

УДК 664.729

UDC 664.729

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ СУШКИ,
ДЕФОРМАЦИИ И МИНИМИЗАЦИЯ
ТРЕЩИННОВАТОСТИ РИСА**

**MODELLING THE KINETICS OF DRYING,
DEFORMATION AND MINIMIZATION OF
RICE CRACK FORMATION**

Подгорный Сергей Александрович
к.т.н

Podgornyy Sergey Alexandrovich
Cand.Tech.Sci.

Косачев Вячеслав Степанович
д.т.н., профессор

Kosachev Vyacheslav Stepanovich
Dr.Sci.Tech., professor

Кошевой Евгений Пантелеевич
д.т.н., профессор
*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

Koshevoy Evgeniy Panteleevich
Dr.Sci.Tech., professor
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

В статье рассмотрены вопросы моделирования кинетики сушки, деформации и минимизации трещиноватости риса при различных параметрах режимов сушки

The article studies the issues of drying, deformation and minimization of rice crack formation according to different parameters of drying modes

Ключевые слова: СУШКА РИСА, ДЕФОРМАЦИЯ, КИНЕТИКА, ТРЕЩИННОВАТОСТЬ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Key words: RICE DRYING, DEFORMATION, KINETICS, CRACK FORMATION, MATHEMATICAL MODELLING

Изменения основных параметров процесса сушки во времени, имеют большое практическое значение как для управления процессом и определения режимов обеспечивающих качество продукта так и расчета энергетических затрат на проведение данного процесса [1]. При этом качество получаемого продукта определяется минимальной трещиноватостью семян риса после проведения этого процесса. Учет этого показателя осуществляли по экспериментальным данным деформации семян риса в процессе сушки от текущей кинетической влажности по формуле (1):

$$V(X) = V_0 \cdot \left[(1 - b) \frac{X}{X_0} + b \right] \quad (1)$$

Как видно из формулы объем зависит от влажности в данный момент $X(\tau)$ времени определяемый моделью, и параметр b , величина которого определяется режимами сушки. Для идентификации параметров модели

использовали экспериментальные данные по сушки семян риса в тонком слое (Рисунок 1).

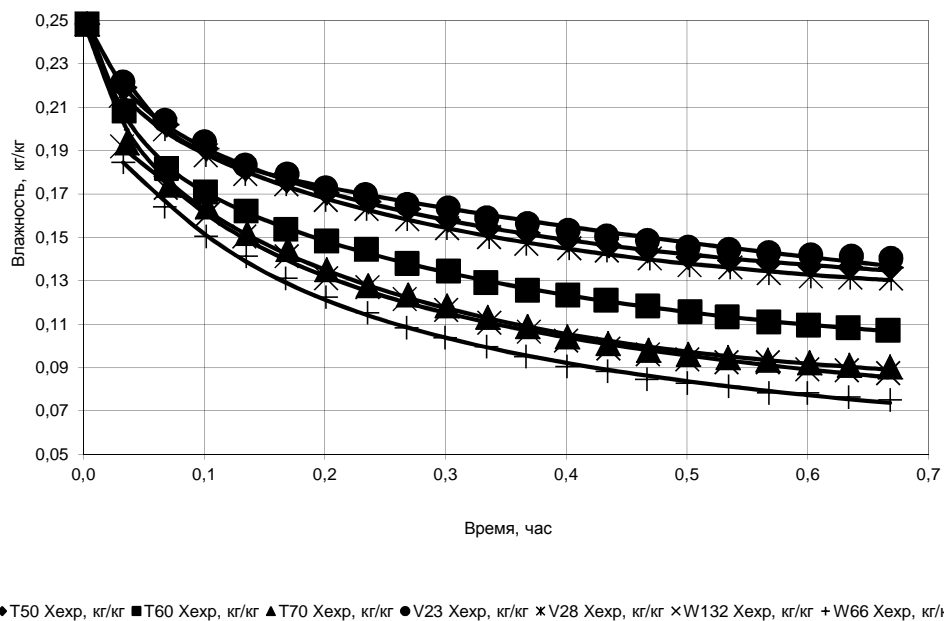


Рисунок 1- Кинетика сушки риса

В этих данных (Рисунок 1) представлены только кинетические кривые сушки семян риса и параметры режимов сушки (Таблица 1).

