

УДК 631.365.036.3

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТИ И  
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУШКИ ПЛОДОВ ШИПОВНИКА В  
ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ**

**Андрей Игорьевич Иосифов**

аспирант

**Сергей Юрьевич Щербаков**

кандидат технических наук, доцент

[Scherbakov78@yandex.ru](mailto:Scherbakov78@yandex.ru)

**Иван Павлович Криволапов**

кандидат технических наук, доцент

[ivan0068@bk.ru](mailto:ivan0068@bk.ru)

Мичуринский государственный аграрный университет

Мичуринск, Россия

**Аннотация.** В статье приводятся методика теоретического обоснования процесса сушки плодов в виброкипящем слое. Установлены теоретические зависимости по определению общей продолжительности и скорости сушки.

**Ключевые слова:** виброкипящий слой, сушка.

Сложность механизма внешнего тепло- и массопереноса в процессе сушки в виброкипящем слое заключается в том, что он протекает в условиях одновременного существования трех форм течения среды: вынужденного, диффузионного и свободно конвективного.

На рисунке 1 и изображена модель, объясняющая движение плода в виброкипящем слое с подачей потока газообразного сушильного агента с снизу в верх. Имеет место общемассовое вынужденное обтекание продукта, а также обеспечивается условие витания с помощью вибрации.

Для определения продолжительности процесса сушки формула (1) необходимо предварительно найти значение скорости сушки в первом периоде [1, 2, 3].

Скорость сушки в кипящем слое обусловлена рядом факторов, из которых основными являются интенсивность внешнего теплообмена и влажпроводность материалов, определяющая скорость переноса влаги к поверхности высушиваемых частиц [4, 5, 6].

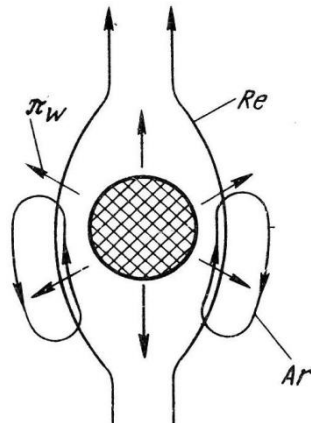


Рисунок 1 - Форма движения плода при сушке в виброкипящем слое с наличием воздушного потока:  $Ar$  – интенсивность теплообмена для предельных условий естественной конвекции (критерий Архимеда),  $Re$  – интенсивность теплообмена для предельных условий вынужденной конвекции (критерий Рейнольдса),  $\pi_w$  – критерий поперечного потока вещества (диффузионное течение).

Общая продолжительность сушки:

$$\eta = \frac{1}{U} \left[ W_1 - W_{kp} + 2,3(W_{kp} - W_p) \lg \frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} \right] \quad (1)$$

где,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_p$  - начальная, конечная и равновесная влажность материала;  $W_{кр}$  - первая критическая влажность материала (в конце первого периода сушки);

Для определения скорости сушки  $U$ , необходимо определить коэффициент массоотдачи в газовой фазе  $\beta_m$ , для этого предлагается ниже следующая методика.

1. Определение параметров сушильного агента (воздушно-паровой смеси).

Объемная концентрация пара:

$$\varepsilon_{1\infty} = p_{1\infty} / p_{см} \quad (2)$$

где,  $p_{1\infty}$  - плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>,  $p_{см}$  - давление смеси или давление в сушильной камере, кПа.

Объемная концентрация воздуха:

$$\varepsilon_{2\infty} = 1 - \varepsilon_{1\infty} \quad (3)$$

Массовая концентрация воздуха:

$$m_{2\infty} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} (\frac{1}{\varepsilon_{2\infty}} - 1)} \quad (4)$$

где, универсальные газовые постоянные для водяного пара  $R_1 = 461,5$  Дж/(кг\*К), воздуха  $R_2 = 287$  Дж/(кг\*К).

