

УДК 664.8.039.51:53.09

UDC 664.8.039.51:53.09

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА ВЛАЖНОГО СЫРЬЯ В УСТРОЙСТВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ**SEMI-EMPIRICAL SIMULATION MODEL OF WET RAW MATERIAL HEATING IN A DYNAMIC INFRARED DRYING DEVICE**Сергеев Михаил Александрович
аспирантm-sergeev1@mail.ru*Донской государственной технической
университет, Ростов-на-Дону, Россия*Sergeev Mikhail Alexandrovich
postgraduate studentm-sergeev1@mail.ru*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

Рудой Дмитрий Владимирович

канд. техн. наук, доцент

РИНЦ SPIN-код: 3297-3460

rudoy.d@gs.donstu.ru*Донской государственной технической
университет, Ростов-на-Дону, Россия*

Rudoy Dmitry Vladimirovich

Cand.Tech.Sci., associate professor

RSCI SPIN-code: 3297-3460

rudoy.d@gs.donstu.ru*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

Завалий Алексей Алексеевич

д-р техн. наук, доцент

РИНЦ SPIN-код: 3604-5109

zavalym@mail.ru*Крымский федеральный университет им.
В.И. Вернадского, Симферополь, Россия*

Zavaliy Alexey Alexeevich

doctor of technical sciences, associate professor

RSCI SPIN-code: 3604-5109

zavalym@mail.ru*V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Simferopol, Russia*

Разработана имитационная модель нагрева высоковлажного растительного сырья при комбинированном конвективно-лучистом теплоподводе в компактном устройстве динамической инфракрасной сушки. Модель позволяет анализировать распределение температуры в слое высушиваемого сырья при действии двух механизмов импульсного воздействия инфракрасного излучения: релейного включения и выключения источников теплового излучения, обеспечивающего заданный диапазон температуры сырья в ходе сушки, и возвратно-поступательного движения инфракрасного излучателя над поверхностью сырья в ходе сушки. В основу модели положено уравнение нестационарной теплопроводности для одномерного случая при условии отсутствия тепловых потоков вдоль слоя. Для учёта изменений физических свойств сырья в ходе сушки, вызванных испарением из сырья влаги, использована экспоненциальная аппроксимация эмпирической зависимости интенсивности испарения влаги при инфракрасной сушке высоковлажного сырья, полученной в устройстве-прототипе компактного устройства динамической инфракрасной сушки. Преимуществами численной реализации модели являются её компактность и малое вычислительное время, позволяющие анализировать результаты моделирования большого количества вариантов процесса

A simulation model for heating high-moisture vegetable raw materials in a compact device for dynamic infrared drying has been developed in a combined convective-radiant heat input. The model allows to analyze temperature distribution in the dried raw material layer under the action of two mechanisms of infrared radiation pulse impact: relay switching on and off the thermal radiation sources, which provides a given raw material temperature range during drying, and reciprocating infrared radiator motion over the surface of raw material during drying. The model is based on the equation of nonstationary heat conduction for one-dimensional case under the heat flows along the layer absence condition. Exponential approximation of moisture evaporation intensity empirical dependence in infrared high-moisture raw materials drying obtained in the compact device prototype for dynamic infrared drying is used to take into account changes in the physical properties of raw materials during drying caused by moisture evaporation from raw materials. The advantages of the model's numerical implementation are its compactness and short computational time, allowing to analyze the simulation results of a large options number for the moist raw materials dynamic heating process under the thermal radiation influence, convective heat flow under moisture evaporation conditions from raw materials under various modes of dynamic thermal influence on raw materials.

динамического нагрева влажного сырья под воздействием теплового излучения, конвективного теплового потока в условиях испарения влаги из сырья при различных режимах динамического теплового воздействия на сырьё

Ключевые слова: ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ИНФРАКРАСНАЯ СУШКА, РАСТИТЕЛЬНОЕ СЫРЬЁ

Keywords: SIMULATION MODEL, INFRARED DRYING, VEGETABLE RAW MATERIALS.

