



## Математическая модель процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплава до температуры начала реакции Майяра



|                       |              |  |   |
|-----------------------|--------------|--|---|
| Валерий А. Афанасьев  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:vnii_kp@vmail.ru">vnii_kp@vmail.ru</a>         |   |
| Лариса Н. Фролова     | <sup>1</sup> | <a href="mailto:Fln-84@mail.ru">Fln-84@mail.ru</a>             |  0000-0002-6505-4136 |
| Константин А. Сизиков | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ska@combikorm.ru">ska@combikorm.ru</a>         |   |
| Александр Н. Остриков | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a> |  0000-0002-2335-0017 |
| Светлана Н. Зобова    | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a> |   |

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

**Аннотация.** Для описания неизотермического течения расплава зерновых культур в экструдере в качестве исходных уравнений были выбраны уравнения движения, уравнение неразрывности, уравнение энергии (теплового баланса), реологическое уравнение. Для решения модели приняты следующие допущения: течение движущейся вязкой среды принимается ламинарным и установившимся; силы инерции и гравитации по сравнению с силами трения и давления настолько малы, что ими можно пренебречь; вязкая среда (расплав) представляет собой несжимаемую жидкость, характеризующуюся постоянными теплопроводностью и температуропроводностью; изменением теплопроводности в продольном направлении пренебрегали в связи с тем, что конвективный перенос теплоты в направлении течения выше, чем перенос теплоты теплопроводностью; теплопередача в направлении перпендикулярном течению расплава происходит только за счет теплопроводности. Для решения системы уравнений с учетом конвективной теплопередачи был использован численный метод конечных разностей, сущность использования которого заключалась в том, что рассматриваемая область (канал экструдера) разбивается на расчетные ячейки с помощью сетки. Сетка состояла из прямоугольных ячеек с постоянным шагом между узлами, которые точно лежат на границах области интегрирования. При этом дифференциальные уравнения преобразовывались в разностные уравнения путем замены производных в точке конечными разностями по границам ячейки. В результате решения получена математическая модель неизотермического течения расплава в канале экструдера. Для решения математической модели процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплава составлена программа на алгоритмическом языке C++. Получена неизотермическая математическая модель процесса экструзии зерновых культур при температурах начала реакции Майяра, т. е. до 120–125 °С, которая позволяет выявить характер изменения температуры по длине экструдера. Сравнительный анализ результатов численного решения и экспериментальных данных показал хорошую сходимость: среднеквадратичное отклонение не превышало 12,7%.

**Ключевые слова:** математическая модель, неизотермическое течение, расплав, зерновые культуры, экструзия, комбикорм, защищенный белок, крупный рогатый скот

## Grain crops extrusion process mathematical model at a non-isothermal flow of their melt up to the temperature of the Maillard reaction start

|                       |              |  |   |
|-----------------------|--------------|--|---|
| Valerii A. Afanasiev  | <sup>1</sup> | <a href="mailto:vnii_kp@vmail.ru">vnii_kp@vmail.ru</a>         |   |
| Larisa N. Frolova     | <sup>1</sup> | <a href="mailto:Fln-84@mail.ru">Fln-84@mail.ru</a>             |  0000-0002-6505-4136 |
| Konstantin A. Sizikov | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ska@combikorm.ru">ska@combikorm.ru</a>         |   |
| Alexsandr N. Ostrikov | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a> |  0000-0002-2335-0017 |
| Svetlana N. Zobova    | <sup>1</sup> | <a href="mailto:ostrikov27@yandex.ru">ostrikov27@yandex.ru</a> |   |

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Abstract.** The equations of motion, the equation of continuity, the equation of energy (heat balance), the rheological equation were chosen to describe the non-isothermal flow of the cereals melt in the extruder as the initial equations. The following assumptions were made to solve the model: the flow of a moving viscous medium is assumed to be laminar and steady; the forces of inertia and gravity are so small compared to the forces of friction and pressure that they can be neglected; a viscous medium (melt) is an incompressible liquid characterized by constant thermal conductivity and thermal diffusivity; the change in thermal conductivity in the longitudinal direction was neglected due to the fact that convective heat transfer in the flow direction is higher than the heat transfer by thermal conductivity; heat transfer in the direction perpendicular to the flow of the melt occurs only due to thermal conductivity. The numerical finite difference method was used to solve a system of equations taking into account convective heat transfer. Its essence of use lies in the fact that the considered area (extruder channel) is divided into calculated cells using a grid. The grid consisted of rectangular cells with a constant step between nodes, which exactly lie on the boundaries of the integration region. In this case, the differential equations were transformed into difference equations by replacing the derivatives at a point with finite differences along the cell boundaries. The mathematical model of non-isothermal melt flow in the extruder channel was obtained as a result of the solution. To solve a mathematical model of the process of grain crops extrusion with a non-isothermal flow of their melts, a program in the algorithmic language C++ was compiled. A non-isothermal mathematical model of the process of extrusion of grain crops at temperatures of the beginning of the Maillard reaction, i.e., up to 120–125 °C, was obtained. It allows us to identify the nature of the temperature change along the length of the extruder. Comparative analysis of the results of the numerical solution and experimental data showed good convergence: the standard deviation did not exceed 12.7%.

