

## Моделирование процесса сушки вторичных продуктов разделки рыб и описание в модели основных процессов тепло- и влагопереноса

Ольга П. Дворянинова <sup>1</sup>

Александр В. Соколов <sup>1</sup> sokol993@yandex.ru

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Эффективность сушки во многом определяется возможностью оперативного управления этим процессом и поддержания режимных параметров на заданном уровне. В основе любой системы управления лежит математическое описание процесса. В работе рассмотрен процесс сушки вторичных продуктов разделки рыб, как объект возможного моделирования и математического описания сложных физических явлений тепло- и влагопереноса. Для моделирования процессов тепло- и влагопереноса используется метод, базирующийся на основе общепринятых уравнений тепло- и влагопереноса А.В. Лыкова. Для удобства моделирования и многократного проведения компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа «Программа для моделирования сушки продуктов из рыбы с дополнительным СВЧ-нагревом» на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7. Программа предназначена для моделирования процесса сушки продуктов из рыбы путем решения задачи тепло- и влагопереноса на кубической сетке с учетом комбинированной технологии нагрева (конвективный и СВЧ-нагрев). Программа может использоваться для оптимизации режимов сушки и параметров СВЧ-источника. В тексте программы могут быть заданы теплофизические параметры для решения задачи тепло- и влагопереноса, геометрические параметры и структура частей рыбы, параметры СВЧ-источника. В процессе компьютерного эксперимента по сушке продуктов из рыбы программа регулярно выводит на экран компьютера графики и картограммы пространственного распределения влажности и температуры. Основные технические характеристики программы: количество узлов сетки для решения задачи тепло- и влагопереноса: 50x50x40; ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента около 5 мин.

**Ключевые слова:** модель, сушка, рыбный продукт

## Simulation of drying process of secondary products of fish cutting and description of the main processes of heat and moisture transfer in the model

Olga P. Dvoryaninova <sup>1</sup>

Aleksandr V. Sokolov <sup>1</sup> sokol993@yandex.ru

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** The effectiveness of drying is largely determined by the ability to quickly manage this process and maintain the regime parameters at a given level. At the heart of any control system is a mathematical description of the process. The paper discusses the process of drying secondary products of fish cutting, as an object of possible modeling and mathematical description of complex physical phenomena of heat and mass transfer. To simulate the processes of heat and moisture transfer, a method based on the generally accepted equations of heat and moisture transfer A.V. Lykova is used. For the convenience of modeling and repeated computer experiments, the computer program "Program for modeling the drying of fish products with additional microwave heating" in the language of Object Pascal in the integrated programming environment Borland Delphi 7 was developed. The program is designed to simulate the drying process of fish products by solving the problem of heat - and moisture transfer on a cubic grid, taking into account the combined heating technology (convective and microwave heating). The program can be used to optimize the drying modes and parameters of the microwave source. In the text of the program, the thermophysical parameters can be given to solve the problem of heat and moisture transfer, the geometric parameters and structure of the fish parts, the parameters of the microwave source. In the process of computer experiment on drying products from fish, the program regularly displays on the computer screen the graphs and cartograms of the spatial distribution of humidity and temperature. The main technical characteristics of the program: the number of grid nodes for solving the problem of heat and moisture transfer: 50 x 50 x 40; the approximate time of one computer experiment is about 5 minutes.

**Keywords:** model, drying, fish product

Для цитирования

Дворянинова О.П., Соколов А.В. Моделирование процесса сушки вторичных продуктов разделки рыб и описание в модели основных процессов тепло- и влагопереноса // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 125–129. doi:10.20914/2310-1202-2018-2-125-129

For citation

Dvoryaninova O.P., Sokolov A.V. Simulation of drying process of secondary products of fish cutting and description of the main processes of heat and moisture transfer in the model. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 125–129 (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-2-125-129

Сушка – это процесс удаления влаги из твердого или пастообразного материала путем испарения содержащейся в нем жидкости за счет подведенного к материалу тепла. Целью сушки является улучшение качества материала (снижение его объемной массы, повышение прочности) и, в связи с этим, увеличение возможностей его использования.