Таблица 1 Параметры режимов сушки семян риса в тонком слое

$t, ^\circ\text{C}$	50	60	70	50	50	70	70
w_e	0,032195	0,03068	0,02914	0,032195	0,032195	0,02914	0,02914
w_0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$F, \text{ м}^2$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\rho, \text{ кг/м}^3$	541,27	541,27	541,27	541,27	541,27	541,27	541,27
$V, \text{ м/с}$	2,5	2,5	2,5	2,3	2,8	2,8	2,8
$W, \text{ кг}$	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	0,66
$h, \text{ м}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

В качестве исходных данных использовались кинетические экспериментальные зависимости (точки Рисунок 1) получая в качестве модельных кривых зависимости от 9 кинетических параметров (2) минимизируя сумму относительных отклонений экспериментальных данных (точки Рисунок 1) от соответствующих расчетных кривых (линии Рисунок 1) для данных экспериментальных значений времени. Идентификация параметров производилась по методу Нелдера — Мида, также известного как метод деформируемого многогранника и симплекс-метод, метод безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, не использующий производной (точнее — градиентов) функции, а поэтому он легко применим к негладким и/или зашумлённым функциям [2,3]. Для идентифицированных параметров рассматривали зависимости от основного фактора – скорости сушильного агента. В качестве исходных данных использовались кинетические экспериментальные зависимости (точки Рисунок 1), а в качестве модельных кривых систему дифференциальных уравнений потоков тепла и массы [4]:

$$\frac{dX(\tau)}{d\tau} = -\frac{A_m \cdot h_m}{m_s} \cdot \ln \left\{ \frac{\varphi|_{\partial B} \cdot p_{wn}[T(\tau)]}{\varphi_a \cdot p_{wn}(T_a)} \right\} \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\tau} \{ [c_s + c_l \cdot X(\tau)] \cdot T(\tau) \} = \frac{A_T \cdot h_T}{m_s} \cdot [T_a - T(\tau)] - \frac{A_m \cdot l \cdot h_m}{m_s} \cdot \ln \left\{ \frac{\varphi|_{\partial B} \cdot p_{wn}[T(\tau)]}{\varphi_a \cdot p_{wn}(T_a)} \right\}$$

Следовательно, изменение объема определяется температурой и скоростью сушильного агента, а также нагрузкой слоя семян. Изменение объема важно не само по себе, а в связи с трещиноватостью [5], определяемой по регрессионной формуле (3):

$$Tr \left[\frac{X(0) - X(\tau_{\max})}{\tau_{\max}} \right] = 0.0952 \cdot Ln \left[\frac{X(0) - X(\tau_{\max})}{\tau_{\max}} \right] + 0.4487 \quad (3)$$

где $X(0)$ – начальная влажность; $X(\tau_{\max})$ – конечная влажность; τ_{\max} - время сушки, час.

Учитывая высокую адекватность модели и значительную вариабельность её параметров, было принято решение об использовании двумерных сплайнов по температуре сушильного агента и его скорости с линейной интерполяцией этих сплайнов по нагрузке слоя [6,7]. Результаты сплайн - модели представлены в виде температурных зависимостей (Рисунок 2). В заключении отметим, что температурная кривая полностью восстановлена с помощью математической модели по данным кинетики сушки (Рисунок 2).

