье 2-го рода [2,12,13]..

Уравнение теплопередачи для периода нагрева:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a_p \dfrac{\partial T^2(x,\tau)}{\partial x^2} \\ \begin{pmatrix} \tau > 0, \\ 0 < x < \ell \end{pmatrix} \end{cases}; \tag{1}$$

Начальные и граничные условия:

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0; \quad T(x,0) = T_0 = const; \tag{2}$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T(\ell,\tau)}{\partial x} + \alpha\left[T_c - T(\ell,\tau)\right] = 0, \tag{3}$$

где $T(x, \tau)$ – температурное поле слоя; T_c – температура горячего воздуха (сушильного агента); a_p – коэффициент температуропроводности слоя какао-бобов; ℓ – толщина слоя.

Аналитическое решение уравнения (1) для изменения температуры в периоде прогрева дает следующие выражения [13,14]:

$$T(\mathrm{x},\tau) = T_0 + (T_c - T_0)\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\mu_n \frac{x}{\ell} \exp\left(-\mu_n^2 Fo\right)\right], \tag{4}$$

при n = 1, 2, 3, ... , n,

$$A_n = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2Bi\sqrt{Bi^2+\mu_n^2}}{\mu_n\left(Bi^2 + Bi + \mu_n^2\right)}, \tag{5}$$

где μ_n – корни характеристического уравнения: $ctg\mu = \mu/Bi$; теплообменные критерии Био: $\boldsymbol{Bi = \alpha(\ell)/\lambda_p}$; и критерий Фурье: $Fo = a_p\tau/(\ell)^2$.

После оценка членов, уравнения (4) можно упростить до вида:

$$T(x,\tau) = T_0 + (T_c - T_0)\left[1 - A_1\cos\left(\mu_1\frac{x}{\ell}\right)\exp\left(-\mu_1^2 Fo\right)\right], \tag{6}$$

при

$$A_1 = \frac{2\sin\mu_1}{\mu_1 + \sin\mu_1\cos\mu_1}, \tag{7}$$

Отсюда из уравнения (6) получим выражение для продолжительности периода нагрева процесса термообработки в виде:

$$\tau_1 = \frac{(\ell)^2}{a_p\mu_1^2}\ln\left[\frac{A_1\cos\left(\mu_1\frac{x}{\ell}\right)}{1-\xi}\right], \tag{8}$$

где ξ – безразмерная температура,

$$\xi = \frac{T^*(x,\tau) - T_0}{T_c - T_0}, \tag{9}$$

$T^*(x, \tau) = 55\ ^oC$ – температура бобов, соответствующая окончанию периода нагрева.

Второй период характеризуется наличием тепловыделения в результате неизотермической реакции ферментативного потемнения какао-бобов при их термообработке. Это важно потому что, результатом реакции ферментативного потемнения какао-бобов является снижение горечи и терпкости что являются предшественником аромата для обработки какао продуктов. Уравнение теплопередачи для периода постоянной скорости термообработки:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial\tau} = a_p\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c_p\rho_p}; \tag{10}$$

Начальные и граничные условия:

$$T(x,0) = \frac{1}{\ell}\int_0^\ell\left[T_0 + (T_c - T_0)\left(1 - A_1\cos\left(-\mu_1\frac{x}{\ell}\right)\exp\left(-\mu_1^2 Fo\right)\right)\right]dx; \tag{11}$$

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = 0; \tag{12}$$

$$\frac{\partial T(\ell,\tau)}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda_p}\left(T_c - T(\ell,\tau)\right) = 0, \tag{13}$$

где – q_v источниковый член; c_p, ρ_p – теплоемкость и плотность какао-бобов соответственно.

Источник тепла, возникающий в результате реакции ферментативного потемнения какао-бобов в процессе термообработки, определяется по уравнению [15,16,17]:

$$q_v = q_\Sigma \,\mathrm{k} \exp\left[-k\left(\tau - \tau_0\right)\right]; \tag{14}$$

где q_Σ – суммарный тепловой эффект; k – константа скорости реакции; $\tau - \tau_0$ – продолжительность реакции.

Выражение для константы скорости реакции k можно получить из уравнения реакции первого порядка вида [17]:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = k \exp\left(-\frac{U}{RT}\right)\left(1-\theta\right), \tag{15}$$

здесь $\theta = \left(M - M_0\right)/\left(M_\infty - M_0\right)$.