Плотность воздушно-паровой смеси:

$$\rho_{\infty} = \rho_{1\infty} - \rho_{2\infty} \frac{p}{p_{\text{нн}}} \varepsilon_{2\infty}, \quad (5)$$

где,  $p$  - давление среды в камере, кПа.  $\rho_{1\infty}$  - плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{2\infty}$  - плотность сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

Динамическая вязкость воздушно-паровой смеси:

$$\mu_{\infty} = \frac{\mu_{1\infty} (1 - \varepsilon_{2\infty}) + \mu_{2\infty} \varepsilon_{2\infty} \frac{R_1}{R_2}}{1 + (\frac{R_1}{R_2} - 1) \varepsilon_{2\infty}} \quad (6)$$

где  $\mu_{\infty}$  - динамическая вязкость воздушно-паровой смеси, Па\*с.

Теплоемкость воздушно-паровой смеси:

$$c_{\infty} = c_{1\infty} + (c_{2\infty} - c_{1\infty})m_{2\infty} \quad (7)$$

где,  $c_{\infty}$  - теплоемкость воздушно-паровой смеси (Дж/(кг \*К)).

Кинематическая вязкость:

$$\nu_{\infty} = \mu_{\infty} / \rho_{\infty} \quad (8)$$

где,  $\nu_{\infty}$  - кинематическая вязкость (м<sup>2</sup>/с).

Теплопроводность:

$$\lambda_{\infty} = [\lambda_{2\infty} \varepsilon_{2\infty} + \lambda_{1\infty} (1 - \varepsilon_{2\infty})] \cdot \left[ 1 + \frac{\varepsilon_{2\infty} (1 - \varepsilon_{2\infty})}{3,5} \right] \quad (9)$$

где,  $\lambda_{\infty}$  - теплопроводность воздушно-паровой смеси (Вт/(м\*К)).

Критерий Прандтля:

$$Pr_{\infty} = \mu_{\infty} c_{\infty} / \lambda_{\infty}. \quad (10)$$

Коэффициент взаимной диффузии:

$$D = 0,216 \left( \frac{T_{\infty}}{T_0} \right)^{1,8} 10^{-4} \quad (11)$$

где,  $\left( \frac{T_{\infty}}{T_0} \right)$  - температурный параметр, для различных материалов

рекомендуют принимать 1,1-2,8 [7].

Критерий Шмидта:

$$Sc = \nu_{\infty} / D. \quad (12)$$

2. Расчет интенсивности теплообмена для предельных условий вынужденной конвекции (критерий Рейнольдса и предельное значение критерия Нуссельта).

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \nu d_{nl} / \nu_{\infty} \quad (13)$$

где,  $\nu$  - средняя скорость колебаний продукта (м/с);  $d_{nl}$  - диаметр плода.

Предельное значение критерия Нуссельта для формы продукта в виде шара, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu_{0Re} = 2 + 0,03 Re^{0,54} Pr^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Pr^{0,36}. \quad (14)$$

3. Определяем интенсивность теплообмена для предельных условий естественной конвекции (критерий Архимеда и предельное значение критерия Нуссельта).

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{g d_{nl}^3 \rho_{\infty}^2}{\mu_{\infty}^2} \frac{t_{\infty} - t_{нас}}{273 + t_{\infty}}. \quad (15)$$

где,  $t_{\infty}$  - температура воздуха в камере.

Предельное значение критерия Нуссельта, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu_{0Ar} = 2 + 0,564 \sqrt{Ar \Pr \left( \frac{\Pr}{0,846 + \Pr} \right)}. \quad (16)$$

4. Интенсивность реального совместно протекающего процесса, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu = \sqrt{Nu_{0Re}^2 + Nu_{0Ar}^2}. \quad (17)$$

5. Определяем коэффициент теплообмена:

$$\alpha = Nu \lambda_{\infty} / d_{nl} \quad (18)$$

где,  $\alpha$  - коэффициент теплообмена (Вт/(м<sup>2</sup> К));  $d_{nl}$  – диаметр плода или ягоды (м).