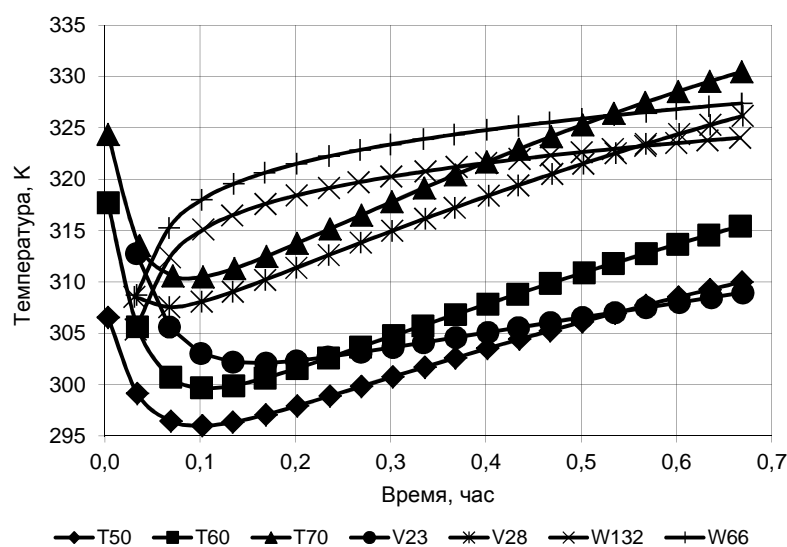


Рисунок 2 - Восстановленные модельные зависимости температурной кинетики

В диапазоне скорости воздуха от 2,3 м/с до 2,8 м/с отмечены зависимости для параметров сжимаемости b ; параметр n также меняется. Коэффициент конвективной передачи пара h_m практически меняется на 50%. Зительно меняется и коэффициент конвективной теплопередачи h_t от скорости сушильного агента, его температуры и нагрузки. Учитывая значительную нелинейность кинетических параметров и высокую адекватность модели, в исследуемых интервалах экспериментальных режимах сушки, было принято решение об использовании интерполяционных многомерных сплайнов для описания этих зависимостей. Анализируя формулу трещинноватости, получаем возможность определения режимов сушки, при которых эта величина была бы минимальной, а именно при заданном съеме влаги трещинноватость должна быть минимальна. Следовательно, исходя из формулы (3) имеем функцию цели (4):

$$Z(t, v, w, \tau) := 0.0952 \cdot \ln\left(\frac{0.25 - X\tau(t, v, w, \tau)}{\tau}\right) + 0.4487 \quad (4)$$

Где 0.25 – начальная влажность семян, при которой проводились опыты. Минимум функции (4), которой при заданном ограничении на съем влаги обеспечивает минимальную трещинноватость семян риса. Для расчета этих режимов необходимо ограничить пространство варьирования параметров процесса сушки областью экспериментальных данных (5):

$$\begin{aligned} t \geq \min(t_C) & \quad v \geq \min(V_{ms}) & \quad w \geq \min(0.66, 1.32) & \quad X\tau(t, v, w, \tau) = x_{\min} \\ t \leq \max(t_C) & \quad v \leq \max(V_{ms}) & \quad w \leq \max(0.66, 1.32) & \end{aligned} \quad (5)$$

Эти ограничения в численном выражении в данном исследовании имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \min(t_C) &= 50 & \min(V_{ms}) &= 2.3 & \min(0.66, 1.32) &= 0.66 \\
 \max(t_C) &= 70 & \max(V_{ms}) &= 2.8 & \max(0.66, 1.32) &= 1.32
 \end{aligned} \tag{6}$$

Минимизируя целевую функцию относительно центра факторного пространства:

$$\begin{pmatrix} t \\ v \\ w \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{mean}(t_C) \\ \text{mean}(V_{ms}) \\ \text{mean}(0.66, 1.32) \\ \tau_{var} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 60 \\ 2.533 \\ 0.99 \\ 0.21 \end{pmatrix} \tag{7}$$

Варьируя начальное приближение по времени (τ_{var}), таким образом, чтобы оно соответствовало времени сушки до необходимой минимальной влажности. Результаты оптимизации представлены в зависимости от этой величины (Таблица 2).

Таблица 2 Минимизация трещиноватости

X_{min}	t	v	w	τ	Z
0,050	50,012	2,300	1,320	15,375	3,76%
0,075	50,603	2,300	1,320	8,343	8,08%
0,100	52,357	2,630	1,003	2,993	16,37%
0,125	50,000	2,588	1,055	1,423	21,72%
0,150	50,000	2,300	1,320	0,533	28,93%
0,175	52,633	2,300	1,320	0,275	32,48%
0,200	50,000	2,481	1,320	0,139	35,14%

Как видно из представленных данных минимальная трещиноватость в значительной степени зависит от времени сушки, которая в значительной степени определяется остаточной влажностью. Учитывая численный характер модельного решения, провели расчет изменения объема от текущей влажности (Рисунок 3).