Аналитическое решение уравнений (10) – (15) по методике, предложенной в работах [14,17,18], будет имеет вид:

$$T\left(x,\tau\right) = \frac{T\left(x,\tau\right) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \frac{Po}{Pd}\left[1 - \frac{\cos\left(\sqrt{Pd}\,\frac{x}{\ell}\right)}{\cos\sqrt{Pd} - \frac{1}{Bi}\sqrt{Pd}\sin\sqrt{Pd}}\right]\times$$

$$\times\exp\left(-PdFo\right) - \sum_{n=1}^{\infty}\left(1 - \frac{Po}{Pd - \mu_n^2}\right)A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\ell}\right)\exp\left(\mu_n^2 Fo^*\right), \quad , \tag{16}$$

здесь, критерий Померанцева: $Po = q_v\left(\ell\right)^2 \big/ \lambda_p\left[T_c - T\left(x,0\right)\right]$; критерий предводителева: – $Pd = \Omega\left(\ell\right)^2 \big/ a_p$ и $-\Omega = -d\left(q_v/q_\Sigma\right)\big/ d\tau$; критерий Фурье: $F^* = a_y\left(\tau - \tau_1\right)/\ell$.

Численная оценка членов ряда в уравнении (16), по методике предложенной в работах [2,12,14,18], дает возможность упростить его до вида:

$$T\left(x,\tau\right) = T\left(x,0\right) + \left[T_c - T\left(x,0\right)\right]\times$$

$$\times\left\{1 - \frac{Po}{Pd}\left[1 - \frac{\cos\left(\sqrt{Pd}\,\frac{x}{\ell}\right)}{\cos\sqrt{Pd} - \frac{1}{Bi}\sqrt{Pd}\sin\sqrt{Pd}}\right]\times\right.$$

$$\left.\times\exp\left(-PdFo^*\right) - \left[\left(-\frac{Po}{Pd - \mu_1^2}\right)A_1 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\ell}\right)\exp\left(\mu_1^2 Fo^*\right)\right]\right.; \tag{17}$$

Применение граничного условия (11) в уравнении (17):

$$T(x,\tau)=\frac{1}{\ell}\int_0^{\ell}\left[T_0+(T_c-T_0)\left[1-A_1\cos\left(\mu_1\frac{x}{\ell}\right)\exp\left(-\mu_1^2Fo^*\right)\right]\right]dx+$$
$$+\left\{T_c-\frac{1}{\ell}\int_0^{\delta_y/2}\left[T_0+(T_c-T_0)\left[1-A_1\cos\left(-\mu_1\frac{x}{\ell}\right)\exp\left(-\mu_1^2Fo^*\right)\right]\right]dx\times\right.$$
$$\times\left\{1-\frac{Po}{Pd}\left[1-\frac{\cos\left(\sqrt{Pd}\,\frac{x}{\ell}\right)}{\cos\sqrt{Pd}-\frac{1}{Bi}\sqrt{Pd}\sin\sqrt{Pd}}\right]\times\right.$$
$$\times\exp\left(-PdFo^*\right)-\left[\left(1-\frac{Po}{Pd-\mu_1^2}\right)A_1\cos\left(\mu_1\frac{x}{\ell}\right)\exp\left(\mu_1^2Fo^*\right)\right];$$

Время окончания второго периода процесса термообработки какао-бобов определяется графическим или численным методом из производных от уравнения(11):

$$\xi=B^*\exp\left[-pd\,\frac{a_p\tau_2}{(\ell)^2}\right]+C^*\exp\left[-\mu_1^2\,\frac{a_p\tau_2}{(\ell)^2}\right], \tag{18}$$

при этом, уравнение для безразмерной температуры имеет вид:

$$\xi=1-\frac{T(x,\tau)-T(x,0)}{T_c-T(x,0)}; \tag{19}$$

$$B^*=\frac{Po}{Pd}\left[1-\frac{\cos\left(\sqrt{Pd}\,\frac{x}{\ell}\right)}{\cos\sqrt{Pd}-\frac{1}{Bi}\sqrt{Pd}\sin\sqrt{Pd}}\right]; \tag{20}$$

$$C^*=\left(1-\frac{Po}{Pd-\mu_1^2}\right)A_1\cos\left(-\mu_1\frac{x}{\ell}\right); \tag{21}$$

