Математическое описание процесса сушки зерна проса в аппарате с активным гидромеханическим режимом

Сергей Т. Антипов¹ ast@vsuet.ru
Дмитрий А. Нестеров¹ nestor13 lord@mail.ru

¹ кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронеж. гос. ун-т. инж. техн., пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Реферат. В основу создания новых конструкций сушильных установок закладывается математическое описание исследуемого процесса с учетом способа загрузки и перемещения продукта в аппарате, способах подвода теплоносителя или иного вида энергоподвода, теоретическая производительность, а также конструктивная (геометрическая) составляющая аппарата. Для моделирования процесса в нашей работе был рассмотрен цилиндрический сушильный аппарат с активным гидродинамическим режимом и СВЧ-энергоподводом, одной из особенностей которого является загрузка продукта в потоке тангенциального потока теплоносителя. Объектом исследования было выбрано зерно проса по причине высокой биологической ценности и высокого распространения в южных регионах Российской Федерации. На основе проведенного теоретического анализа было принято решение о разделении математической модели на две условные составляющие: изучение тепло-массообмена и изучение аэродинамической составляющей процесса сушки. В данной работе нами была подробно раскрыта именно вторая составляющая процесса. Базисом данной модели послужили уравнения движения зерен проса на основе второго закона Ньютона. Теплоноситель в рамках предлагаемой модели считается сплошной средой, сильно сжимаемой, и обладающей внутренней вязкостью, описываемой уравнением Навье-Стокса. Начальными условиями данной математической модели послужили следующие допущения: скорости механического движения элементов равны нулю, начальная плотность воздушной среды во всех узлах равна равновесной плотности воздуха, начальная скорость движения воздушной среды во всех узлах равна нулю. Граничные условия можно охарактеризовать как постоянство влажности и температуры теплоносителя, а его перемещение напрямую ограничено конструкцией сушильной камеры. Данная модель будет полезна специалистам, занимающимся проблемами расчетов и проектирования сушильного оборудования.

Ключевые слова: просо, зерно, сушка, аппарат, математическая модель, аэродинамический режим, тепло- и массообмен

The mathematical description of the process of drying the grain of millet in the device with active hydromechanical mode

Sergei T. Antipov¹ ast@vsuet.ru
Dmitrii A. Nesterov¹ nestor13 lord@mail.ru

¹ machinery and equipment for food production depart-ment, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Summary. The basis for the creation of new designs dryers laid the mathematical description of the test process, taking into account the method of loading and handling of the product in the machine, how to supply coolant or other type of energy supply, the theoretical performance, and structural (geometric) component of the apparatus. To simulate the process of our work was considered of cylindrical dryers with active hydrodynamic regime and microwave energy supply, one feature of which is the loading of the product in a stream tangential coolant flow. The object of the study was chosen millet grain, because of the high biological value and high prevalence in the southern regions of the Russian Federation. On the basis of theoretical analysis, it was decided to divide the mathematical model into two conditional components: the study of heat and mass transfer study of aerodynamic component of the drying process. In this paper, we have been disclosed in detail is the second part of the process. The basis of this model were the equations of motion of millet grains by Newton's second law. The coolant in the framework of the proposed model is considered to be a continuous medium, highly compressible and has an internal viscosity, described by the Navier-Stokes equations. The initial conditions of the mathematical model were the following assumptions: the speed of the mechanical motion elements are equal to zero, the initial density of the air environment in all nodes is the equilibrium density of the air, the initial velocity of the air quality in all nodes is zero. The boundary conditions can be described as the constancy of the flow temperature and humidity, and its displacement is directly design constraints of the drying chamber. This model will be useful for professionals engaged in the problems of calculation and design of drying equipment.

Keywords: millet, grain dryers, machine, mathematical model, aerodynamic mode, heat and mass transfer

Введение

Изучение аэродинамики движения и тепло- и массообмена частиц при сушке зерновых культур является важной составляющей при определении как режимов процесса, так и непосредственно геометрии сушильных аппаратов. В качестве объекта исследования нами было выбрано зерно проса, в следствии широкого распространения данной культуры на территории стран Евразийского экономического союза. Данная культура обладает высокими биологическими и химическими свойствами, но имеет низкую стойкость при хранении, чем обуславливаются повышенные требования при технологической переработке. В следствии этого нами был предложен ряд сушильных установок с активным гидродинамическим режимом и закрученными потоками теплоносителя с

применением различных способов энергоподвода к продукту [1–2]. Для определения оптимальной конструкции установок необходимо производить инженерные расчеты, которые не могут быть адекватно рассмотрены без составления математических моделей.