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-176-011>

Введение

В устройствах инфракрасной сушки используют высокотемпературные электрические нагревательные элементы (открытые или защищённые проволочные спирали, изготовленные из тугоплавких металлов), обладающие малой тепловой инерцией, что позволяет создавать тепловые импульсы инфракрасного излучения, направленные на подлежащее сушке сырьё. Импульсы могут создаваться включением/выключением электрического питания нагревательных элементов или движением нагревательных элементов над поверхностью сырья.

Импульсный нагрев сырья инфракрасными излучателями может рассматриваться как средство интенсификации процесса влагоудаления из сырья в случае, если он приводит к появлению отрицательного градиента температуры в толще сырья, являющегося потенциалом термодиффузии [1, 2, 3,14].

В разрабатываемом нами устройстве инфракрасной сушки высоковлажного насыщенного биологически активными веществами растительного сырья высокотемпературные источники инфракрасного излучения циклически перемещаются над поверхностью сырья, размещённого на плоских сетчатых поверхностях лотков [4]. Для исключения перегрева сырья, приводящего к потере его биологически активных веществ [8,9,14], в устройстве осуществляется контроль температуры сырья и релейное регулирование заданной температуры

<http://ej.kubagro.ru/2022/02/pdf/11.pdf>

сырья в ходе сушки включением/выключением электрического питания излучателей.

Устройство инфракрасной сушки, в котором реализуются указанные механизмы переменного теплового действия на сырьё, мы называем устройством динамической инфракрасной сушки.

Очевидно, что реализация тепловых режимов сушки, приводящих к наличию отрицательного градиента температуры в слое сырья, зависит от физических свойств сырья (температуропроводности, формы и геометрических размеров), условий теплообмена сырья с окружающей средой, а также от мощности теплового излучения, частоты и формы импульсного теплового действия на сырьё, гистерезиса релейного регулирования температуры сырья в ходе сушки [11,12,13].

Для выбора конструктивных и режимных параметров устройства динамической инфракрасной сушки, обеспечивающих циклическую реализацию отрицательного температурного градиента в толще сырья, нами разработана полуэмпирическая имитационная модель нагрева влажного сырья в устройстве.

Основная часть

В модели тепловое состояние слоя сырья описывается уравнением нестационарной теплопроводности для одномерного случая при условии отсутствия тепловых потоков вдоль слоя:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + qv, \quad (1)$$

где ρ – плотность сырья, кг/м³; C_p – удельная теплоёмкость сырья, Дж/(кг·К); t – температура сырья по толщине слоя, °С; τ – время, с; x – координата толщины слоя сырья, м; λ – теплопроводность сырья, Вт/(м·К);

qv – удельный тепловой поток внутренних источников теплоты сырья, Вт/м³.

Уравнение (1) позволяет для заданных граничных условий определить поле температуры в толще слоя сырья для известных в данный момент времени физических свойств сырья в расчётной точке толщины слоя.

Для учёта изменений физических свойств сырья в ходе сушки, вызванных испарением из сырья влаги, использована экспоненциальная аппроксимация эмпирической зависимости интенсивности испарения влаги при инфракрасной сушке высоковлажного сырья, полученной в устройстве-прототипе разрабатываемого устройства динамической инфракрасной сушки [5]. Зависимость интенсивности сушки $U(\tau)$ от времени имеет вид:

$$U(\tau) = U(0) \cdot e^{-\varepsilon \cdot \tau}, \quad (2)$$

где $U(0)$ – интенсивность влагоудаления из сырья в начальный момент сушки, кг/(м²·с); ε – постоянная времени экспоненциально убывающей интенсивности сушки, 1/с; τ – время.

Принимая постоянной форму сырья в ходе сушки и постоянными по объёму сырья его физические свойства, уравнение (2) позволяет определить для каждого расчётного момента времени процесса сушки физические свойства, являющиеся параметрами уравнения (1).

Граничными условиями решения уравнения (1) являются условия теплового баланса на поверхностях слоя сырья:

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} &= \alpha_1 \cdot (t_{f1} - t(x=0, \tau)) + ql - qw; \\ -\lambda \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=L} &= \alpha_2 \cdot (t_{f2} - t(x=L, \tau)) + ql - qw, \end{aligned}$$

(3)

где α_1 и α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхностях слоя сырья 1 и 2 соответственно, Вт/(м²·К); t_{f1} и t_{f2} – температура воздуха, омывающего поверхности 1 и 2 соответственно; $t(x=0, \tau)$ – температура на поверхности 1 слоя сырья; $t(x=L, \tau)$ – температура на поверхности 2 слоя сырья; ql – тепловой поток излучения, Вт/м²; qw – тепловой поток испарения влаги, Вт/м².

