

УДК 663.52, 664.647.3

Профессор А.А. Шевцов, аспирант А.С. Муравьев

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств.

тел. +7(473)255-38-51

E-mail: 79204104299@ya.ru

Professor A.A. Shevtsov, , post-graduate A.S. Muravev

(Voronezh state university of engineering technologies) Department of technology of bread, confectionary, pasta and grain production department.

phone +7(473)255-38-51

E-mail: 79204104299@ya.ru

## Модельные представления процесса распылительной сушки фильтрата спиртовой барды на основе уравнений Навье–Стокса

### Model representation of the spray drying process of the distillery stillage filtrate based on Navier-Stokes equations

*Реферат.* Распылительная сушка растворов и суспензий является одним из наиболее распространенных методов производства широкого спектра порошкообразных продуктов в химической, пищевой и фармацевтической промышленности. Для сушки термочувствительных материалов, к которым в полной мере относится фильтрат барды, рассматривается прямоточный тип контакта сушильного агента и капель раствора. Применялось двухфазное моделирование методом вычислительной гидродинамики в стационарном состоянии для изучения процесса сушки фильтрата барды в экспериментальной распылительной сушилке при следующих допущениях: компоненты образуют идеальную смесь, свойства которой рассчитывались непосредственно из свойств компонентов и их пропорций; капли представлялись в сферической форме; плотность и удельная теплоемкость раствора и коэффициент диффузии паров в газовой фазе оставались неизменными. Для решения уравнений теплообмена между сушильным агентом и каплями методом конечных объемов использовался пакет программного обеспечения ANSYS CFX. Связь между двумя фазами устанавливалась уравнениями Навье–Стокса. Непрерывная фаза (капли фильтрата) описывалась k-ε моделью турбулентности. Полученные результаты показали, что взаимодействие «капля–стенка» вызывает значительные изменения скорости, температуры и влажности как сушильного агента, так и частиц продукта. Зависимость физических параметров процесса сушки от геометрических размеров сушилки позволили установить поведение частиц при распылении, столкновении со стенками и осаждении готового продукта. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показали удовлетворительное сходжение результатов: для температуры порошка 10 % его влажности 12 % и температуры отработанного сушильного агента на выходе из сушилки 13 %. Показана возможность использования модели при проектировании распылительных сушилок и управления параметрами в процессе сушки.

*Summary.* Spray drying of solutions and suspensions is among the most common methods of producing a wide range of powdered products in chemical, food and pharmaceutical industries. For the drying of heat-sensitive materials, which is fully applicable to the distillery stillage filtrate continuous-flow type of contact of drying agent and the solution droplets is examined. Two-phase simulation method of computational hydrodynamics in a stationary state for studying the process of drying of the distillery stillage filtrate in the pilot spray dryer under the following assumptions was used. The components form an ideal mixture, the properties of which are calculated directly from the properties of the components and their proportions. The droplets were presented in spherical form. The density and specific heat of the solution and the coefficient of vapors diffusion in the gas phase remained unchanged. To solve the heat exchange equations between the drying agent and the drops by the finite volume method the software package ANSYS CFX was used. The bond between the two phases was established by Navier-Stokes equations. The continuous phase (droplets of the distillery stillage filtrate) was described by the k-ε turbulence model. The results obtained showed that the interaction of "drop-wall" causes a significant change of velocity, temperature and humidity both of a drying agent and the product particles. The behavior of the particles by spraying, collision with walls and deposition of the finished product allowed to determine the dependence of physical parameters of the drying process, of the geometric dimensions of the dryer. Comparison of simulation results with experimental data showed satisfactory convergence of the results: for the temperature of the powder 10% its humidity of 12% and temperature of the spent drying agent at the outlet from the drier of 13%. The possibility of using the model in the spray dryers designing, and control of the drying process is shown.

*Ключевые слова:* моделирование, фильтрат барды, распылительная сушка, уравнения Навье–Стокса, вычислительная гидродинамика.