**Keywords:** mathematical model, non-isothermal flow, melt, grain crops, extrusion, compound feed, "protected" protein, cattle

Для цитирования

Афанасьев В.А., Фролова Л.Н., Сизиков К.А., Остриков А.Н., Зобова С.Н. Математическая модель процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплава до температуры начала реакции Майяра // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 23–29. doi:10.20914/2310-1202-2021-1-23-29

For citation

Afanasiev V.A., Frolova L.N., Sizikov K.A., Ostrikov A.N., Zobova S.N. Grain crops extrusion process mathematical model at a non-isothermal flow of their melt up to the temperature of the Maillard reaction start. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 23–29. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-1-23-29

## Введение

Для повышения продуктивности крупного рогатого скота (КРС) необходимо увеличить в сыром протеине долю защищенного белка, т. е. белка, устойчивого к воздействию ферментов микрофлоры и неспособного к распаду на составляющие – аммиак и углеродную цепочку [2, 7, 9, 11].

Отличительной особенностью моделирования процесса экструдирования зерновых культур при производстве комбикормов с защищенным белком для крупного рогатого скота является то, что смесь белка и редуцирующих сахаров нагревают до температуры начала реакции Майяра, т. е. до 120–125 °С, не допуская при этом ее развитие [1, 5, 6, 8, 10, 13, 14]. Баротермомеханическая обработка исходных компонентов в экструдере позволяет поучить комбикорма с защищенным белком.

уравнения движения

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \left( \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} &= \\ &= -\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

уравнение энергии (теплового баланса)

$$\begin{aligned} \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) - T \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \\ &- \left( \sigma_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \sigma_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \sigma_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left[ \sigma_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \sigma_{zx} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \sigma_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

## Результаты и обсуждение

С учетом ранее принятых допущений уравнения неразрывности (1), движения (2) и энергии (3) можно упростить, так как компоненты течения в направлении одной или двух осей координат можно считать несущественными. Для неизотермического течения расплава в кольцевом канале экструдера значимыми

## Методы

При выборе математической модели были выбраны следующие ограничения и допущения: течение движущейся вязкой среды принимается ламинарным и установившимся; силы инерции и гравитации по сравнению с силами трения и давления настолько малы, что ими можно пренебречь; вязкая среда (расплав) представляет собой несжимаемую жидкость, характеризующуюся постоянными теплопроводностью и температуропроводностью; изменением теплопроводности в продольном направлении пренебрегали в связи с тем, что конвективный перенос теплоты в направлении течения выше, чем переноса теплоты теплопроводностью; теплопередача в направлении перпендикулярном течению расплава происходит только за счет теплопроводности;

Математическая модель неизотермического течения расплава зерновых культур включала:

являются только компоненты скорости в направлении оси  $x$ , а градиенты скорости и температуры имеют ненулевые значения только в направлении оси  $y$ . Это означает, что члены уравнений (1)–(3) с компонентами  $v_y$ ,  $v_z$  и их производными по координатам  $x$  и  $z$  можно пренебречь.