Сушка характеризуется различной интенсивностью перемещения влаги внутри материала (влагопроводность) и последующего ее испарения с поверхности (влагообмен). Главная трудность сушильного процесса заключается в перемещении влаги из средней зоны сортамента. Эффективность сушки во многом определяется возможностью оперативного управления этим процессом и поддержания режимных параметров на заданном уровне [1–2].

В основе любой системы управления лежит математическое описание процесса. В работе рассмотрен процесс сушки вторичных продуктов разделки рыб, как объект возможного моделирования и математического описания сложных физических явлений тепло-массопереноса.

Для моделирования процессов тепло- и влагопереноса используется метод, базирующийся на основе общепринятых уравнений тепло- и влагопереноса А.В. Лыкова. Уравнения сушки капиллярно-пористого тела в векторной форме могут быть записаны следующим образом [3, 5]:

$$\begin{cases} C_s \frac{\partial T}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - C(D \nabla W + D_T \nabla T) \nabla T + Q_{СВЧ}(W, T); \\ (1 - \varepsilon) \frac{\partial W}{\partial t} = \nabla(D \nabla W) + \nabla(D_T \nabla T), \end{cases} \quad (1)$$

где  $C_s$  – теплоемкость среды;  $T$  и  $W$  – температура и влажность;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения жидкости в пар, определяемый как отношение изменения влагосодержания посредством испарения и конденсации к изменению влагосодержания за счет переноса жидкости;  $\nabla = \partial/\partial x_i + \partial/\partial y_j + \partial/\partial z_n$  – дифференциальный оператор набла;  $\lambda$  – локальный коэффициент теплопроводности;  $C$  – теплоемкость жидкости;  $D$ ,  $D_T$  – коэффициенты, характеризующие данное пористое тело и определяемые эмпирически;  $Q_{СВЧ}$  – теплота, выделяющаяся в среде под действием СВЧ-излучения.

Уравнения (1) для процесса сушки частей рыбы являются чрезвычайно сложными и не допускают аналитического решения путем

введения сколько-нибудь обоснованных допущений, так как большинство переменных в уравнениях являются функциями как координат, так и времени (рисунок 1):  $T(x, y, z, t)$ ;  $W(x, y, z, t)$ ;  $C_s(x, y, z, t)$ ;  $C(x, y, z, t)$ ;  $\varepsilon(x, y, z, t)$ ;  $\lambda(x, y, z, t)$ ;  $D(x, y, z, t)$ ;  $D_T(x, y, z, t)$ ;  $Q_{СВЧ}(x, y, z, t)$ . Поэтому в данной работе обсуждаемые уравнения решаются с использованием численных конечно-разностных методов на кубической сетке, которой покрывается исследуемая часть рыбы (голова, кости и т. п.) в модели. В обоих случаях каждый узел  $(i, j, k)$  продукта из рыбы и окружающей среды характеризуется температурой  $T_{i,j,k}$  и содержанием влаги  $W_{i,j,k}$ .

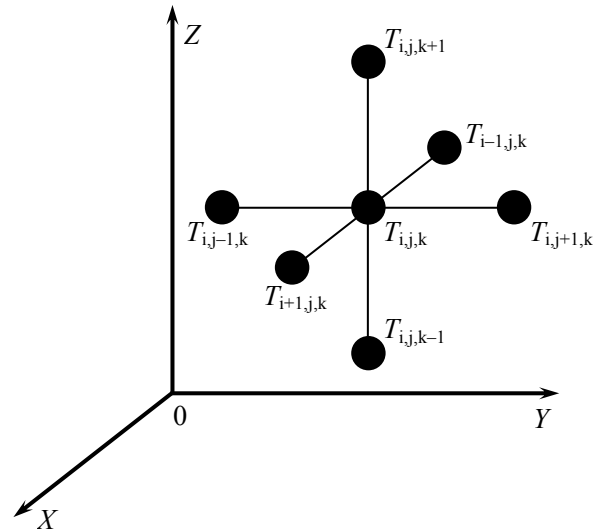


Рисунок 1. Схема индексации узлов сетки к расчету тепло- и влагопереноса

Figure 1. The scheme of indexing grid nodes to the calculation of heat and moisture transfer