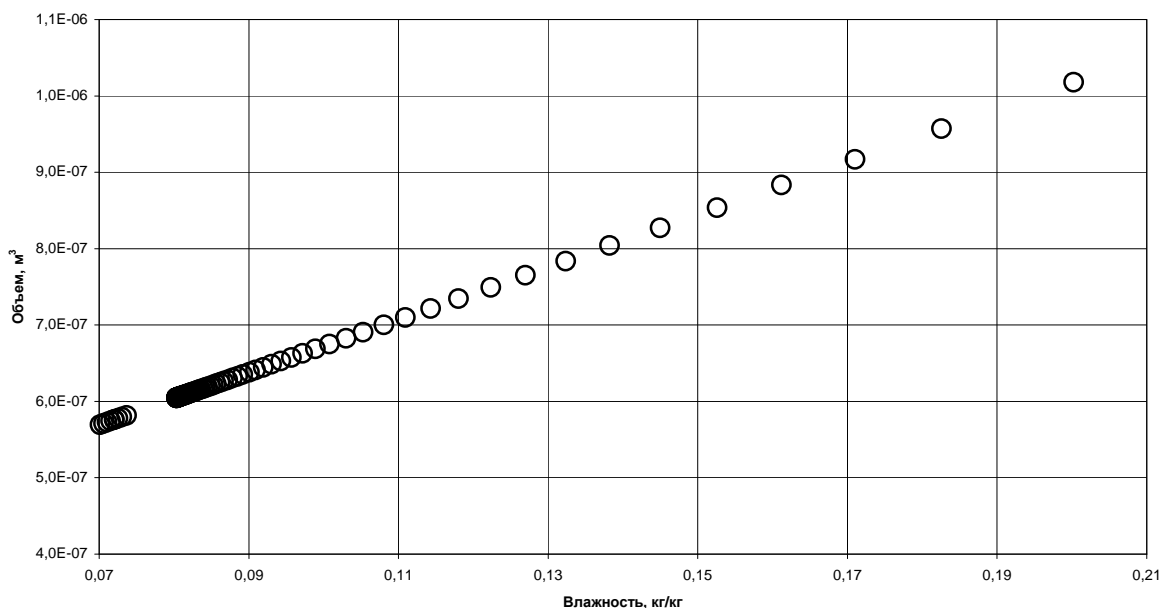


Рисунок 3 - Аппроксимация объема от влажности при режимах минимальной трещиноватости.

Используя упрощенную модель трещиноватости, провели моделирование процесса сушки в условиях минимальной трещиноватости в исследуемом диапазоне (Рисунок 4). Для контроля провели расчет модельной кинетики влажности, в данном режиме сушки риса совмещенной с изменением объема (Рисунок 4).