Поэтому уравнение движения (1) [4] с учетом того, что  $\partial v_x / \partial x = 0$ , так как движение является установившимся;  $v_y \partial v_x / \partial x = 0$ , так как  $v_y = 0$ ;  $v_z \partial v_x / \partial z = 0$ , так как  $v_z = 0$ ;  $\partial \sigma_{xx} / \partial x = 0$ , так как нормальными напряжениями вследствие деформации сдвига пренебрегаем;  $\partial \sigma_{zx} / \partial z = 0$ , поскольку ширина кольцевого канала  $B$  значительно больше высоты кольцевого канала  $H$ , то влиянием боковых стенок на величину напряжений сдвига  $\sigma_{zx}$  пренебрегаем;  $\rho g_x = 0$ , так как влиянием сил гравитации пренебрегаем, можно записать следующим образом

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y}. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности (2) [4] с учетом того, что  $\partial \rho / \partial x = 0$  – так как плотность постоянна и не меняется со временем;  $\partial / \partial y (\rho v_y) = 0$  – так как  $v_y = 0$ ;  $\partial / \partial z (\rho v_z) = 0$ , поскольку  $v_z = 0$ ; если член уравнения (2)  $\partial / \partial x (\rho v_x) = 0 \hat{=} \rho \partial v_x / \partial x + v_x / \partial \rho / \partial x$ , а в нем  $v_x / \partial \rho / \partial x = 0$  – так как  $\rho = \text{const}$ , то из него следует, что  $\rho \partial v_x / \partial x = 0$  и поэтому  $\partial v_x / \partial x = 0$ . Принимая допущение о несжимаемости расплава (т. е. о постоянной плотности расплава), левая часть уравнение неразрывности (2) становится равной нулю, и оно приводится к виду:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}. \quad (5)$$

Решая совместно упрощенные с учетом принятых допущений уравнение неразрывности (4) и уравнение движения (5), получаем

$$- \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Таким образом, для уравнения энергии (5) были приняты следующие упрощающие допущения как течение является:  $\partial T / \partial t = 0$  – так установившимся;  $v_y \partial T / \partial y = 0$  – так как  $v_y = 0$ ;  $v_z \partial T / \partial z = 0$  – так как  $v_z = 0$ ;  $\partial q_x / \partial x = 0$  – вследствие того что  $T \neq f(x) \rightarrow q_x = 0$ ;  $\partial q_z / \partial z = 0$  – так как  $\partial T / \partial z = 0$ ; по условиям задачи предполагается, что все члены уравнений (1)–(3), содержащие  $v_z$  и  $v_y$  и их производные по  $x$  и  $y$ , равны нулю.

После упрощения уравнения (5) получаем

$$0 = - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \partial \sigma_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial z} \quad (7)$$

Учитывая, что  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$  и  $q_y = -\lambda \partial T / \partial y$  (закон Фурье), имеем:

$$\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \sigma_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (8)$$

Уравнения (5–8) дополним начальными условиями

$$\begin{aligned} v_{x_0} &= v_x(x, y, \tau = 0), \\ v_{y_0} &= v_y(x, y, \tau = 0), \\ T_0 &= T(x, y, \tau = 0) \end{aligned} \quad (9)$$

и граничным условием по температуре: при прилипанию расплава к стенкам канала тепловой поток в слое, прилегающем к стенке, определяется следующей формулой

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{\text{ст}} = \text{Bi} \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{ст}}}{\delta}. \quad (10)$$

Температура расплава, контактирующего со стенкой, принимается равной температуре стенки, то есть  $T_{\text{к}} = T_{\text{ст}}$ .

Вязкость зернового расплава при неизотермическом течении его в витках экструдера описывается уравнением в виде обобщенного степенного закона [4]

$$\sigma_{yx} = \left( \frac{1}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (11)$$

где  $\phi$  – эффективная вязкость расплава при начальных условиях;  $m$  – постоянных коэффициент расплава зерновых культур.

С учетом уравнений (8) и (11) изменение температуры расплава по высоте канала шнека описывается следующим уравнением

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = - \frac{\varphi}{\lambda} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m+1} y^{m+1} \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) и учитывая, что при  $y = 0$   $(\partial T / \partial y)$  (профиль температуры по высоте канала шнека является симметричным), получаем

$$\left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = - \frac{\varphi}{\lambda} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m+1} \frac{y^{m+2}}{m+2} \quad (13)$$

Интегрируя уравнение (13) и определяя постоянную интегрирования, получаем

$$T = T_{\text{ст}} + \frac{\varphi}{\lambda} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{m+1} \frac{(0,5H)^{m+3} - y^{m+3}}{(m+2)(m+3)}, \quad (14)$$

где  $T_{\text{ст}}$  – температура стенки, °C;  $x, y$  – координаты, м;  $H$  – высота канала шнека, м;  $\lambda$  – теплопроводность расплава, Вт / (м×К).