Процесс СВЧ-сушки зерна проса во взвешенно-закрученном слое является чрезвычайно сложным с точки зрения физическо-математического описания. В основу модели данного процесса закладываются две составляющие: движение двух различных сред (газообразная среда – теплоноситель и сыпучая среда – зерно проса), взаимодействующих друг с другом и с рабочими поверхностями сушильной камеры, и тепло- и массообменные процессы в зернах проса. В данной статье нами подробно рассмотрена первая составляющая данной проблемы.

Для цитирования

Антипов С. Т., Нестеров Д. А. Математическое описание процесса сушки зерна проса в аппарате с активным гидромеханическим режимом // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С. 77–81. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-77-81

For citation

Antipov S. T., Nesterov D. A. The mathematical description of the process of drying the grain of millet in the device with active hydromechanical mode. Vestnik VSUET [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 3. pp. 77–81. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-77-81

Во многих известных моделях аналогичных процессов сушки используют существенные упрощения (сферическая или цилиндрическая симметрия, сведение к процессам только в одном плесе) [3–7]. Однако, опираясь на возможности современной вычислительной техники, появляется возможность создать комплексную высокоадекватную модель процесса.

В настоящей работе поставлена задача определения основных уравнений, начальных и граничных условий математической модели процесса движения зерна проса во взвешенно-закрученном слое, обладающую высокой детализацией и высокой адекватностью, базирующейся на общепринятых методах моделирования и физико-математического описания, но использующей в полной мере вычислительные возможности современных компьютеров.

Для начала моделирования определяем количество одновременно находящихся в сушильной камере зерен проса, количество которых составляет порядка 10^4 . Для моделирования механического поведения системы зерен проса, как сыпучей среды, используется метод динамики частиц, который в последние десятилетия широко

используется в различных отраслях науки и техники. Метод заключается в решении уравнений движения множества отдельных сферически-симметричных частиц (зерен проса), которые испытывают силовое воздействие со стороны соседних частиц, потока теплоносителя, стенок сушильной камеры (рисунок 1).

Рисунок 1. Силы, действующие на зерно проса в сушильной камере

Figure 1. The forces acting on the grain in a drying chamber millet

Уравнения движения зерен проса составляются на основе второго закона Ньютона:

$$\left\{ \begin{aligned} m_c \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= k_m (v_{xm}(x_i, y_i, z_i) - v_{xi}) + \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{xi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{aligned} \right. + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_c} \left\{ \begin{aligned} &c(d_c - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{xi} - v_{xj}), \quad r_{ij} < d_c; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_c; \end{aligned} \right\}; \\ m_c \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= k_m (v_{ym}(x_i, y_i, z_i) - v_{yi}) + \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{yi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{aligned} \right. + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_c} \left\{ \begin{aligned} &c(d_c - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{yi} - v_{yj}), \quad r_{ij} < d_c; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_c; \end{aligned} \right\}; \\ m_c \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= k_m (v_{zm}(x_i, y_i, z_i) - v_{zi}) + \left\{ \begin{aligned} &c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{zi}, \quad r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\ &0, \quad r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{aligned} \right. + \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_c} \left\{ \begin{aligned} &c(d_c - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_e (r_{ij} - d_c) (v_{zi} - v_{zj}), \quad r_{ij} < d_c; \\ &0, \quad r_{ij} \geq d_c; \end{aligned} \right\} - m_c g, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где i – номер зерна; m_c и d_c – масса и диаметр i -го зерна; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты зерна; t – время; k_{Π} – коэффициент линейного вязкого трения при движении зерен в потоке теплоносителя;

v_{xt}, v_{yt}, v_{zt} – компоненты вектора скорости теплоносителя в месте нахождения i -го зерна; c и k_e – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия зерен с поверхностью сушильной камеры;

N_c – количество зерен; j – номер зерна, возможно контактирующего с i -м зерном; c и k_b – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия зерен между собой; $r_{i-п}$ – расстояние от центра i -го зерна до поверхности сушильной камеры; $x_{i-п}$, $y_{i-п}$, $z_{i-п}$ – декартовы координаты точки касания зерна поверхности сушильной камеры; r_{ij} – расстояние между центрами зерен i и j ; v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} – декартовы составляющие скорости i -го зерна; g – ускорение свободного падения.

