

УДК 662.997.631.344

КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЗАДАННОМ ЗАКОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ.

Б.Э. Хайридинов

Каршинский государственный университет профессор

Д.Н. Рузиева

магистр

<https://orcid.org/0009-0006-6568-7132/>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18358671>

Аннотация: В работе совместным решением системы дифференциальных уравнений тепло-и массопереноса с соответствующими краевыми, получена математическая модель конвективной сушки фруктов (в форме пластины, цилиндра, шара) в условиях периодического теплового воздействия (в солнечных сушильных установках), данного исследования были интенсификация процесса сушки ломтика фруктов и оваций с использованным солнечной энергии путем объединением в единый энергетический блок в солнечной сушилке воздушного коллектора и сушильной камеры. Для достижения данной цели были разработаны методика диагностика теплообменных процессов с переменными потенциалами диффузии и влагопереноса. Анализ экспериментальной дальний с решением математической модели теплообмена и прососав, потенциалов диффузии и влагопереносе, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: влажный материал, нагрев материала, испарение влаги, изменение агрегатного состояния, оператор Лапласа, условия тепло-и массообменной, граничные условия, критерий Фурье, условия условия симметрии, скорость сушки, система уравнений.

CONVECTIVE DRYING OF WET MATERIAL UNDER A GIVEN LAW OF CHANGE IN THE TEMPERATURE OF THE COOLANT.

Abstract: By jointly solving the system of differential equations for heat and mass transfer with the corresponding boundary conditions, a mathematical model of convective drying of fruits (in the form of a plate, cylinder, sphere) under periodic thermal exposure (in solar drying installations) was obtained. This study aimed to intensify the drying process of fruit slices and pieces using solar energy by combining the air collector and drying chamber into a single energy unit in the solar dryer. To achieve this goal, a methodology for diagnosing heat exchange processes with variable diffusion and moisture transfer potentials was developed. The analysis of the experimental data with the solution of the mathematical model of heat exchange and absorption, diffusion potentials and moisture transfer showed good agreement with the experimental data.

Keywords: wet material, material heating, moisture evaporation, change of state, Laplace operator, heat and mass transfer conditions, boundary conditions Fourier criterion, symmetry conditions, drying rate, system of equations.

ВВЕДЕНИЕ

Для получения высоко качественных сухофруктов из винограда и плодов, содержащих 75÷90% влаги, важен режим сушки, характере зашейся температурой, скорости движения сушильного агента, его цикличностью и влажностью. На основаник теоретических и экспериментальных исследований определены коэффициенты тепло-и

массопереноса при конвективной сушке в зависимости от скорости движения теплоносителя, коэффициент внутренней диффузии влаги фруктов а также доставлена его зависимость от температуры. Однако не описано, как происходит кинематика в процессе воздухообмена во время влаговыделения и удаления влажного теплоносителя с солнечной сушилки.

При конвективной сушки влажный материал контактируется сушильным агентом-горячим воздухом и получает от него тепло, которое необходимо на нагрев материала сушки и испарение влаги. Изменение агрегатного состояния массы связанного вещества (влаги) влияет температурного поля создает термодиффузионный поток влаги, который либо способствует выносу влаги из тело, либо препятствует массопереносу, с градиентом концентрации влаги [1-6].

МЕТОДОЛОГИ ИССЛЕДОВАНИЕ

Обоснование пучивших режимов работы гелиотерапии чётких сушильных агрегатов с обеспечением максимальной эффективности и интенсивности процесса сушки с минимальными энергетическому затратами является важной задачей. Поскольку сложность данного процесса обусловлена ходом взаимосвязанных параметров, а изменено энергетических, кинетических, динамических, а также теплообменных процессов и высокой изменчивоетьго физических свойств фруктов.

Для полной количественной оценки взаимообусловленной связи влияющих эффектов термодиффузии и диффузионной теплопроводности при сушке влажных материалов, для составления математической модели этих процессов следует рассматривать дифференциальные уравнение системы взаимосвязанного тепло-и массопереноса, предложенной А.В. Лыковым, которая при отсутствии градиента общего давления, записывается в виде[1,2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \alpha_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon \rho}{c} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= \alpha_m \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \alpha_m \delta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где v параметр геометрической формы; $v=0,1,2$ - соответственно для пластины, цилиндра и шара.