Однако, учитывая, что теплота уносится вместе с потоком расплава, т. е. необходимо учитывать передачу теплоты конвекцией, а также принимая во внимание закон теплопроводности Фурье и уравнение (11), окончательно получаем

$$\rho c_p v_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \eta(y) \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2, \quad (15)$$

В уравнении (15) член в левой части уравнения описывает конвективную теплопередачу в направлении  $x$ , первый член в правой части уравнения – теплопередачу в направлении  $y$  за счет теплопроводности, и второй член в правой части уравнения – диссипационную энергию вязкого течения за счет существования градиента скорости в направлении  $y$ .

Для решения системы уравнений движения (4) и энергии (15) с учетом конвективной теплопередачи был использован численный метод конечных разностей, сущность использования которого заключалась в том, что рассматриваемая область (в данном случае канал экструдера) разбивается на расчетные ячейки с помощью сетки. Сетка состояла из прямоугольных ячеек с постоянным шагом между узлами, которые точно лежат на границах области интегрирования. При этом дифференциальные уравнения преобразовывались в разностные уравнения путем замены производных в точке конечными разностями по границам ячейки [3, 4, 12, 15–20].

Это означает, что касательная в точке заменяется хордой. Тангенс угла наклона касательной, который соответствует частной производной, заменяется тангенсом угла наклона секущей, то есть конечно-разностным отношением. Такие разностные схемы аппроксимируют производные более точно, чем так называемые граничные схемы – конечно-разностные схемы для передней или задней границы и точки внутри расчетной области [4]. Центральная разностная схема может быть построена, только если доступны узлы сетки по обе стороны от текущего (центрального) узла. Если точка сетки  $x_n$  лежит на границе или так близко к ней, что точки сетки по другую ее сторону не существует, то производная аппроксимируется с помощью передней или задней разностных схем (соответственно с шагом вперед или назад):

Порядок решения математической модели (5)–(15) рассматривается на равномерной сетке. С этой целью разобьем область  $D = \{0 \leq X \leq 1, 0 \leq Y \leq 1\}$  на сетку с шагом  $h_x$  и  $h_y$  по переменным  $X$  и  $Y$  соответственно, с размерностью  $13 \times 17$ .

Для решения математической модели процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплавов составлена

программа на алгоритмическом языке Turbo Pascal 7,0. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1.  
Исходные данные для расчета процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплавов

Table 1.  
Initial data for calculating the process of extrusion of grain crops in the non-isothermal flow of their melts

| Переменная                                     | Variable  | Значение Value |
|--|---|----------------|
| Шаг, м   | Step, m   | 0,0180         |
| Глубина винтового канала, м                    | Screw channel depth, m                              | 0,014          |
| Диаметр шнека, м                               | Screw diameter, m                                   | 0,0220         |
| Зазор между корпусом и шнеком, м               | Clearance between body and auger, m                 | 0,0005         |
| Частота вращения шнека, 1/с                    | Screw speed, 1 / s                                  | 1,0000         |
| Удельная теплоемкость продукта, Дж / (кг×К)    | Specific heat capacity of the product, J / (kg × K) | 1590,0000      |
| Плотность расплава продукта, кг/м <sup>3</sup> | Density of product melt, kg / m <sup>3</sup>        | 1270,0000      |
| Коэффициент теплопроводности, Вт / (м×К)       | Thermal conductivity coefficient, W / (m × K)       | 0,2210         |
| Вязкость, Па×с                                 | Viscosity, Pa × s                                   | 20000,0000     |
| Избыточное давление, МПа                       | Overpressure, MPa                                   | 4,5000         |
| Начальная температура продукта, °С             | Initial product temperature, °C                     | 20,0000        |
| Температура стенки винтового канала, °С        | Screw channel wall temperature, °C                  | 135,0000       |
| Внутренний диаметр корпуса, м                  | Inner diameter of body m                            | 0,0225         |
| Угол подъема винтового канала рад              | The angle of elevation of the screw channel is rad  | 0,2379         |
| Угловая скорость ( $V_\omega$ ) м/с            | Angular velocity ( $V_\omega$ ), m / s              | 0,0660         |
| Скорость по оси Z ( $W_z$ ), м/с               | Z-axis speed ( $W_z$ ) m / s                        | 0,0641         |
| Скорость по оси X ( $W_x$ ), м/с               | X-axis speed, ( $W_x$ ) m / s                       | 0,0155         |
| Число Рейнольдса                               | Reynolds number                                     | 6,4 E-0005     |
| Число Эйлера                                   | Euler's number                                      | 8,80 E + 0005  |
| Число Эккерта                                  | Eckert number                                       | 1,79 E-0008    |
| Число Пекле                                    | Peclet number                                       | -              |