Расстояние r_{ij} между центрами семян рассчитывается на каждом шаге интегрирования через координаты центров по теореме Пифагора:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Уравнения (1) представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка и решаются в процессе моделирования численным методом – методом Рунге-Кутты второго порядка:

$$\begin{aligned} x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \\ v_{xi}^{\tau+1} &= v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \\ v_{yi}^{\tau+1} &= v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \\ v_{zi}^{\tau+1} &= v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (2)$$

Теплоноситель в рамках предлагаемой модели считается сплошной средой, сильно сжимаемой, и обладающей внутренней вязкостью. В этом случае, базовыми уравнениями, описывающим механическое поведение среды, являются уравнения Навье-Стокса, которые в трехмерном случае можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_x}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + F_x - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\ + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} + F_y - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \\ + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + F_z - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \\ + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} - v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} - v_z \frac{\partial \rho}{\partial z}, \end{cases} \quad (3)$$

где i – номер семени проса, τ и $\tau+1$ – индексы текущего и следующего временного шага; Δt – шаг интегрирования по времени; (x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) – положение, скорость, ускорение семени. v_x, v_y, v_z – компоненты вектора скорости среды в выбранной точке; t – время; F_x, F_y, F_z – компоненты вектора массовой плотности объемных сил, действующих на сплошную среду (сила в расчете на единицу массы); α – коэффициент пропорциональности плотности теплоносителя и давления (в приближении о линейной их связи); ρ – плотность теплоносителя в выбранной точке; λ – коэффициент сжимаемости среды; μ – коэффициент внутреннего трения.

Уравнения Навье-Стокса для сложных случаев не имеют аналитического решения, поэтому сразу будем ориентироваться на численное их решение с использованием метода дискретизации пространства и конечно-разностных схем [6]. Задачу будем решать в трехмерном пространстве XYZ . Для численного решения уравнений Навье-Стокса область моделирования, охватывающую сушильную камеру дискретизируем кубической сеткой. Область моделирования содержит $20 \times 20 \times 20$ ячеек с размером ячейки d (рисунок 2).

В процессе численного решения уравнений Навье-Стокса на квадратной сетке необходимо для каждого узла (i, j, k) вычислять первые и вторые частные производные по каждой из координат x, y, z . Для расчета производных необходимо использовать значения функций $v_x(i, j, k)$, $v_y(i, j, k)$, $v_z(i, j, k)$ и $\rho(i, j, k)$ в шестнадцати узлах, окружающих узел (i, j, k) (рисунок 3).

Не расписывая всю систему (1) в конечно-разностной форме, покажем на отдельных примерах, как вычисляются первые и вторые производные:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{\rho^{\tau+1} - \rho^{\tau}}{\Delta t}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \approx \frac{\rho_{i+1,j,k} - \rho_{i-1,j,k}}{2d}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \approx \frac{v_{x,i+1,j,k} + 2v_{x,i,j,k} - v_{x,i-1,j,k}}{d^2}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} \approx \frac{v_{x,i+1,j+1,k} - v_{x,i+1,j-1,k} - v_{x,i-1,j+1,k} + v_{x,i-1,j-1,k}}{4d^2}, \quad (7)$$

где знак $\approx$ означает замену производной в уравнениях Навье-Стокса численной оценкой производной; τ и $\tau+1$ – текущий и последующий шаги интегрирования по времени; Δt – величина шага интегрирования по времени; d – размер ячейки сетки дискретизации пространства.