В упрощенной конечно-разностной (сеточной) постановке задачи уравнение (2) преобразуется следующим образом. На каждом шаге интегрирования  $\tau$  рассчитывается новое значение температуры и содержания влаги узла  $(i, j, k)$ , по следующим итерационным формулам

$$\frac{T_{i,j,k}^{\tau+1} - T_{i,j,k}^{\tau}}{\Delta t} = \frac{\chi_{i,j,k}}{h} \times \left( \begin{aligned} &T_{i+1,j,k}^{\tau} + T_{i-1,j,k}^{\tau} + \\ &+ T_{i,j+1,k}^{\tau} + T_{i,j-1,k}^{\tau} + \\ &+ T_{i,j,k+1}^{\tau} + T_{i,j,k-1}^{\tau} - 6T_{i,j,k}^{\tau} \end{aligned} \right) + Q_{i,j,k}^{СВЧ} \quad (2)$$

$$\frac{W_{i,j,k}^{\tau+1} - W_{i,j,k}^{\tau}}{\Delta t} = \frac{D^0}{h} e^{k_D(T_{i,j,k}^{\tau})} \times \left( W_{i+1,j,k}^{\tau} + W_{i-1,j,k}^{\tau} + W_{i,j+1,k}^{\tau} + W_{i,j-1,k}^{\tau} + W_{i,j,k+1}^{\tau} + W_{i,j,k-1}^{\tau} - 6W_{i,j,k}^{\tau} \right) \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – шаг интегрирования по времени;  $D^0$  – коэффициент диффузии влаги при комнатной температуре;  $k_D$  – коэффициент экспоненциального роста коэффициента диффузии;  $\chi$  – коэффициент температуропроводности.

К настоящему времени относительно хорошо изучена зависимость коэффициента температуропроводности различных частей рыбы от влажности и температуры. Поэтому в настоящей работе использованы зависимости  $\chi(W, T)$  из справочника. Так, например, для мяса рыбы может быть использована зависимость

$$\chi(W, T) = 2,49 \cdot 10^{-7} - 5,9 \cdot 10^{-10} W + 2,7 \cdot 10^{-9} (T - 273), \quad (4)$$

где влажность  $W$  измеряется в процентах, температура  $T$  – в Кельвинах, коэффициент температуропроводности в  $m^2/c$ .

Постепенно в модели температура и влагосодержание каждого узла изменяются. Узлы, контактирующие с окружающим воздухом способны обмениваться теплом и влагой не только с соседними узлами, но также и с узлами окружающей газовой среды. В этом случае переход тепла и влаги из граничных узлов в окружающую среду рассчитывается по тем же итерационным формулам, однако, с различными параметрами  $\chi$  и  $D^0$  для соседних узлов

В модели принято допущение, что СВЧ-излучение распределено равномерно в пространстве, а тепловыделение в узлах тканей рыбы монотонно увеличивается с увеличением влажности в данном узле, так как с увеличением влажности увеличивается электропроводность вещества. Поэтому количество теплоты, выделяющееся в узле  $(i, j, k)$  за счет СВЧ-излучения рассчитывается в модели следующим образом.

$$Q_{i,j,k}^{СВЧ} = \frac{P_{i,j,k}}{c_{i,j,k} m_{i,j,k}} = \frac{P}{c_{i,j,k} m_{i,j,k}}, \quad (5)$$