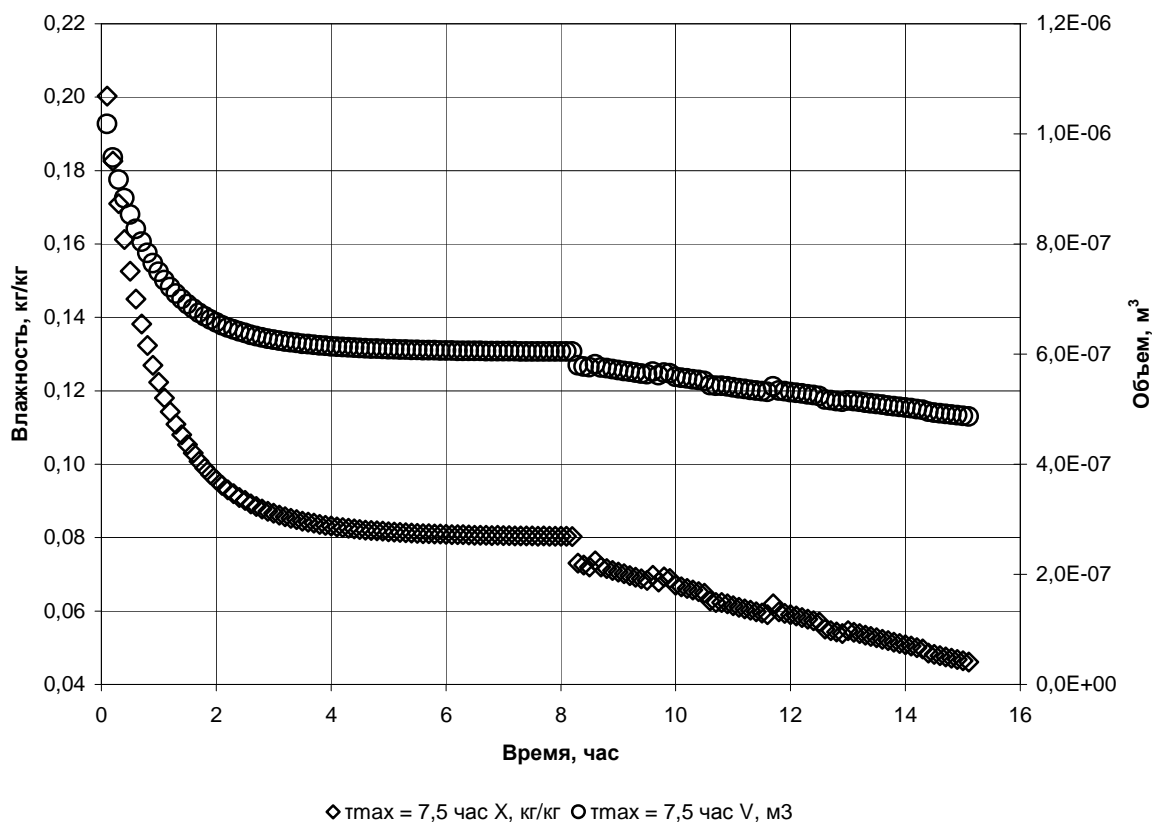


Рисунок 4 - Аппроксимация объема и влажности от времени при режимах минимальной трещиноватости.

Как видно из представленного графика (Рисунок 4) численное решение устойчиво на временном интервале от 1 сек до 8 часов. Более длительный режим не поддается модельному описанию в связи с его неустойчивой расчетной схемой. Следовательно, значимыми режимами могут считаться температуры сушильного агента от 50 до 53 °С, его скорости от 2.3 до 2.6 м/сек, нагрузке от 1.00 до 1.32 кг. В этом случае будет достигаться минимальная трещиноватость семян риса. Графически эти зависимости представлены ниже (Рисунок 5).