Для решения уравнения (1) с граничными условиями (2) применён алгоритм, изложенный в [6, 7], в основу которого положена неявная численная схема для контрольного объёма (см. рис. 1):

$$\frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x \cdot (T_i^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_j})}{\Delta \tau} = \lambda \cdot \frac{T_{i-1}^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_{j+1}}}{\Delta x} + \lambda \cdot \frac{T_{i+1}^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_{j+1}}}{\Delta x} + qv \cdot \Delta x,$$

(4)

где $(\tau_{j+1} - \tau_j) = \Delta \tau$ – расчётный шаг по времени.

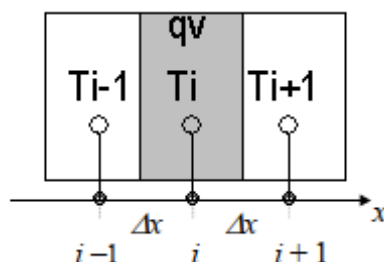


Рисунок 1 – Контрольный объём вычислительной схемы

Выражение (4) преобразуется к линейному относительно неизвестных T для момента времени τ_{j+1} виду:

$$T_i^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_j} = Fo \cdot (T_{i-1}^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_{j+1}}) + Fo \cdot (T_{i+1}^{\tau_{j+1}} - T_i^{\tau_{j+1}}) + Fo \cdot \frac{\Delta x^2}{\Delta \tau} \cdot qv,$$

(5)

где $Fo = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2}$ – сеточное число Фурье.

Каноническая форма уравнения (5) имеет вид:

$$C_i \cdot T_{i-1}^{\tau_{j+1}} + B_i \cdot T_i^{\tau_{j+1}} + A_i \cdot T_{i+1}^{\tau_{j+1}} + D_i = 0,$$

(6)

где i – номера внутренних узлов сетки по толщине слоя сырья (по оси X), начальное $i = 2$, конечное $i = N - 1$.

Значения коэффициентов уравнения (6) определяются выражениями:

$$\begin{aligned} C_i &= -Fo; \\ B_i &= 1 + 2 \cdot Fo; \\ A_i &= -Fo; \\ D_i &= T_i^{\tau_j} + Fo \cdot \frac{\Delta x^2}{\lambda} \cdot qv. \end{aligned}$$

(7)

Узлы с номерами $i = 1$ и $i = N$ являются граничными. Коэффициенты уравнений (5) для этих узлов определяются из конечно-разностной схемы для граничных условий (2). Величина контрольного объёма для граничного узла меньше в 2 раза, то есть равна $\Delta x/2$, так как узел находится на поверхности слоя. Выражения для контрольного объёма на границах расчётной области имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x \cdot (T_1^{\tau_{j+1}} - T_1^{\tau_j})}{\Delta \tau} &= \alpha_1 \cdot (T_{f1} - T_1^{\tau_{j+1}}) + ql - qw + \lambda \cdot \frac{T_2^{\tau_{j+1}} - T_1^{\tau_{j+1}}}{\Delta x} + qv \cdot \frac{\Delta x}{2}; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x \cdot (T_N^{\tau_{j+1}} - T_N^{\tau_j})}{\Delta \tau} &= \alpha_2 \cdot (T_{f2} - T_N^{\tau_{j+1}}) + ql - qw + \lambda \cdot \frac{T_{N-1}^{\tau_{j+1}} - T_N^{\tau_{j+1}}}{\Delta x} + qv \cdot \frac{\Delta x}{2}. \end{aligned}$$

(8)

Для выражений (7), представленных в каноническом виде, коэффициенты линейных уравнений определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 0; \\
 B_1 &= 1 + 2 \cdot Fo \cdot (1 + Bi_1); \\
 A_1 &= -2Fo; \\
 D_1 &= T_1^{\tau_j} + Qv + Ql - Qw + 2 \cdot Fo \cdot T_{f1} \cdot Bi_1; \\
 C_N &= -2Fo; \\
 B_N &= 1 + 2 \cdot Fo \cdot (1 + Bi_2); \\
 A_N &= 0; \\
 D_N &= T_N^{\tau_j} + Qv + Ql - Qw + 2 \cdot Fo \cdot T_{f2} \cdot Bi_2.
 \end{aligned}$$