*Keywords:* modeling, distillery stillage filtrate, spray drying, Navier-Stokes equations, computational hydrodynamics.

Распылительная сушка растворов или суспензий является одним из наиболее распространенных методов производства широкого спектра порошкообразных продуктов в химической, пищевой и фармацевтической промышленности. В сушильных башнях распылительных сушилок контакт между каплей и тепловым агентом осуществляется прямоточно или противоточно. Наиболее предпочтительным для сушки термочувствительных материалов, таких как фильтрат барды, является прямоточный тип. Тепловой агент вступает в контакт с каплями в верхней части башни, где они имеют максимальную влажность при температуре мокрого термометра, при этом агент теряет большую часть тепла испаряя влагу.

Разработке математических моделей процесса распылительной сушки посвящены ряд работ отечественных [1–3] и зарубежных [4, 5] авторов. Однако, моделирование представляет собой сложную задачу процесса теплоотдачи при сушке капель жидкости. Помимо этого, следует учитывать ряд взаимодействий между самими каплями (слияние капель, агломерации и разрушение); между каплями и стенками при осаждении капель на стенках. Из-за сложности этих взаимодействий моделирование распылительной сушки проводится на основе теории вычислительной гидродинамики (CFD) [6].

Экспериментальная часть работы выполнялась на экспериментальной распылительной установке (рисунок 1).