Здесь x следует принять равным нулю, так как только в этом случае можно считать, что материал полностью прогрелся до заданных условий, поэтому выражения для B^* и C^* принимают следующий вид [14,18]:

$$B^*=\frac{Po}{Pd}\left(1-\frac{1}{\cos\sqrt{Pd}-\frac{1}{Bi}\sqrt{Pd}\sin\sqrt{Pd}}\right); \tag{22}$$

$$C^*=\left(1-\frac{Po}{Pd-\mu_1^2}\right)A_1; \tag{23}$$

В конце второго периода термообработки, степень реакции потемнения слоя какао-бобов определяется по уравнению:

$$\theta_2=1-\exp\left[-k_u(\tau_2-\tau_1)\right]; \tag{24}$$

Для периода падающей скорости термообработки, реакция потемнения практически протекает в изотермических условиях T = T$_c$ = const. Уравнение термообработки будет иметь вид:

$$\theta' = 1 - \exp\left[-k_u\left(\tau_2 - \tau_1\right)\right]; \tag{25}$$

Общая продолжительность термообработки будет равна сумме времен всех составляющих ее периодов:

$$\tau = \tau_\Sigma = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \tag{26}$$

Проведенное аналитическое решение модели отказалось весьма сложным для проведения численных инженерных расчетов, поскольку содержит трудноразрешимые уравнения и циклические процессы, возникающие при определении влияния внутренних тепловыделений на температурное поле слоя. Задача (1–11) решалась численным методом, использующий устойчивую разностную схему Кранка-Николсона, имеющей второй порядок аппроксимации по координате и по времени и основанная на численных приближениях для решений в промежуточной точке (x, τ + τ / 2). Разностные уравнения решены методом прогонки. Результаты полученных при численных моделирований, представлены на рис. 1, рис. 2 и рис. 3.