(9)

В (9) величины Qv , Ql и Qw связаны с физическими величинами qv , ql и qw соотношениями:

$$\begin{aligned}
 Qv &= Fo \cdot \Delta x^2 \cdot \frac{qv}{\lambda} \cdot \frac{1}{K}; \\
 Ql &= 2 \cdot Fo \cdot \frac{\Delta x}{\lambda} \cdot ql \cdot \frac{1}{K}; \\
 Qw &= 2 \cdot Fo \cdot \frac{\Delta x}{\lambda} \cdot qw \cdot \frac{1}{K}.
 \end{aligned}$$

(10)

где K – единица температурной шкалы Кельвина.

Система линейных уравнений (5) с учётом граничных условий (8) имеет вид:

$$M \cdot T = D$$

(11)

где M – трёхдиагональная матрица размером $(N \times N)$, состоящая из коэффициентов A_i , B_i и C_i ($i = 1..N$); T – вектор размером N , состоящий из значений температур в узлах вычислительной схемы; D – вектор коэффициентов D_i ($i = 1..N$).

Начальными условиями решения системы (11) является заданное начальное распределение температуры в слое сырья $T_i^{\tau=0}$ ($i = 1..N$).

Для решения трёхдиагональной системы линейных уравнений используется метод прогонки. Решением системы является распределение

температуры по толщине слоя сырья в текущий момент времени τ_i . Для расчёта распределения температуры в следующий момент времени τ_{i+1} используется рассчитанное для текущего момента времени τ_i распределение температуры.

В модели величина теплового потока излучения Q_{lr} может быть задана как постоянная или изменяющаяся во времени по периодическому закону или в виде П-образных импульсов, для реализации которых использована функция Хевисайда, позволяющая создавать ступеньку действия теплового потока пропорционально заданному коэффициенту скважности, определяющему долю периода действия теплового излучения. Величина потока теплоты, затраченного на испарение влаги из сырья, Q_{ispr} задана как изменяющаяся во времени по экспоненциальному закону. Снижение плотности сырья ρ задано через изменение сеточного числа Fo .

В модели ограничено действие потока излучения Q_{lr} , если значение температуры в середине слоя сырья превышает заданное значение. Такое ограничение имитирует отключение источника теплового излучения при превышении температуры и включение источника излучения, когда температура в слое сырья станет меньше заданного значения.

Теплота, затраченная на процесс испарения влаги из материала, определяется выражением:

$$qW(\tau) = U(\tau) \cdot Q_p \cdot F, \quad (12)$$

где Q_p – теплота парообразования, Дж/кг; U – интенсивность испарения влаги, кг/(м²·с); F – площадь поверхности испарения, м².

Испарение влаги из сырья приводит к уменьшению массы влаги в сырье или плотности сырья по зависимости

$$\rho(\tau) = \rho(0) \cdot e^{-\varepsilon \cdot \tau}, \quad (13)$$

в которой величина показателя инерции ε равна величине ε в формуле (2).

В соответствии с (13) сеточное число Fo увеличивается в ходе процесса подвода теплоты и испарения влаги по зависимости

$$Fo(\tau) = Fo(0) \cdot (2 - e^{-\varepsilon \cdot \tau}), \quad (14)$$

откуда в соответствии с (10) следует, что величина Q_w постоянная по величине, то есть не зависит от времени.

В свою очередь, величина Ql в ходе процесса подвода теплоты и испарения влаги определяется для случая гармонического изменения потока теплового излучения выражением

$$Ql(\tau) = Ql(0) \cdot (1 + A \cdot \sin(\omega \cdot \tau)) \cdot (2 - e^{-\varepsilon \cdot \tau}), \quad (15)$$

где A – нормированная амплитуда колебаний; ω – частота колебаний, 1/с.