Рисунок 2. Поля скоростей движения теплоносителя в сушильной камере в вертикальном осевом срезе (а) и в поперечном срезе на середине высоты камеры (б). Черными точками представлена внутренняя область сушильной камеры, серыми точками – область вне сушильной камеры

Figure 2. Movement velocity field of the coolant in the drying chamber in a vertical axial cut (a) and in cross-section in the middle chamber height (b). Black dots shown the inner region of the drying chamber, gray dots – the area outside of the drying chamber

Рисунок 3. Индексация узлов, окружающих базовый узел (i, j, k) , используемых для численного определения первых и вторых производных при сеточном решении уравнений Навье-Стокса

Figure 3. Indexing nodes surrounding the base node (i, j, k) , used for the numerical determination of the first and second derivatives at the grid solution of the Navier-Stokes equations

Для определения начальных условий принимаем следующие допущения. В начальный момент времени семена проса располагаются в нижней части сушильной камеры, на удерживающей

сетке ($z_i^0 = 0$). Координаты x_i^0 и y_i^0 задаются случайным образом (с помощью генератора случайных чисел) в пределах круговой области удерживающей сетки. Начальные скорости механического движения элементов равны нулю:

$$v_{xi}^0 = v_{yi}^0 = v_{zi}^0 = 0. \quad (8)$$

Начальная плотность воздушной среды во всех узлах равна равновесной плотности воздуха:

$$\rho_{i,j,k}^0 = \rho_0. \quad (9)$$

Начальная скорость движения воздушной среды во всех узлах равна нулю:

$$v_{x,i,j,k}^0 = v_{y,i,j,k}^0 = v_{z,i,j,k}^0 = 0. \quad (10)$$

Граничные условия:

— Механическое движение семян проса ограничено рабочими поверхностями сушильной камеры. Если в процессе движения семена внедряются в рабочую поверхность, в модели возникает возвращающая сила, пропорциональная величине внедрения, и под ее действием семена возвращаются внутрь сушильной камеры.

— При решении задач тепло- и влагопереноса граничными условиями считаются условия взаимодействия семян и окружающего их теплоносителя. В модели считается, что теплоноситель имеет постоянные в пространстве и во времени значения температуры ТТ и влажности WT.

— Для уравнений движения сплошной среды граничные условия задаются в узлах, расположенных на границе сушильной камеры и теплоносителя.

Для определения этих узлов среди $20 \times 20 \times 20$ узлов модельного пространства используются следующие неравенства:

$$\begin{cases} \left| \sqrt{x_{i,j,k}^2 + y_{i,j,k}^2} - \left(R_1 + (R_2 - R_1) \frac{z_{i,j,k}}{z_1} \right) \right| < d, \forall z_{i,j,k} < z_1; \\ \left| \sqrt{x_{i,j,k}^2 + y_{i,j,k}^2} - R_2 \right| < d, \text{ npu } z_1 < z_{i,j,k} < z_2; \\ |z_{i,j,k} - z_2| < d, \text{ npu } z_{i,j,k} > z_2, \end{cases} \quad (11)$$

где $x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, z_{i,j,k}$ – координаты узла пространства (i, j, k) ; R_1 и R_2 – радиусы горловины и основной части сушильной камеры; z_1 – высота перехода конической части сушильной камеры в цилиндрическую; z_2 – высота сушильной камеры; d – размер ячейки пространства. В граничных узлах плотность среды считается равновесной $\rho_{i,j,k} = \rho_0$, а скорость среды равна проекции на касательную плоскость к рабочей поверхности в данном граничном узле усредненного вектора скорости в соседних узлах (из внутренней области сушильной камеры).

Принимаем следующие допущения:

— в пределах одного семени проса вещество считается сплошной средой;

— теплоноситель является сплошной средой и подчиняется уравнениям Навье-Стокса;

— механическое взаимодействие между семенами проса и с поверхностями сушильной камеры носит линейный вязкоупругий характер;

— семена проса движутся по законам классической динамики, механически взаимодействуя между собой и с рабочими поверхностями сушильной камеры;

— тепло- и влагоперенос между семенами проса и теплоносителем описывается соответствующими уравнениями в общепринятой форме;

— температура и влажность теплоносителя постоянны в пространстве и во времени;

ЛИТЕРАТУРА

1 Антипов С.Т., Журавлев А.В., Казарцев Д.А., Бородкина А.В. и др. Комбинированные аппараты с закрученным потоком теплоносителя для сушки дисперсных материалов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2014. № 2. С. 52–59.