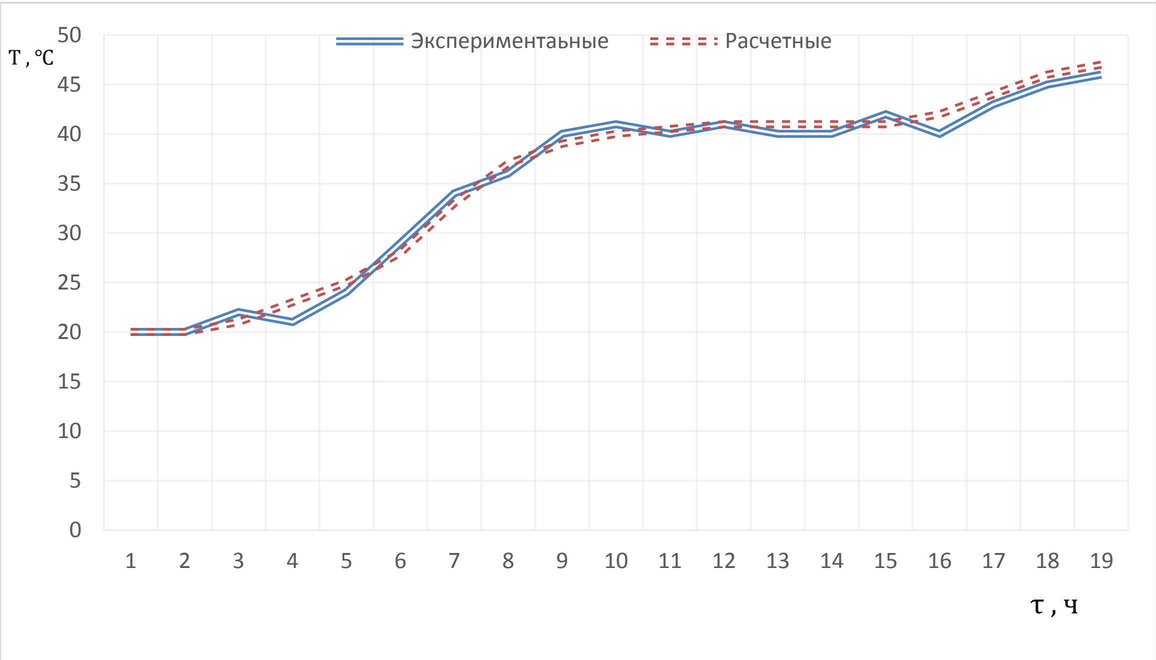

Рис. 1. *Температурное поле внутри слоя какао-бобов без учета тепловыделений*

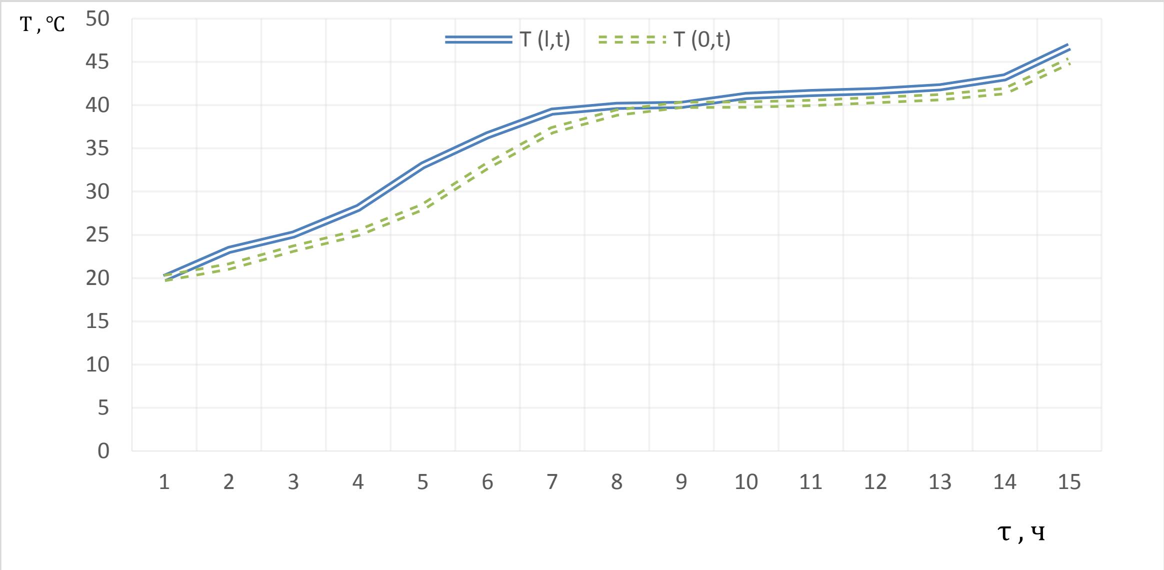

Рис. 2*. Температурное поле внутри слоя какао-бобов с учетом тепловыделений*

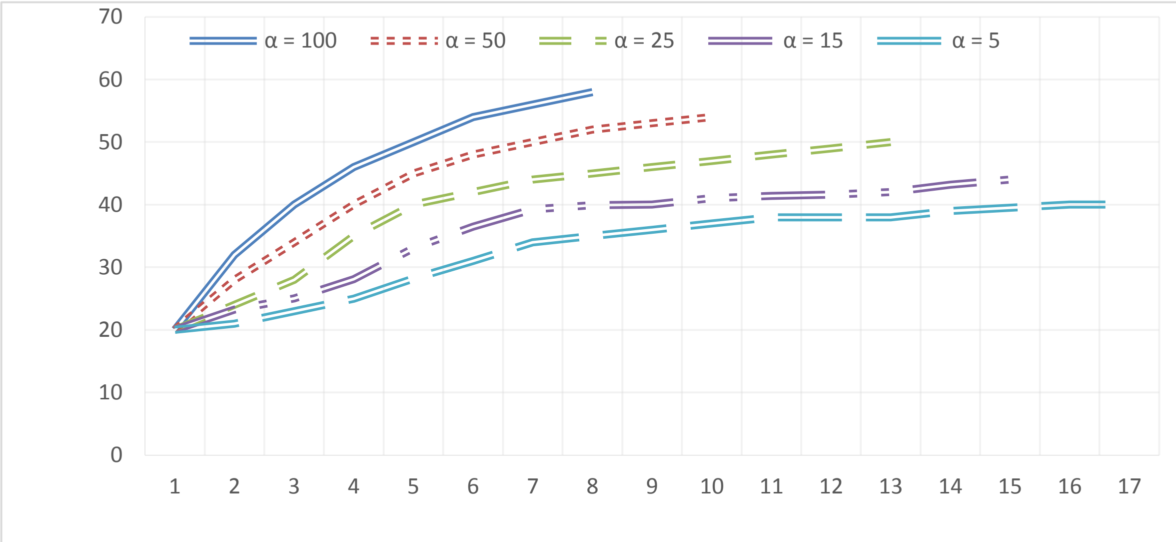

Рис. 3. *Поле температур в слое какао-бобов при различных коэффициентах теплоотдачи*