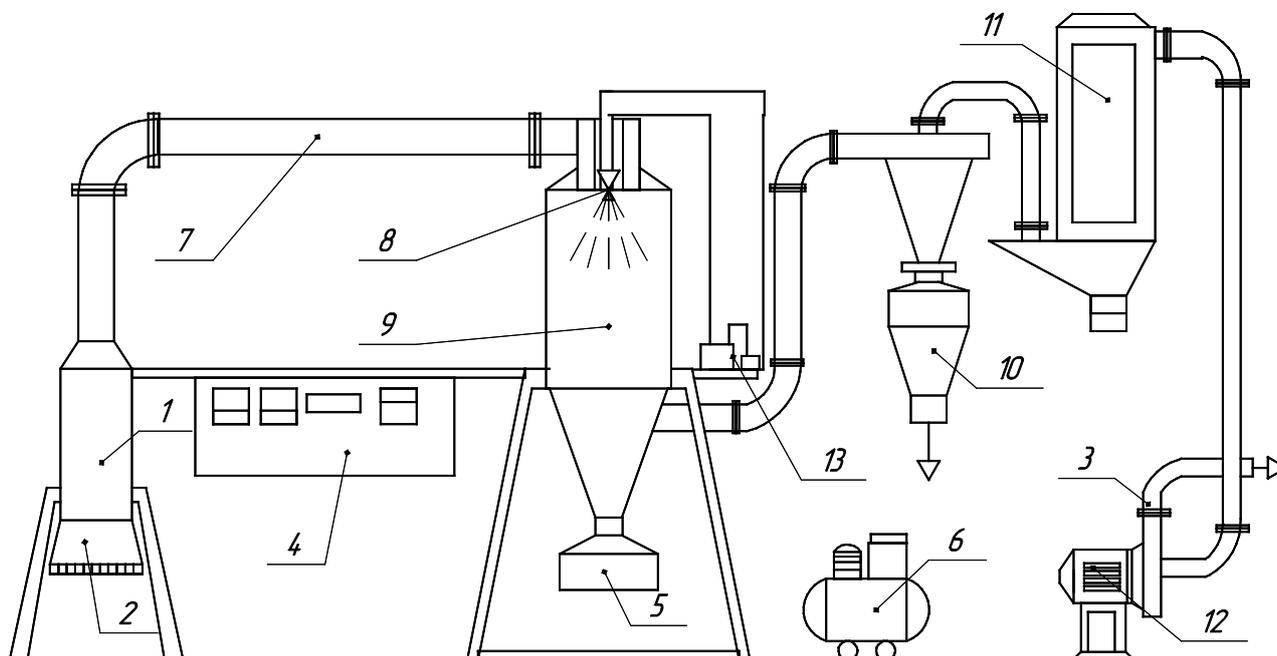


Рисунок 1. Схема лабораторной распылительной установки

Сушильный агент, посредством вентилятора 12, забирается из окружающей среды, очищается в воздушном фильтре 2, нагревается в калорифере 1 и по трубопроводу греющего агента 7 подается в камеру распыления 9. Одновременно, насосом 13 распыливаемый фильтрат барды подается в форсунку 8, которая создает равномерный факел распыла по сечению камеры и где контактирует с сушильным агентом с температурой 373–393 К. Высушенный продукт отводится в сборник 5, отработанный сушильный агент подвергается очистке от взвешенных частиц в циклоне 10 и через контрольную камеру 11 отводится в атмосферу.

В течение процесса сушки контролировалась температура на входе и выходе распылительной

сушилки. Визуально через смотровое окно, оценивалось качество получаемого порошка.

Цилиндро-коническая распылительная сушилка с техническими параметрами (см. таблицу 1) изображена на рисунок 2.

Таблица 1

Параметры сушки

Параметр	Значение	Ед. изм.
Температура воздуха на входе в распылительную сушилку	373–393	К
Температура воздуха на выходе из распылительной сушилки	50	К
Расход жидкости на распыление	$9,6 \times 10^{-4}$	м <sup>3</sup> /ч
Давление сжатого воздуха	150	кПа
Расход сушильного агента	30	м <sup>3</sup> /ч
Время сушки	3-10	с
Дисперсность готового продукта	0,2-1	мм

Система уравнений, решаемых в программе ANSYS CFX представлена в виде нестационарных уравнений Навье-Стокса в неразрывном виде.

Мгновенные уравнения массы, момента и энергии для многокомпонентной системы можно записать в общем виде:

для массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (1)$$

для момента:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \times v) = -\nabla p + \nabla \sigma + S_M, \quad (2)$$

и для энергии:

$$\frac{\partial(\rho J)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v J) = \nabla(L \nabla T) + \nabla(v \sigma) + v S_M, \quad (3)$$

тензор напряжения  $\sigma$  в уравнении (2):

$$\sigma = \mu \left( \nabla v + (\nabla v)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla v \right), \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность компонента системы, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $v$  – скорость потока, м/с;  $J$  – энтальпия при постоянном давлении, кДж;  $L$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $T$  – температура, К;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\delta$  – толщина граничного слоя, м;  $\nabla(v \sigma)$  в уравнении (3) определяет вязкость;  $v S_m$  – работа внешних сил (не учитывается);  $T_n$  – вектор напряжения.

Для двухкомпонентной смеси, состоящей из капель фильтрата барды ( $i$ ) и сушильного агента ( $j$ ) (члены уравнения без индексации относятся к смеси в целом), уравнения переноса решаются в зависимости от скорости, давления, температуры и других свойств компонентов.

В скалярном виде они представлены следующим образом.

для массы:

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}_i \tilde{v}_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (5)$$

для массовой доли:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_i \tilde{Y}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}_i \tilde{v}_j \tilde{Y}_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right), \quad (6)$$

где  $x$  – горизонтальная координата;  $Y$  – массовая доля компонента;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Для упрощения решения задачи (1) – (6) принималось, что компоненты образуют идеальную смесь, свойства которой рассчитывались непосредственно из свойств компонентов

и их пропорций. Дополнительные упрощения: капли имеют сферическую форму, плотность и удельная теплоемкость раствора и коэффициент диффузии паров в газовой фазе усреднены остаются постоянными.