Преобразуем оператор Лапласа [3] для пластины, цилиндра и шара:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \frac{\partial W}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Тогда система (1) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{a_T}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon \rho}{c} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} &= \frac{a_m}{r^v} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \delta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^v \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для однозначного определения температуры $T(r,\tau)$ и локального распределения удельного влагосодержания $W((r,\tau)$ внутри высушиваемого материала необходимо задать условия тепло-и массообменное на поверхности тело и начальные распределения потенциалов переноса:

$$[T(r, \tau)]_{r=0}, \quad [W(r, \tau)]_{r=0} = W_0 \quad (4)$$

$$-\lambda(\nabla T)_n + a[T_{cp} - T(r, \tau)]_n - (1 - \varepsilon)pq(\tau) = 0 \quad (5)$$

$$\lambda'(\nabla W)_n + q'(r) = 0$$

Граничные условия (5) выписаны на основе теплового и массообменного баланса на поверхности высушиваемого материала[4-8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В качестве высушиваемого материала выбрали яблоки сорта смирено, абрикос сорта тушек бардак начальной влажностью $W_n = 70,3 \dots 85,2\%$ нарезанных кружочками и дольками толщиной 6 мм, при разовой загрузке в солнечной сушилку $m_\phi = 7,5$ кг. Сушке в солнечной сушилке проводилась в течение $\tau = 52$ з при неравномерной температуре лоток воздуха и высушиваемого образца в режиме с непрерывным контролем его течения и почасовой регистрацией контролируемых параметров. Результаты измерений отображении соответствующими графическими материалами в виде временных зависимостей.

Для тел в форме пластины, цилиндра и шара, направление градиента потенциала совпадает с направлением производной по текущей координате и условия (5) выписываются в виде:

$$\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R} = a[T_{ct} - T(r, \tau)]_{r=R} - (1 - \varepsilon)pq(\tau), \quad (6)$$

$$\lambda'\left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)_{r=R} = -q'(\tau)$$

Запишем систему уравнений (3), начальные и граничные условия (4), (6) в относительных координатах $\varepsilon_0 = \frac{r}{R}$ и критериях подобия тепло-и массопереноса:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial F_0} &= \frac{1}{\varepsilon_0^v} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_0} \left(\varepsilon_0^v \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_0} \right) + \frac{\varepsilon p a_\tau}{a} \frac{\partial W}{\partial F_0}, \\ \frac{\partial W}{\partial F_0} &= Lu \left[\frac{1}{\varepsilon_0^v} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_0} \left(\varepsilon_0^v \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_0} \right) + \frac{\delta}{\varepsilon_0^v} \frac{\delta}{\partial \varepsilon_0} \left(\varepsilon_0^v \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_0} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $F_0 = \frac{\alpha_\tau \tau}{R^2}$ - критерий Фурье, (критерий гомохронности переноса тепла),

$Lu = \frac{a_m}{a_\tau}$ - критерий лыкова, $F_{0m} = \frac{a_m \tau}{R^2} = \frac{a_m}{a_\tau} \cdot \frac{a_\tau \tau}{R^2} = Lu \cdot F_0$ - критерий гомохронности массосодержания.

Граничные условия в относительной координате $0 \leq \varepsilon_0 = \frac{r}{R} \leq 1$ для цилиндра и шара и $-1 \leq \varepsilon_0 = \frac{r}{R} = \frac{X}{R} \leq 1$ для пластины толщиной $2R$ ($-1 \leq \varepsilon_0 \leq 1$), преобразуются к виду:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_0}\right)_{\varepsilon_0=1} = Bi \left[T_{cp} - T(\varepsilon_0, F_0) \right]_{\varepsilon_0=1} - \frac{(1-\varepsilon)Rpq(\tau)}{\lambda}$$

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_0}\right)_{\varepsilon_0=1} = -\frac{Rq'(\tau)}{\lambda'}$$
(8)