Заключение

Статья посвящена разработке математической модели процесса термообработки слоя какао-бобов в конвективной сушилке. Математическая модель процесса, состоявшейся из системы дифференциальных уравнений в частных производных. При этом процесс термообработки какао-бобов рассматривается в качестве термокинетического процесса, состоявшийся из совокупности последовательных периодов, каждый из которых вносит определенный вклад в скорость суммарного процесса и описывается с помощью той или иной математической модели: нагрев слоя какао-бобов до температуры начала термообработки и неизотермической реакции ферментативного потемнения, протекающая параллельно с продолжающимся нагревом слоя какао-бобов, и, наконец, изотермическая реакции ферментативного потемнения какао-бобов. Составлена система дифференциальных уравнений в частных производных тепломассопереноса для однородного слоя какао-бобов и кинетики термообработки, моделирующая реальный слой какао-бобов. В модели введены некоторые общепринятые допущения и упрощения.

Проведено аналитическое решение модели, что отказалось весьма сложным для проведения численных инженерных расчетов, поскольку содержит трудноразрешимые уравнения и циклические процессы, возникающие при определении влияния внутренних тепловыделений на температурное поле обрабатываемого материала. Используется для численного ращения модели, метод конечных разностей использующий разностную схему Кранка-Николсона, имеющей второй порядок аппроксимации по координате и по времени, обеспечивающей абсолютную устойчивость решения. Разностные уравнения решены методом прогонки. Представлены и обсуждены полученные результаты моделирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mujumdar, A S. (Ed). Handbook of Industrial Drying. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2006. 20-31 pp.
2. Лыков А.В. Теория сушки. 2nd ed. Москва: Энергия, 1968. 471 pp.
3. Akmel C., Assidjo N.E., Kouamé P., and Yao K K.B., "Mathematical Modelling of Sun Drying Kinetics of Thin Layer Cocoa," Vol. 5(9), 2009. pp. 1110-1116.
4. Saeed I.E., Sopian K., and Zainol Z.A., "Thin-Layer Drying of Roselle (I): Mathematical Modeling and Drying Experiments”.," Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Vol. X, 2008.
5. Whitaker , "Coupled Transport in Multiphase Systems: A Theory of Drying. Advances in Heat Transfer," Academic Press, Vol. 31, 1998.
6. Hii C.L., Law C.L., and CLOKE M., "Modelling of thin layer drying kenetics of cocoa," Vol. Vol. 3, No. 1, April 2008. pp. 1-10.
7. Hii C.L., "Modeling of the cocoa drying kinetics modeling of the cocoa drying kinetics," Malaysian Cocoa Journal, 2008. pp. 51-59.
8. Krysiak W., "Effects of convective and microwave roasting on the physicochemical properties of cocoa beans and cocoa butter extracted from this material," Grasas Aceites, Vol. 62, No. 4, 2011. pp. 467 – 478.
9. Ndukwu M., Ogunlowo A.S., and Olukunle O.J., "Cocoa bean (theobroma cacao l.) Drying kinetics," Chilean journal of agricultural research, Vol. 70, No. 4, 2010. pp. :633-639.
10. Nganhou J., "Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans during drying," Vol. 40, 2004. pp. 727–735.
11. Никель СА, "Повышение эффективности процесса тепловой Обработки какао - бобов и арахиса," Воронеж, Дисс., к.т.н 2002. 181 pp.
12. Лыков А.В. Тепломассообмен. 2nd ed. Vol 2. Москва: Энергия, 1978. 242 pp.
13. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Москва-Ленинград: Госэнергоиздат , 1963. 536 pp.
14. Чохонелидзе А.Н., Дни М.И., Берзин Е.А., and Орлов М.М. Математеческое моделирование сложных физико-химических процессов. Тверь: ТвГТУ, 1999. 506 pp.
15. Dimick P.S., "Penn State Chocolate Manufacture Short Course," University Park, PA: Penn State University., 1993. pp. Pp. 29–465.
16. García-Alamilla P., Salgado-Cervantes M.A., Barel M., Berthomieu G., Rodríguez-Jímenes G.C., and García-Alvarado M.A., "Moisture, acidity and temperatura evolution during cacao drying," Journal of Food Engineering, Vol. 79, No. 4, 2007. pp. 1159-1165.
17. Kyi , Wan R.W.D., Mohammad , Samsudin W., Kadhum A.A.H., and Talib M.Z.M., "The kinetics of polyphenol degradation during the drying of Malaysian cocoa beans," No. 40, 2005. pp. 323–331.
18. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 536 pp.