где  $P_{i,j,k}$  – мощность, подводимая к узлу  $(i, j, k)$ ;  $c_{i,j,k}$  и  $m_{i,j,k}$  – удельная теплоемкость и масса узла

$(i, j, k)$ ;  $P$  – мощность СВЧ-печи; суммирование в формуле производится по всем узлам сетки.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от существующих научных работ по сушке рыбы и продуктов из нее, в настоящей работе уравнения сушки решаются с высокой пространственной детализацией (учитывается структура частей рыбы) и временной детализацией (основные функции и коэффициенты уравнений зависят от положения в пространстве  $\vec{r}$  и от времени  $t$ ) [4, 6].

По общепринятой классификации, предлагаемая модель является алгоритмической, но не аналитической. Это означает, что выходные характеристики модели рассчитываются по входным не путем аналитических преобразований, которые не применимы для дискретных систем, в частности системы пузырьков, а путем дискретизации (пространственной и временной) и соответствующего алгоритма расчета [7–10].

Расчет по приведенным выше формулам является довольно громоздким и включает в себя три цикла, вложенных один в другой: по номеру компьютерного эксперимента, по номеру временного шага и по номеру узла.

Для удобства моделирования и многократного проведения компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа «Программа для моделирования сушки продуктов из рыбы с дополнительным СВЧ-нагревом» на языке ObjectPascal в интегрированной среде программирования BorlandDelphi 7. Программа предназначена для моделирования процесса сушки продуктов из рыбы путем решения задачи тепло- и влагопереноса на кубической сетке с учетом комбинированной технологии нагрева (конвективный и СВЧ-нагрев).

Программа может использоваться для оптимизации режимов сушки и параметров СВЧ-источника. В тексте программы могут быть заданы теплофизические параметры для решения задачи тепло- и влагопереноса, геометрические параметры и структура частей рыбы, параметры СВЧ-источника. В процессе компьютерного эксперимента по сушке продуктов из рыбы программа регулярно выводит на экран компьютера графики и картограммы пространственного распределения влажности и температуры (рисунок 2).