Где $Bi = \frac{aR}{\lambda}$ критерий Био. Пластины достаточно найти поля потенциалов для $0 \leq \varepsilon_0 \leq 1$. При этом к граничным условиям (8) необходимо присоединить условия симметрии в середине пластины $\varepsilon_0 = 0$ а для цилиндра и шара $\varepsilon_0 = 0$ на оси и центре шара [6]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \varepsilon_0}\right)_{\varepsilon_0=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_0}\right)_{\varepsilon_0=1} = 0$$
(9)

По аналогии со среднеинтегральной нестационарной физической величиной с локальным распределением по закону функции $F(\mu, \tau)$

$$\langle F | \tau \rangle = \frac{\iiint_v F(\mu) d\mu}{\iiint_v d\mu}$$
(10)

Для средне интегральной температуры $T(r, \tau)$ и локального массосодержания $W(r, \tau)$ имеем:

$$\langle T(F_0) \rangle = \frac{\nu+1}{R^{\nu+1}} \int_0^R T(r, \tau) r^\nu dr = (\nu+1) \int_0^1 T(\varepsilon_0, F_0) \varepsilon_0^\nu d\varepsilon_0$$
(11)

$$\langle W(F_0) \rangle = \frac{\nu+1}{R^{\nu+1}} \int_0^R W(r, \tau) r^\nu dr = (\nu+1) \int_0^1 W(\varepsilon_0, F_0) \varepsilon_0^\nu d\varepsilon_0$$
(12)

Положим $T_{cp} = \varphi(F_0)$ - изменение во времени температуры горячего воздуха. Решим систему (7) при начальных и граничных условиях (4), (8) для случаев, когда можно предположить:

$$\alpha \left[T_{cp} - T(r, \tau) \right]_{r=R} = \alpha \left[T_{cp} - \langle T(\tau) \rangle \right]$$
(13)

Для несвязанного уравнения переноса, т.е. для уравнения теплопроводности при граничных условиях третьего рода соотношение (13) практически точно выполняется для

$$Bi = \frac{aR}{\lambda} \leq 1.$$

Умножим уравнения системы (7) на $(\nu+1)\varepsilon_0^\nu$, проинтегрируем по ε_0 от 0 до 1, тогда с учетом (8), (9) получим

$$\frac{d \langle T(F_0) \rangle}{dF_0} = (\nu+1)Bi \left[\varphi(F_0) - \langle T(F_0) \rangle \right] - \frac{(1-\varepsilon)(1-\varepsilon)pRq(F_0)}{\lambda} + \frac{\varepsilon p a_T}{c} \frac{d \langle W(F_0) \rangle}{dF_0}$$

$$\frac{d \langle W(F_0) \rangle}{dF_0} = (\nu+1)LuBi \left[\varphi(F_0) - \langle T(F_0) \rangle \right] - \frac{(1-\varepsilon)(1-\varepsilon)pRq(F_0)}{\lambda} - \frac{\delta R q'(F_0)}{\lambda'}$$
(14)

$$\frac{d \langle T(F_0) \rangle}{dF_0} = -(\nu+1)Bi \left(1 + \frac{\delta \varepsilon p a_T Lu}{c} \right) \langle T(F_0) \rangle + Q(F_0)$$
(15)

Где

$$Q(F_0) = (\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\varepsilon\rho\alpha_T\delta}{c}Lu\right)\varphi(F_0) - \frac{(\nu + 1)\rho R}{\lambda}(1 + \delta)q(F_0) - \frac{(\nu + 1)\varepsilon\rho\alpha_T R}{c\lambda'}Luq'(F_0) \quad (16)$$

Для стандартной задачи $y'(t) + by(t) = \psi(t), y(0) = y_0$
Решением будет [9];

$$y(t) = y_0 \exp(-bt) + \int_0^t \psi(\tau) \exp[-b(t - \tau)] d\tau \quad (17)$$