2 Марухин А.С., Журавлев А.В., Нестеров Д.А. Анализ физико-химических параметров проса // Инновационное развитие современной науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Уфа, 2014. С. 105–107.

3 Миронов М.А. Математическое моделирование процесса сушки движущегося слоя зерна в режиме инвертирования: дис. ... канд. тех. наук. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2010. 164 с.

4 Афанасьев А.М. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена при сушке электромагнитным излучением: дис. ... док. тех. наук. Волгоград: Южно-Российский государственный технический университет, 2010. 300 с.

5 Остриков А.Н., Шевцов С.А. Математическое моделирование процесса сушки пищевого растительного сырья перегретым паром // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2013. № 1 (331). С. 83–87.

6 Васенин И.М., Крайнов А.Ю., Исаченков А.Б. Математическое моделирование сушки угольных частиц в потоке газа // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. № 2. С. 357–367.

7 Северинов О.В., Галов А.С., Васильев А.Н. Моделирование управления активным вентилированием зерна // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 2 (7). С. 59–64.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Т. Антипов д. т. н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ast@vsuet.ru

Дмитрий А. Нестеров аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nestor13_lord@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Сергей Т. Антипов консультация в ходе исследования

Дмитрий А. Нестеров написал рукопись, несёт ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 01.08.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 22.08.2016

— выполняется линейная связь между плотностью и давлением теплоносителя в локальном объеме.

Заключение

Предлагаемая математическая модель при помощи уравнений (1)–(3) позволяет производить расчеты аэродинамической составляющей процесса сушки зерна проса в аппаратах со взвешенно-закрученным слоем.

REFERENCES

1 Antipov S.T., Zhuravlev A.V., Kazartsev D.A., Boro-dkina A.V. et al. Combined devices with twisted coolant flow drying dispersed materials. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti* [Technology of food processing industry AIC – healthy food] 2014, no. 2, pp. 52–59. (in Russian)

2 Marukhin A.S., Zhuravlev A.V., Nesterov D.A. An analysis of physical-chemical parameters of millet. *Innovatsionnoe razvitie sovremennoi nauki* [Innovative development of modern science. Collection of articles of the International scientific and practical conference] 2014, pp. 105–107. (in Russian)

3 Mironov M.A. Matematicheskoe modelirovaniye protsessy sushki dvizhushchegosya sloya zerna v rezhime invertirovaniya [Mathematical modeling of drying grain moving bed mode inversion. Dis. cand. tech. science] Krasnodar: Kuban State Technological University, 2010. 164 p. (in Russian)

4 Afanasiev A.M. Matematicheskoe modelirovaniye protsessov teplo- i massopere-nosa pri sushke elektromagnitnym izlucheniem [Mathematical modeling of heat and mass transfer in drying electromagnetic radiation. Dis. doc. thech. science] Volgograd, South-Russian State Technical University, 2010. 300 p. (in Russian)

5 Ostrikov A.N., Shevtsov S.A. Mathematical modeling of drying edible feedstock with superheated steam. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Food technology] 2013, no. 1 (331), pp. 83–87. (in Russian)

6 Vasenin I.M., Kraynov A.Yu., Isaychenko A.B. Mathematical modeling of drying coal particles in the gas stream. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling] 2012, vol. 4, no. 2, pp. 357–367. (in Russian)

7 Severinov O.V., Galov A.S., Vasiliev A.N. Management Simulation active ventilation of grain. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve* [Innovations in agriculture] 2014, no. 2 (7), pp. 59–64. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei T. Antipov doctor of technical sciences, professor, machinery and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, ast@vsuet.ru

Dmitrii A. Nesterov graduate student, machinery and equipment for food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, nestor13_lord@mail.ru

CONTRIBUTION

Sergei T. Antipov consultation during the study

Dmitrii A. Nesterov wrote manuscript, is responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 8.1.2016

ACCEPTED 8.22.2016