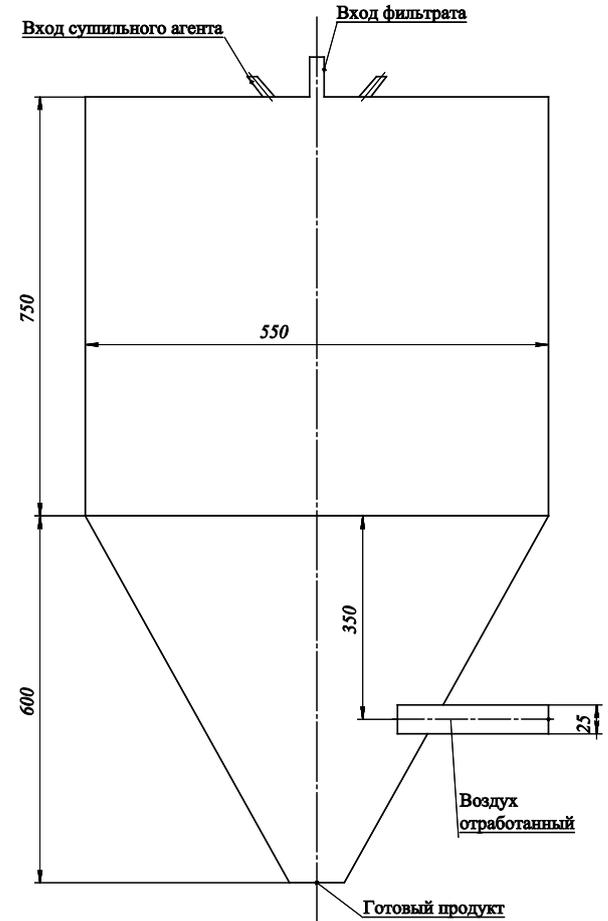


Рисунок 2. Распылительная сушилка

При решении такого рода задач, как правило [6], переходят к уравнениям неразрывности для смеси компонентов.

для энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho J) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j J) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( L \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_i^{N_k} D_i J_i \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial J}{\partial x_j} \right), \quad (7)$$

для тепловой диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho J) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j J) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{L}{C} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial J}{\partial x_j} \right], \quad (8)$$

где  $p$  – давление, Па;  $N_k$  – число капель;  $C$  – теплоемкость при постоянном давлении, кДж/К;  $Pr_t$  – число Прандтля; нижний индекс  $t$  – параметр зависящий от турбулентности сушильного агента.

Турбулентность оказывает существенное влияние на характеристики потока, и проявляется, когда силы инерции в жидкости становятся значительными по сравнению с силами вязкости, что характеризуется высоким значением числа Рейнольдса [7]. В этом случае модель  $k-\varepsilon$  турбулентности задается уравнениями:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho v k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon, \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho v \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] +$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon),$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\varepsilon$  – скорость диссипации вихревой турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – константы.

Модель турбулентности имеет ограничение при прогнозировании логарифмического профиля скорости вблизи стенки. Поэтому было привлечено уравнение потока вблизи стенки:

$$v^+ = \frac{v_\tau}{\nu_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C, \quad (11)$$

$$y^+ = \frac{\rho \nabla y v_\tau}{\mu}, \quad (12)$$

$$v_\tau = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где  $v^+$  – скорость рядом со стенкой,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $v_\tau$  – скорость трения  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\nu_\tau$  – тангенциальная скорость к стенке на  $\Delta y$  ( $\text{м}$ ) расстоянии от стенки,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $y^+$  – безразмерное расстояние от стенки;  $\tau_w$  – напряжение сдвига стенки,  $\text{Па}$ ;  $\kappa$  – постоянная Кармана [7];  $C$  – постоянная зависящая от шероховатости стенки.