Chokhonelidze Alexander Nikolayevich
Tver state technical university
Russia, Tver
E-mail: a444595@pochta.ru

Forgor Lempogo
Tver state technical university
Russia, Tver
Ghana technology university
Ghana, Accra
E-mail: forlempo@yahoo.co.nz

Brown-Acquaye William
Tver state technical university
Russia, Tver
Ghana technology university
Ghana, Accra
E-mail: wbrownacquaye@hotmail.com

A mathematical model for the heat treatment process of cocoa beans

Abstract. This paper discusses the development of a mathematical model for the heat treatment process of a bed of cocoa beans in a convective dryer taking into account heat generation, as a result of enzymatic browning reaction in the beans. Using the structural elementary approach, the heat treatment process of cocoa beans is treated as a multi-staged system, with each of its limiting stages described by a partial differential equation. A system of partial differential equations describing heat transfer and the kinetics of a homogeneous bed of cocoa beans was created to model the heat treatment of a real bed of cocoa beans. The presented analytical solution of the model is very complex for numerical engineering calculations. Numerical solution was sought using the Crank-Nicholson method, with the resulting equations solved using the sweep method. Simulation results are shown to correlate with experimental data.

Keywords: cocoa; mathematical model; enzymatic browning reaction; heat treatment; analytical solution; numerical solution.

REFERENCES

1. Mujumdar, A S. (Ed). Handbook of Industrial Drying. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2006. 20-31 pp.
2. Lykov A.V. Teoriya sushki. 2nd ed. Moskva: Energiya, 1968. 471 pp.
3. Akmel C., Assidjo N.E., Kouamé P., and Yao K K.B., "Mathematical Modelling of Sun Drying Kinetics of Thin Layer Cocoa," Vol. 5(9), 2009. pp. 1110-1116.
4. Saeed I.E., Sopian K., and Zainol Z.A., "Thin-Layer Drying of Roselle (I): Mathematical Modeling and Drying Experiments”.," Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, Vol. X, 2008.
5. Whitaker , "Coupled Transport in Multiphase Systems: A Theory of Drying. Advances in Heat Transfer," Academic Press, Vol. 31, 1998.
6. Hii C.L., Law C.L., and CLOKE M., "Modelling of thin layer drying kenetics of cocoa," Vol. Vol. 3, No. 1, April 2008. pp. 1-10.
7. Hii C.L., "Modeling of the cocoa drying kinetics modeling of the cocoa drying kinetics," Malaysian Cocoa Journal, 2008. pp. 51-59.
8. Krysiak W., "Effects of convective and microwave roasting on the physicochemical properties of cocoa beans and cocoa butter extracted from this material," Grasas Aceites, Vol. 62, No. 4, 2011. pp. 467 – 478.
9. Ndukwu M., Ogunlowo A.S., and Olukunle O.J., "Cocoa bean (theobroma cacao l.) Drying kinetics," Chilean journal of agricultural research, Vol. 70, No. 4, 2010. pp. :633-639.
10. Nganhou J., "Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans during drying," Vol. 40, 2004. pp. 727–735.
11. Nikel' SA, "Povyshenie effektivnosti protsessa teplovoy Obrabotki kakao - bobov i arakhisa," Voronezh, Diss., k.t.n 2002. 181 pp.
12. Lykov A.V. Teplomassoobmen. 2nd ed. Vol 2. Moskva: Energiya, 1978. 242 pp.
13. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Teoriya teplo- i massoperenosa. Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat , 1963. 536 pp.
14. Chokhonelidze A.N., Dni M.I., Berzin E.A., and Orlov M.M. Matematecheskoe modelirovanie slozhnykh fiziko-khimicheskikh protsessov. Tver': TvGTU, 1999. 506 pp.
15. Dimick P.S., "Penn State Chocolate Manufacture Short Course," University Park, PA: Penn State University., 1993. pp. Pp. 29–465.
16. García-Alamilla P., Salgado-Cervantes M.A., Barel M., Berthomieu G., Rodríguez-Jímenes G.C., and García-Alvarado M.A., "Moisture, acidity and temperatura evolution during cacao drying," Journal of Food Engineering, Vol. 79, No. 4, 2007. pp. 1159-1165.
17. Kyi , Wan R.W.D., Mohammad , Samsudin W., Kadhum A.A.H., and Talib M.Z.M., "The kinetics of polyphenol degradation during the drying of Malaysian cocoa beans," No. 40, 2005. pp. 323–331.
18. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Teoriya teplo- i massoperenosa. Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 536 pp.