6. Определяем массоперенос при сушке критерий поперечного потока вещества:

$$\pi_w = \frac{d_{nl} \alpha (t_{\infty} - t_{нас})}{r \mu_{\infty}}, \quad (19)$$

Предельное значение массообменного критерия Нуссельта при вынужденном движении, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu_{0Re} = 2 + 0,03 Re^{0,54} Sc^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Sc^{0,36}. \quad (20)$$

Предельное значение массообменного критерия Нуссельта при свободном движении, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu_{0Ar} = 2 + 0,564 \sqrt{Ar Sc \left( \frac{Sc}{0,846 + Sc} \right)}. \quad (21)$$

Массообменный критерий Нуссельта реального совместно протекающего

процесса, согласно рекомендациям [7]:

$$Nu_m m_{2нов} = \sqrt{Nu_{m0Re}^2 + Nu_{m0Ar}^2 + \left(\frac{1}{2} \pi_w Sc\right)^2} - \frac{1}{2} \pi_w Sc. \quad (22)$$

7. Коэффициент массоотдачи  $\beta_m$  (м/с):

$$\beta_m = \frac{DNu_m m_{2\hat{a}\hat{a}}}{d_{\hat{v}\hat{e}} m_{2\hat{v}\hat{a}}}. \quad (23)$$

8. Зная, значение коэффициента массоотдачи, находим скорость сушки по уравнению (кг/с):

$$U = S_{пл} \beta_m \rho_\infty (m_{2\infty} - m_{2нов}) \quad (24)$$

где,  $S_{пл}$  - площадь поперечного сечения плодов;  $\beta_m$  - коэффициент массоотдачи (м/с);  $\rho_\infty$  - плотность паровоздушной смеси (кг/м<sup>3</sup>);  $m_{2\infty}$  - массовая концентрация паровоздушной смеси,  $m_{2нов}$  - массовая концентрация паровоздушной смеси над поверхностью продукта.

После подстановки в уравнение (1) полученного значения скорости сушки можно определить общую продолжительность времени сушки.

### Список литературы

1. Совершенствование технологии сушки плодов с разработкой барабанной сушильной установки. / Щербаков С.Ю., Завражнов А.И., Лазин П.С., Криволапов И.П., Аксеновский А.В.// Наука в центральной России. 2018. № 2 (32). С. 100-108.

2. Лазин П.С., Щербаков С.Ю. Разработка барабанной сушильной установки // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Сборник статей по материалам III научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского государственного аграрного университета. 2017. С. 724-730.

3. Determination of the energy efficiency of drying hawthorn fruit in a drum dryer with a paddle mixing device / Shcherbakov S.Yu., Babushkin V.A., Krivolapov

I.P., Lazin P.S., Korotkov A.A.// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 32009.

4. Щербаков С.Ю., Лазин П.С. Повышение качества процесса сушки плодово-ягодной продукции. // Инновационная деятельность в модернизации АПК. материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 частях. 2017. С. 68-71.

5. Лазин П.С., Щербаков С.Ю. Исследование процесса сушки плодов боярышника в сушильном шкафу // Современные проблемы развития техники, экономики и общества. Материалы II Международной научно-практической очно-заочной конференции. Научный редактор А.В. Гумеров. 2017. С. 81-84.

6. Щербаков С.Ю., Завражнов А.И., Лазин П.С. Влияние коэффициента заполнения барабанной сушилки на интенсивность сушки боярышника // Сельский механизатор. 2020. № 9. с. 24-25.

7. Минухин Л.А. Расчеты сложных процессов тепло- и массообмена в аппаратах пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1986. -175 с.

**UDC 631.365.036.3**

**THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE SPEED AND  
DURATION OF DRYING OF ROSEHIP FRUITS IN A VIBRATING  
BOILING LAYER**

**Andrey I. Iosifov**

postgraduate student

**Sergey Yu. Shcherbakov**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

[Scherbakov78@yandex.ru](mailto:Scherbakov78@yandex.ru)

**Ivan P. Krivolapov**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

[ivan0068@bk.ru](mailto:ivan0068@bk.ru)

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

**Annotation.** The article presents a method of theoretical substantiation of the process of drying fruits in a vibrating boiling layer. Theoretical dependences for determining the total duration and speed of drying are established.

**Key words.** Vibrating boiling layer, drying.