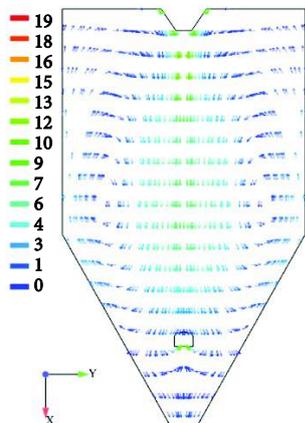


Рисунок 3. Профили скоростей сушильного агента

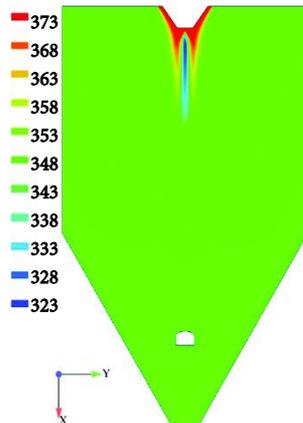


Рисунок 4. Профили распределения температуры сушильного агента

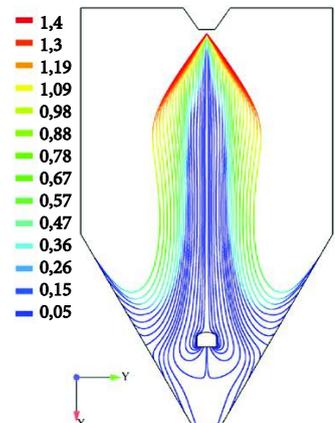


Рисунок 5. Влажосодержание капель фильтра,  $\text{кг}/\text{кг}$

Задача (7) – (11) решена методом конечных объемов. Понятие «конечный объем» относится к небольшому объему, окружающему каждую точку узла на сетке. Уравнения в частных производных преобразуются в поверхностные интегралы, используя теорему дивергенции [8]. Входные параметры задачи [9] представлены в таблице 2

Т а б л и ц а 2

Входные параметры задачи

Параметры фильтрата барды		
Удельная теплоемкость частиц	2050	Дж/кг·К
Удельная теплоемкость фильтрата	2600	Дж/кг·К
Удельная теплоемкость пара	1900	Дж/кг·К
Плотность фильтрата	1085	кг/м <sup>3</sup>
Скрытая теплота парообразования	$2,26 \times 10^6$	Дж/кг
Коэффициент диффузии влаги	$3,0 \times 10^{-11}$	м <sup>2</sup> /с
Коэффициент диффузии пара	$2,6 \times 10^{-5}$	м <sup>2</sup> /с
Параметры сушильного агента		
Температура	373	К
Массовый расход	30	м <sup>3</sup> /ч
Параметры стенки		
Толщина	0,008	м
Теплопроводность	18,8	Вт/м·К

Получены профили распределения скоростей (рисунок 3), температуры (рисунок 4) сушильного агента и влажосодержания капель фильтра барды (рисунок 5) от геометрии распылительной сушилки. Анализируя поведение капель, приведённых на рисунок 3 – 5, можно сделать вывод, что мелкие капли концентрируются вблизи оси сушильной камеры где они быстро высушиваются, причем их температура быстро приближается к температуре сушильного агента. В то же время, из-за большей инерции, более крупные капли движутся по направлению к периферии камеры с сохранением значительного количества влаги.

Мелкие сухие частицы покидают камеру через патрубок отвода отработанного сушильного агента; сухие частицы со средним размером, собираются в сборнике продукта; а тяжелые частицы ударяются о коническую стенку камеры. При этом некоторые из частиц после удара о стенки следуют к низу сушилки, а другие поднимаются в верх камеры и затем уносятся потоками воздуха вниз.

Для проверки результатов моделирования поставлен ряд параллельных опытов по

определению температуры порошка его влажности и температуры отработанного сушильного агента на выходе из сушилки. При их сопоставлении получены значения погрешности 10 %, 12 % и 13 % соответственно, что позволяет говорить об адекватности рассматриваемой модели и ее возможном использовании при проектировании конструкций распылительных сушилок и управлении технологическими параметрами в процессе сушки.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Феклунова Ю.С. Математическое моделирование тепломассопереноса при распылительной сушке растительных экстрактов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. №1. С.9–13.

2 Шевцов А.А. и др. Моделирование процесса распылительной сушки суспензии протеинового зеленого концентрата (ПЗК) // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. №1 (63). С.51–57.

3 Шевцов А.А. и др. К решению краевой задачи теплопроводности гранулы с пленкой раствора на ее поверхности в процессе распылительной сушки // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. №6. С. 630–633.