Вариантами моделирования процесса динамической инфракрасной сушки являются:

- поток теплового излучения ql постоянный по величине, температура сырья ограничена заданными величинами t и Δt ;
- поток теплового излучения ql изменяется по гармоническому закону от нулевого значения до заданной величины, температура сырья ограничена заданными величинами t и Δt .
- поток теплового излучения ql изменяется периодически импульсами с заданной величиной скважности от нулевого значения до заданной величины, температура сырья ограничена заданными величинами t и Δt .

Заключение

Таким образом, имитационная модель нагрева влажного сырья в ходе сушки и позволяет исследовать характер изменения температуры слоя сырья в условиях нестационарного комбинированного теплообмена, в

котором источниками и стоками тепловой энергии являются тепловое излучение, конвективная теплоотдача и затраты энергии на испарение влаги из сырья.

Преимуществами модели являются её компактность и малое вычислительное время, позволяющие анализировать результаты моделирования большого количества вариантов процесса динамического нагрева влажного сырья при различных условиях динамического теплового воздействия на сырьё.

Недостатками модели являются её ограничения, а также отсутствие описания сопряжённого с процессом подвода теплоты к сырью процесса удаления из него влаги. Учёт испарения влаги в модели осуществляется заданием характера убыли влаги в сырье в ходе процесса подвода теплоты. Для задания характера убыли влаги могут быть использованы аналитически зависимости убыли влаги от времени наблюдаемого процесса. При задании характера убыли влаги и численных значений параметров процесса влагоудаления следует опираться на экспериментальные зависимости убыли влаги в высушиваемом влажном сырье для сходных условий подвода тепловой энергии излучением.

Благодарности

Работа выполнена в рамках исполнения гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-1700.2021.5, соглашение № 075-15-2021-179).

Литература

1. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2009. – 478 с.: ил. – (Учебники и учебн. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
2. Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуев Н.А. Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 6. С. 641 – 647.

3. Рудобашта, С.П. Тепломассоперенос при сушке цилиндрического тела в осциллирующем электромагнитном поле / С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, Э.М. Карташов // ИФЖ. – 2018. – Т. 91. – № 1. – С. 241–251.

4. Завалий А. А. Расчётное моделирование процесса динамической инфракрасной сушки в многоярусном шкафовом устройстве / А. А. Завалий, Д. В. Ермолин. М. А. Сергеев // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2021. – № 27 (190). – С. 76 – 86.

5. Завалий А. А. Имитационная полуэмпирическая модель процесса сушки растительного сырья при комбинированном конвективно-лучистом теплоподводе в условиях атмосферного и пониженного давления / А.А. Завалий, Л.А. Лаго, А.С. Рыбалко // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2020. № 23 (186). С. 130-140.

6. Солодов А.П. Электронный курс теплообмена // Открытое образование. 2013. № 1 (96). С. 8 – 16.

7. Солодов А.П. Электронный курс. Тепломассообмен в энергетических установках. [Электронный ресурс]. – URL: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/index.htm (дата обращения: 25.11.2021).

8. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Мальцева Т.А. Куликова Н.А., Угрехелидзе Н.Т. Анализ влияния СВЧ-обработки на содержание незаменимых аминокислот в комбикормах / сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2020») / ООО «ДГТУ-ПРИНТ» / С.34-37. DOI: 10.23947/itno.2020.34-37

9. Pakhomov V., Rudoy, D., Maltseva T., Kulikova N., Ugrekheldze N., Enalyeva L., Babajanyan A. Analysis of the micronization process effect on the amino acid composition in compound feed. E3S Web of Conferences 210, 07003 (2020) ITESE-2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021006012>

10. Antipov S., Klyuchnikov A., Pribytkov A., Rudoy D. Hydrodynamic Aspects of Drying Brewer's Grains in a Suspended Bed. Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS), volume 246, pp 33-40 (2022). doi: 10.1007/978-3-030-81619-3_4.