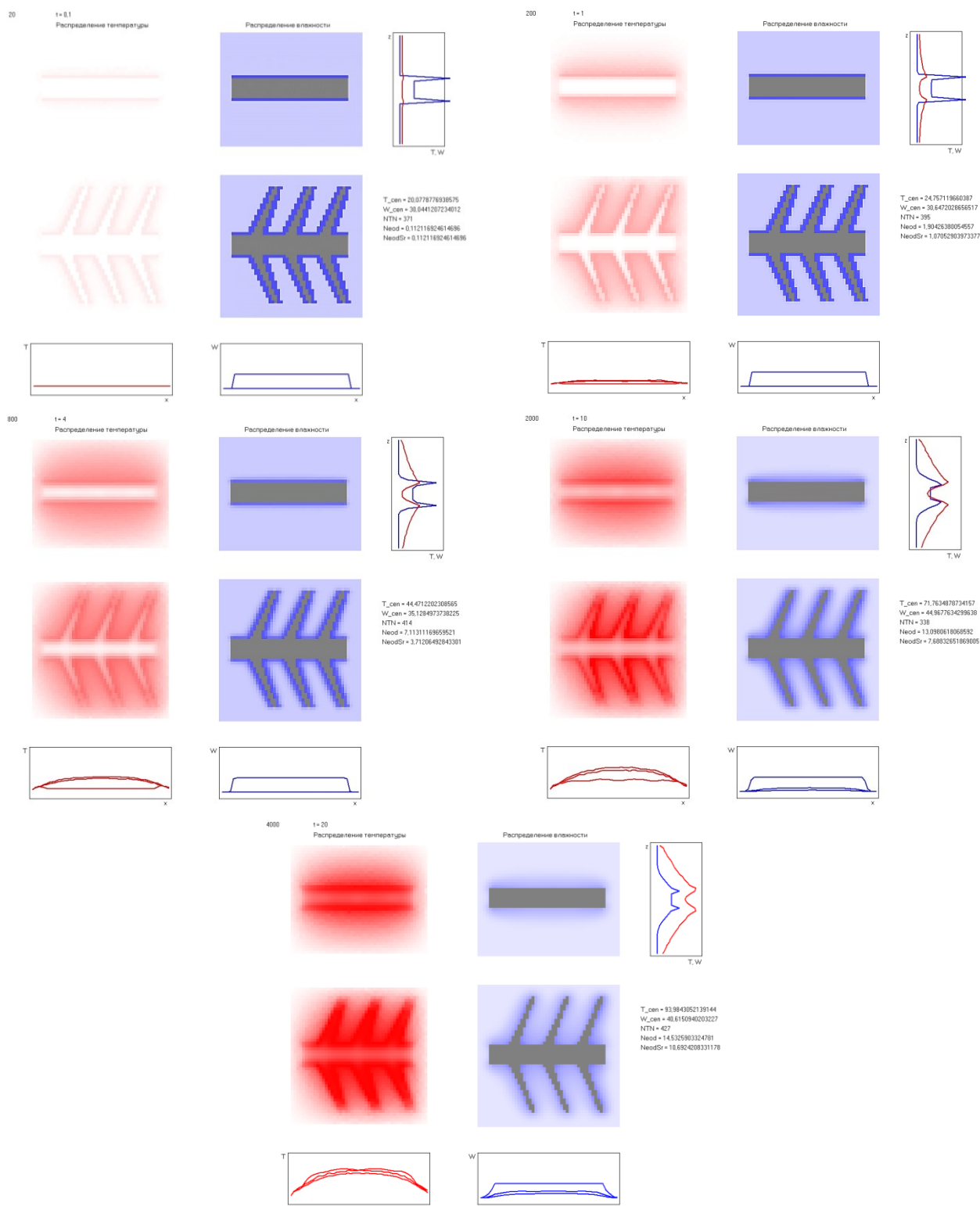


Рисунок 2. Вывод на экран компьютера результатов решения задачи тепло- и влагопереноса в разработанной программе

Figure 2. Output on the computer screen the results of solving the problem of heat and moisture transfer in the developed program

Основные технические характеристики программы:

— количество узлов сетки для решения задачи тепло- и влагопереноса: 50 x 50 x 40;

— ориентировочное время проведения одного компьютерного эксперимента около 5 мин (при тактовой частоте процессора 3 ГГц).

## ЛИТЕРАТУРА

1 Ершов М.А., Ершов А.М., Гроховский В.А. Расчет процессов релаксации при обезживании рыбы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 3. С. 37–43.

2 Кретов И.Т., Шашкин А.И., Шахов С.В., Черных В.Б. и др. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки пищевых продуктов в поле СВЧ. // Известия вузов. Пищевая технология. 2003. № 5–6. С. 65–68.

3 Антипов С.Т., Шахов А.С. Моделирование процесса вакуум-сублимационной сушки гранулированных продуктов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 3 (69). С. 56–60.

4 Антипова Л.В., Дворянинова О.П., Соколов А.В., Прибытков А.В. и др. Подбор сырьевой композиции и исследование процесса конвективной сушки продуктов глубокой переработки рыб при производстве сухих основ для бульонов // Рыбное хозяйство. 2014. № 5. С. 96–99.

5 Пат. № 2501490 Российская Федерация, МПК А23L1/326. Способ получения сухой основы для бульонов, супов и соусов быстрого приготовления из малоценных продуктов разделки прудовых рыб / Антипова Л.В., Дворянинова О.П., Данылиев М.М. и др. Заявл. 15.07.2011; Оpubл. 20.12.2013, Бюл. № 35. 7 с.