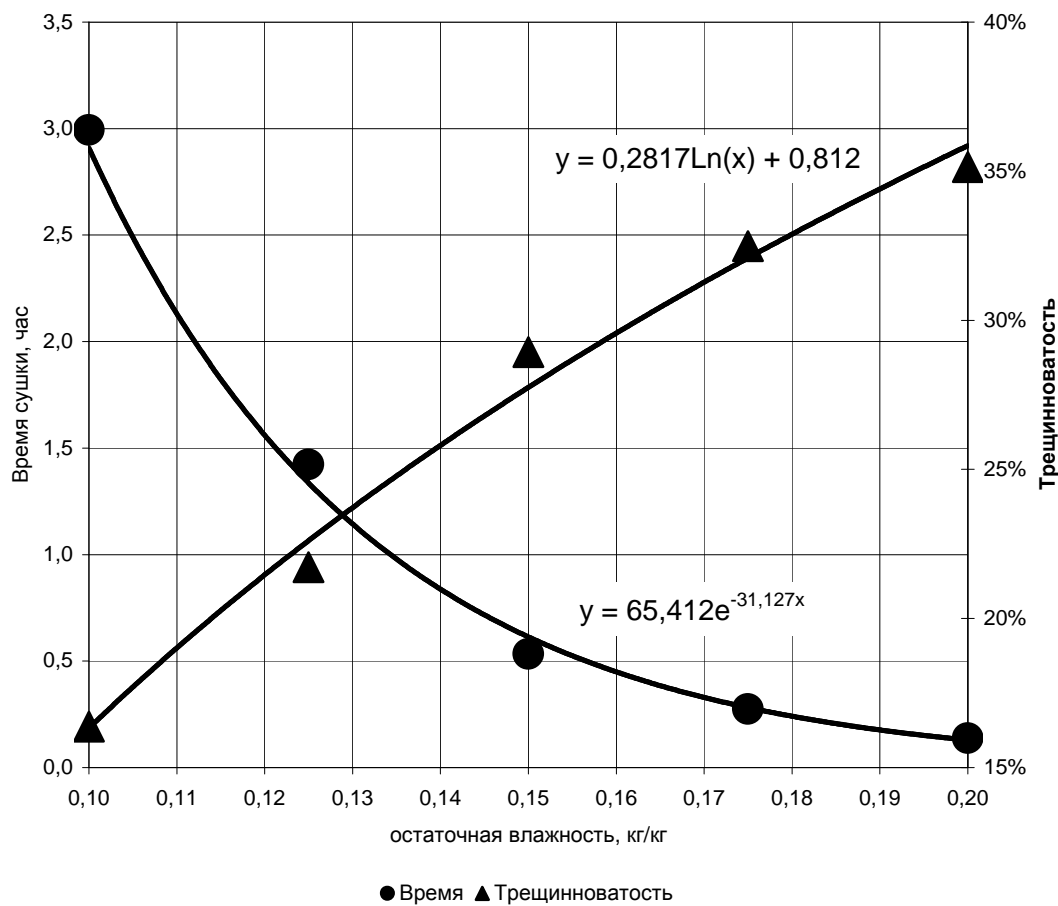


Рисунок 5 - Аппроксимация трещиноватости и влажности от времени при режимах минимальной трещиноватости.

Вывод

Трещиноватость зависит от остаточной влажности и от времени сушки. Представленные зависимости позволяют прогнозировать качество семян риса в процессе сушки.

Литература

- 1.Srikiatden J., Roberts J. S. Moisture transfer in solid food materials: a review of mechanisms, models, and measurements. International Journal of Food Properties, 10, 2007. 739-777.
- 2.Khanali M., Rafiee Sh., Jafari A., Hashemabadi S.H., Banisharif A. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain. Journal of Agricultural Technology 2012 Vol. 8(3): 795-810
3. Chen Chiachung; Wu Po-Ching. Thin-layer Drying Model for Rough Rice with High Moisture Content. J. agric. Engng Res. (2001) 80(1), 45-52
4. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник). М.: Энергия, 1971. 560 с.

5. Коновалов В.И., Кудра Т., Гагапова Н.Ц. Современные вопросы теории переноса при сушке. Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. № 3. 538-559.

6. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Математическое моделирование процессов сушки и кондиционирования зерна. Потенциалы массопереноса LAMBERT Academic Publishing, 2012

7. Kowalski S.J., Mierzwa D. Numerical analysis of drying kinetics for shrinkable products such as fruits and vegetables. Journal of Food Engineering 114 (2013) 522-529.

References

1. Srikiatden J., Roberts J. S. Moisture transfer in solid food materials: a review of mechanisms, models, and measurements. International Journal of Food Properties, 10, 2007. 739-777.

2. Khanali M., Rafiee Sh., Jafari A., Hashemabadi S.H., Banisharif A. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.) grain. Journal of Agricultural Technology 2012 Vol. 8(3): 795-810

3. Chen Chiachung; Wu Po-Ching. Thin-layer Drying Model for Rough Rice with High Moisture Content. J. agric. Engng Res. (2001) 80(1), 45-52

4. Lykov A.V. Teplomassoobmen (Spravochnik). M.: Jenergija, 1971. 560 s.

5. Коновалов В.И., Кудра Т., Гагапова Н.С. Современные вопросы теории переноса при сушке. Вестник ТГТУ. 2008. Том 14. № 3. 538-559.

6. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Математическое моделирование процессов сушки и кондиционирования зерна. Потенциалы массопереноса LAMBERT Academic Publishing, 2012

7. Kowalski S.J., Mierzwa D. Numerical analysis of drying kinetics for shrinkable products such as fruits and vegetables. Journal of Food Engineering 114 (2013) 522-529.