4 Ali M. et al. CFD modeling of a counter-current spray drying tower // International conference in multiphase flow. Jeju, South Korea, 2013.

5 Mezhericher M., Levy A., Borde I. Three-Dimensional Spray-Drying Model Based on Comprehensive Formulation of Drying Kinetics // Drying Technology. 2012. V. 30. № 11-12. P. 1256–1273.

6 Евграфова А.В., Ибраев Д.Ф., Сухановский А.Н. Моделирование конвективных течений в CFD-пакетах // Вестник Пермского университета. 2012. №3. С. 37–41.

7 Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Математические модели и расчет гидродинамических характеристик пограничного слоя // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. №82. С. 12–47.

8 Ермаков М.К. Исследование возможностей матричных методов для решения уравнений Навье-Стокса // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. С. 1–8.

9 Шевцов А.А., Дранников А.В., Муравьев А.С. Постановка задачи математического моделирования процесса барботажного выпаривания фильтрата барды на основе балансовых уравнений: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений». Воронеж: ВГУИТ, 2014. С.741–744.

10 Алексанян И.Ю., Васина Н.П. Исследование кинетики сушки защитного покрытия лечебно-профилактических пищевых добавок // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2014. № 4. С. 62-67.

## REFERENSES

1 Aleksanyan, I. Yu., Maksimenko Yu. A., Feklunova Yu.S. Mathematical modeling of heat and mass transfer from spray drying of plant extracts *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*. [Proceedings of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics], 2013, no. 1, pp. 9–13. (In Russ.).

2 Shevtsov A.A., Derkanosova A.A.; Korotava A.A. Muravev A.S. Modeling of the spray drying process of green protein suspension concentrate (PGC) *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij* [Proceedings of Voronezh state University of engineering technologies], 2015, no. 1 (63), pp. 51–57. (In Russ.).

3 Shevtsov A.A. Solving the Boundary-Value Problem for Heat Conduction in a Granule Covered with a Solution Film in the Spray Drying Process *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*. [Theoretical foundations of chemical engineering], 2013, vol. 47, no. 6, pp. 630–633. (In Russ.).

4 Ali M CFD modeling of a counter-current spray drying tower. International conference in multiphase flow. Jeju, South Korea, 2013.

5 Mezhericher M., Levy A., Borde I. Three-Dimensional Spray-Drying Model Based on Comprehensive Formulation of Drying Kinetics Drying Technology. 2012, vol. 30, no. 11-12, pp. 1256–1273.

6 Evgrafova A.V., Ibraev D.F., Suhanovskij A.N. Modeling of convective flows in CFD-packages *Vestnik Permskogo universiteta*. [Bulletin of Perm University], 2012, no. 3, pp. 37–41. (In Russ.).

7 Laptev A.G., Farahov T.M. Mathematical models and calculation of the hydrodynamic characteristics of a boundary layer. *Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. [Multi-disciplinary network electronic scientific journal of the Kuban state agrarian university], 2012, no. 82, pp. 12–47. (In Russ.).

8 Ermakov M.K. *Fiziko-himicheskaja kinetika v gazovoj dinamike*. [Physical and chemical kinetics in gas dynamics], 2010, vol. 9, pp. 1–8. (In Russ.).

9 Shevtsov A.A. Drannikov A.V., Mu-rav'ev A.S. *mater. IV Mezhdunar. nauch-tehn. konf.* [Proc of IV international sci-technical conf. "Innovations in technology and engineering of functional foods based on biomedical views]. Voronezh, VGUIT, 2014. pp. 741–744. (In Russ.).

10 Aleksanyan I. Yu., Vasina N.P. Research of kinetics of drying of a sheeting of treatment-and-prophylactic food additives. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK-produkty zdorovogo pitaniya*. [Technologies of food and processing industry of agrarian and industrial complex products of healthy food], 2014, no. 4, pp. 62-67. (In Russ.).