11. Sergeev M., Yermolin D., Zavaliy A., Yermolina G., and Rudoy D. Research on phenol complex infrared dried grape pomace. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022097. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022097

12. Rudoy D., Pahomow V., Malceva T., Sarkisian D., and Saakian S. Overview of methods of wheat grain conservation in early stages of ripeness. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022113. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022113

13. Petković M., Lukyanov A., Rudoy D., Kurubić V., Đurović I., Miletić N., Safarov J. Potato thin layer convective dehydration model and energy efficiency estimation. E3S Web of Conferences 273, 07028 (2021) doi: 10.1051/e3sconf/202127307028

14. Zavaliy, A., Volozhaninov, S., Shiian, O., Rudoy, D., Olshevskaya, A. Load and thermal characteristics of a conveyor device for infrared drying and cleaning seeds. E3S Web of Conferences, 175, 05003 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505003>

References

1. Rudobashta S.P., Kartashov Je.M. Diffuzija v himiko-tehnologicheskikh processah. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: KolosS, 2009. – 478 s.: il. – (Uchebniki i uchebn. posobija dlja studentov vyssh. ucheb. zavedenij).

2. Rudobashta S.P., Kartashov Je.M., Zuev N.A. Teplomassoperenos pri sushke v oscillirujushhem jelectromagnitnom pole // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. 2011. T. 45, № 6. S. 641 – 647.

3. Rudobashta, S.P. Teplomassoperenos pri sushke cilindricheskogo tela v oscillirujushhem jelectromagnitnom pole / S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, Je.M. Kartashov // IFZh. – 2018. – T. 91. – № 1. – S. 241–251.

4. Zavalij A. A. Raschjotnoe modelirovanie processa dinamicheskoy infrakrasnoj sushki v mnogojarusnom shkafnom ustrojstve / A. A. Zavalij, D. V. Ermolin. M. A. Sergeev // Izvestija sel'skohozjajstvennoj nauki Tavridy. – 2021. – № 27 (190). – S. 76 – 86.

5. Zavalij A. A. Imitacionnaja polujempiricheskaja model' processa sushki rastitel'nogo syr'ja pri kombinirovannom konvektivno-luchistom teplopodvode v uslovijah atmosfernogo i ponizhennogo davlenija / A.A. Zavalij, L.A. Lago, A.S. Rybalko // Izvestija sel'skohozjajstvennoj nauki Tavridy. 2020. № 23 (186). S. 130-140.

6. Solodov A.P. Jelektronnyj kurs teploobmena // Otkrytoe obrazovanie. 2013. № 1 (96). S. 8 – 16.

7. Solodov A.P. Jelektronnyj kurs. Teplomassoobmen v jenergeticheskikh ustanovkah. [Jelektronnyj resurs]. – URL: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/index.htm (data obrashhenija: 25.11.2021).

8. Pahomov V.I., Rudoj D.V., Mal'ceva T.A. Kulikova N.A., Ugrehelidze N.T. Analiz vlijanija SVCh-obrabotki na sodержanie nezamenimyh aminokislot v kombikormah / sbornik nauchnyh trudov VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovacionnye tehnologii v nauke i obrazovanii (Konferencija «ITNO 2020») / ООО «DGTU-PRINT» / S.34-37. DOI: 10.23947/itno.2020.34-37

9. Pakhomov V., Rudoy, D., Maltseva T., Kulikova N., Ugrekhelidze N., Enalyeva L., Babajanyan A. Analysis of the micronization process effect on the amino acid composition in compound feed. E3S Web of Conferences 210, 07003 (2020) ITESE-2020 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021006012>

10. Antipov S., Klyuchnikov A., Pribytkov A., Rudoy D. Hydrodynamic Aspects of Drying Brewer's Grains in a Suspended Bed. Lecture Notes in Networks and Systems book series (LNNS), volume 246, pp 33-40 (2022). doi: 10.1007/978-3-030-81619-3_4.

11. Sergeev M., Yermolin D., Zavalij A., Yermolina G., and Rudoy D. Research on phenol complex infrared dried grape pomace. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022097. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022097

12. Rudoy D., Pahomov V., Malceva T., Sarkisian D., and Saakian S. Overview of methods of wheat grain conservation in early stages of ripeness. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 022113. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022113

13. Petković M., Lukyanov A., Rudoy D., Kurčić V., Đurović I., Miletić N., Safarov J. Potato thin layer convective dehydration model and energy efficiency estimation. E3S Web of Conferences 273, 07028 (2021) doi: 10.1051/e3sconf/202127307028

14. Zavalij, A., Volozhaninov, S., Shian, O., Rudoy, D., Olshevskaya, A. Load and thermal characteristics of a conveyor device for infrared drying and cleaning seeds. E3S Web of Conferences, 175, 05003 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505003>