На основании этой формулы имеем:

$$\langle T(F_0) \rangle = T_0 \exp\left[-(\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\delta\varepsilon\rho\alpha_T}{c}Lu\right)F_0\right] + \int_0^{F_0} Q(\tau) \exp\left[-(\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\delta\varepsilon\rho\alpha_T}{c}Lu\right)(F_0 - \tau)\right] d\tau \quad (18)$$

Подставив значение (18) во второе уравнение системы (14), находим:

$$\begin{aligned} \frac{d \langle W(F_0) \rangle}{dF_0} &= (\nu + 1)LuBi\varphi(F_0) - \frac{(1 - \varepsilon)\rho Rq(F_0)}{\lambda} - (\nu + 1)LuBiT_0 \exp\left[-(\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\delta\varepsilon\rho\alpha_T}{c}Lu\right)F_0\right] + \\ &+ \int_0^{F_0} Q(\tau) \exp\left[-(\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\delta\varepsilon\rho\alpha_T}{c}Lu\right)(F_0 - \tau)\right] d\tau \end{aligned} \quad (19)$$

Которое определяет с скорость сушки влажных материалов и форме, пластины, цилиндра и шара при заданных значениях $q(F_0)$, $q'(F_0)$ и $\varphi(F_0)$. [10]

Определим скорость сушка при постоянных тепловых режимах

Предположим, что $\varphi(F_0) = T_c = const$, ($T_e > T_0$), $q(F_0) = q' = const$.

Тогда по формуле (18) находим:

$$\langle T(F_0) \rangle = T_0 \exp\left[-(\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\delta\varepsilon\rho\alpha_T}{c}Lu\right)F_0\right] + Q_0 \frac{1}{A} [1 - \exp(-AF_0)] \quad (20)$$

Где

$$Q_0 = AT_{cp} - \frac{(\nu + 1)(1 - \varepsilon)\rho R}{\lambda}(1 + \delta)q_1 - \frac{(\nu + 1)\varepsilon\rho\alpha_T R Lu}{c\lambda'}q_2 \quad (21)$$

$$A = (\nu + 1)Bi\left(1 + \frac{\varepsilon\rho\alpha_T\delta}{c}Lu\right) \quad (22)$$

Подставим значение:

$$\langle T(F_0) \rangle = T_0 \exp(-AF_0) + \frac{Q_0}{A} [1 - \exp(-AF_0)]$$

во второе уравнение системы (14) и предположим, что

$$\varphi(F_0) = T_c, \quad q(F_0) = q_1, \quad q'(F_0) = q_2$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \frac{d \langle T(F_0) \rangle}{dF_0} &= (\nu + 1)Bi[T_c - \langle T(F_0) \rangle] - \frac{(\nu + 1)(1 - \varepsilon)\rho Rq_1}{\lambda} + \frac{\varepsilon\rho\alpha_T}{c} \cdot \frac{d \langle W(F_0) \rangle}{dF_0} \\ \frac{d \langle W(F_0) \rangle}{dF_0} &= (\nu + 1)LuBi[T_c - \langle T(F_0) \rangle] - \frac{(1 - \varepsilon)\rho Rq_2}{\lambda} - \frac{\delta Rq_2}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Результаты вычислений по система уравнение (23) при определенных значениях параметров для условий солнечных сушильных установок, показывают, что теоретические расчёты хорошо согласуются с экспериментальными данным (рис.1)

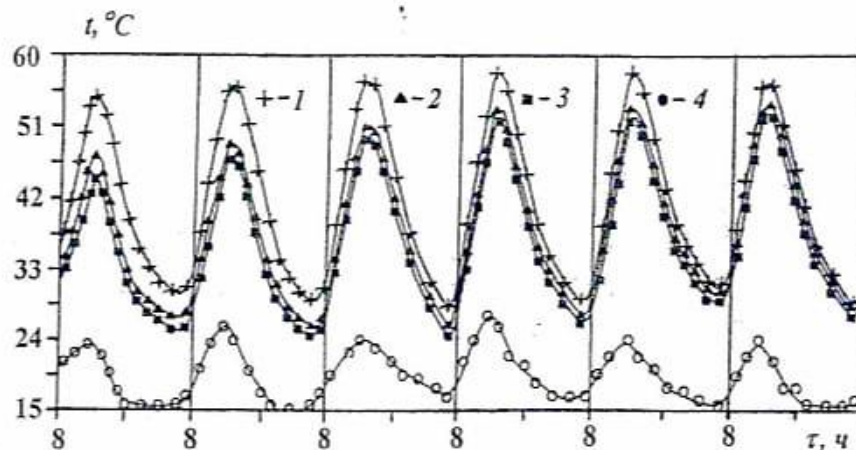


Рис.1. Изменение температуры при конвективной сушке абрикоса (24-29 июль 2025 г):