6 Антипова Л.В., Воронцова Ю.Н., Баранов А.Ю., Буданцев Е.В. Сушка малоценных продуктов разделки рыб при производстве сухих основ для бульонов, супов и соусов быстрого приготовления // Вестник ВГУИТ. 2012. № 3. С. 12 – 16.

7 Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modelling and simulation of drying phenomena with rheological behaviour // Braz. J. Chem. Eng. 2005. V. 22. № 2. P. 153–163.

8 Hubackova A. et al. Development of solar drying model for selected Cambodian fish species // The Scientific World Journal. 2014.

9 Raffray G., Sebastian P., Collignan A. Simulation model for the optimization of a radiant plate hot-smoking process // Journal of Food Engineering. 2015. V. 147. P. 56–67.

10 Ngo V. T. N. et al. Application of the Box-Behnken Model Design to the Optimization of Process Parameters in the Convection-Drying // AETA 2017-Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application. 2017. V. 465. P. 83.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ольга П. Дворянинова** д.т.н., профессор, кафедра управления качеством и машиностроительных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Александр В. Соколов** к.т.н., доцент, кафедра управления качеством и машиностроительных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, sokol993@yandex.ru

## КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 01.03.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 02.04.2018

## REFERENCES

1 Ershov M.A., Ershov A.M., Grokhovsky V.A. Calculation of relaxation processes in the dehydration of fish. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of Voronezh State University of Engineering Technology] 2016. no. 3. pp. 37–43. (in Russian)

2 Kretov I.T., Shashkin A.I., Shakhov S.V., Chernykh V.B. et al. Modeling the process of vacuum-sublimation drying of food products in the microwave field. *Izvestiya vuzov* [Proceedings of universities. Food technology] 2003. no. 5–6. pp. 65–68. (in Russian)

3 Antipov S.T., Shakhov A.S. Modeling of the process of vacuum-freeze drying of granular products. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies] 2016. no. 3 (69). pp. 56–60. (in Russian)

4 Antipova L.V., Dvoryaninova O.P., Sokolov A.V., Pribytkov A.V. Selection of a raw composition and study of the process of convective drying of products of deep processing of fish in the production of dry bases. *Rybnoe khozyaistvo* [Fishery] 2014. no. 5. pp. 96–99. (in Russian)

5 Antipova L.V., Dvoryaninova O.P., Danyliiv M.M. Sposob ppolucheniya sukhoi osnovy dlya bul'ona [A method for obtaining a dry basis for broths, soups and quick-cooking sauces from low-value products of cutting pond fish] Patent RF, no. 2501490, 2013. (in Russian)

6 Antipova L.V., Vorontsova Yu.N., Baranov A.Yu., Budantsev E.V. Drying of low-value fish cutting products in the production of dry bases for broths, soups and instant sauces. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies] 2012. no. 3. pp. 12 - 16. (in Russian)

7 Chemkhi S., Zagrouba F., Bellagi A. Modelling and simulation of drying phenomena with rheological behavior. *Braz. J. Chem. Eng.* 2005. vol. 22. no. 2. pp. 153–163.

8 Hubackova A. et al. Development of solar drying model for selected Cambodian fish species. *The Scientific World Journal.* 2014.

9 Raffray G., Sebastian P., Collignan A. Simulation model for the optimization of a radiant plate hot-smoking process. *Journal of Food Engineering.* 2015. vol. 147. pp. 56–67.

10 Ngo V. T. N. et al. Application of the Box-Behnken Model Design to the Optimization of Process Parameters in the Convection-Drying. *AETA 2017-Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences: Theory and Application.* 2017. vol. 465. pp. 83.

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Olga P. Dvoryaninova** Dr. Sci. (Engin.), professor, quality management and engineering technologies department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Aleksandr V. Sokolov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, quality management and engineering technologies department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, sokol993@yandex.ru

## CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 3.1.2018

ACCEPTED 4.2.2018