1- t - воздуха (эксперимент), 2- t_m - на поверхности и 3- t_{mo} - в центре плода (расчёт), 4- t_{mm} - мокрого термометра (эксперимент), 1,2-экспериментальные и расчётные (формула 23) данные; 3-изменение температ воздуха.

ВЫВОДИ

Как видно из уравнений (23), процесс сушка определяется значительными количеством параметров (коэффициент диффузии влаги, термовлагопроводность, теплопередача, массообмена, испарение, теплоёмкость и др) которые принимаются постоянных при решении задачи тепло-и массообмена в процессе сушки фруктов. Наиболее существенным результатом исследований является. Предложенные теоритические методы расчёта основных тепло-и масса обменных характеристик процессов сушки фруктов и овощей в солнечных сушилках.

Условные обозначения

T_0, T, T_{cp} - начальная, текущая и средняя по объему текущая температура теплоносителя, К,

τ - время, ч,

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(мК).

C - теплоёмкость материала, Дж/(кгК),

ρ - плотность абсолютно сухого тела, кг/м³,

a_T, a_m - коэффициенты температуропроводности, диффузии влаги, м²/с,

r, R - текущий линейный размер, максимальный радиус, м,

ε - критерий фазового перехода,

δ - коэффициент термовлагопроводности, 1/К,

$(\nabla T)_n$ - текущая температура на поверхности материала, К,

$(\nabla W)_n$ - начальное влагосодержание материала на поверхности, кг/кг сухого материала,

W_0, W -начальнойеи текущее среднее по объему влагосодержание фруктов, кг/кг сухих фруктов.

q - поток массы, кг/м²К.

α - коэффициент теплоотдачи Вт/(м²К),

ССУ-солнечная сушильная установка.

Литературы

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А., Теория тепло-и массопереноса. М.-Л. Гос.Энерго. Издат, 1968. 472 с.
2. Лыков А.В., Теория сушки. -М.Энерго. Издат, 1968. 472.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа.- М.Физматгиз. 1960. 207 с.
4. Лыков А.В. Тепло-и массообмен в процессах сушки. -М.-Л. Госэнергоиздат. 1956. 464 с.
5. Абрамович И.Г., Лунц Г.Л., Эльгольц Л.Э.Функции комплексного переменного.Операционное исчисление. Теория устойчивости.-М. Наука. 1968. 210 с.
6. Цой П.В., Методы расчета задан тепломассопереноса. -М., Махамов Х.М. Динамические характеристика многослойной камеры гелиотеплицы - сушилки, как объекта регулирования // Узбекской журнал проблемы информатики и энергетика. 1993. №5. 17-24 с.
7. Hayriddinov B.E., Holmirzayev N.S. “Quyosh energiyasidan foydalanishning fizik asoslari” Qarshi nasaf NMIN-2020-yil. 290 bet.
8. Manpreet Singh, U.S.Shuvhari, J.Ahmed Dryng characteristics and product quality of bell pepper, International Journal of Food Properties, 3:2, 249-257, DOI: 10.1080/1094910009524631.
9. Stefan J. Kowolski, Dominik Mierzwa (2011) Hybrid Drying of Red Bell peopper: Energy and Quality Issues, Drying Technology: An International Journal, 29:10, 1195-1203, Doi: 10.1080/07373937.2011. 578231.
10. Рахматов О.К. Вопросы тепловой оптимизации режима эксплуатации солнечно-топливной сушильной установки конвективного типа «вестник» Алтайского государственного аграрного университета №1 (135) 2016.С. 132-138.