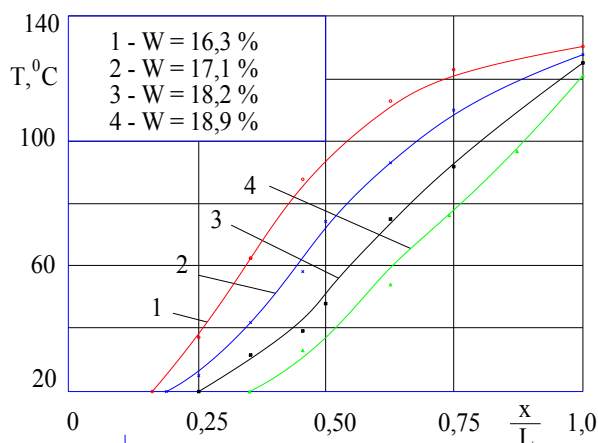


Рисунок 1. Изменение температур расплава зерновых культур по относительной длине рабочей камеры экструдера при различной начальной влажности зерновых культур

Figure 1. Changes in the melt temperatures of grain crops along the relative length of the working chamber of the extruder at different initial moisture content of grain crops

Учитывая тот факт, что повышение температуры расплава зерновых культур происходит за счет эффекта диссипации, т. е. преобразования механической энергии в тепловую за счет сил трения, то максимальная температура расплава наблюдается у поверхности шнека. Температура расплава у неподвижной стенки корпуса рабочей

камеры может быть ниже, чем у шнека, на 10 °С. Температура расплава в пристенной зоне (у боковых стенок корпуса рабочей камеры) возрастает, что вызвано влиянием эффекта охлаждения расплава в центральной части канала вследствие адиабатического расширения.

Сравнительный анализ расчетных значений температуры по модели (5)–(15) с аналогичными моделями других авторов [3, 4] показал, более высокую точность описания поля температур расплава при его неизотермическом течении в экструдере: среднеквадратичное отклонение не превышало 12,7% (рисунок 1).

### Заключение

1. Получена неизотермическая математическая модель процесса экструзии зерновых культур при температурах начала реакции Майяра, т. е. до 120–125 °С, которая позволяет выявить характер изменения температуры по длине экструдера.

2. Сравнительный анализ результатов численного решения и экспериментальных данных показал хорошую сходимость: среднеквадратичное отклонение не превышало 12,7%, что позволило сделать вывод о возможности получения экструдата с защищенным белком и использования полученной модели при разработке и проектировании экструдеров.

### Литература

- 1 Kamau E.H., Nkhata S.G., Ayua E.O. Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes // *Food science & nutrition*. 2020. V. 8. № 4. P. 1753-1765. doi: 10.1002/fsn3.1473
- 2 Золотарёв А., Седюк И., Золотарёва С. Продуктивность дойных коров при использовании новейшей технологии кормления // *Научно-технический бюллетень Института животноводства Национальной академии аграрных наук Украины*. 2020. № 124. С. 79–88.
- 3 Moreno C.R., Fernández P.C.R., Rodríguez E.O.C., Carrillo J.M. et al. Changes in nutritional properties and bioactive compounds in cereals during extrusion cooking // *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. 2018. P. 104-124. doi: 10.5772/intechopen.68753
- 4 Микаэли В. Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты; пер. с англ. яз.; под ред. В.П. Володина. СПб: Профессия, 2007. 472 с.
- 5 Чуприна Е.Г., Власов А.Б., Юрин Д.А., Юрина Н.А. Кормовой продукт в рационах новотельных коров, состоящий из защищенного соевого и подсолнечного белка // *Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство*. 2020. № 10 (183). С. 24–32. doi: 10.33920/sel-05-2010-03
- 6 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Дерканосова А.А., Михайлова Н.А. и др. Математическое обеспечение процесса экструдирования аномально-вязких сред методами планирования эксперимента // *Вестник ВГУИТ*. 2018. № 3. С. 37–42. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-37-42
- 7 Nikmaram N., Leong S.Y., Koubaa M., Zhu Z. et al. Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: An overview // *Food control*. 2017. V. 79. P. 62-73. doi: 10.1016/j.foodcont.2017.03.027
- 8 Николаев В. Н., Яворский В.И. Анализ процесса экструзии кормов и совершенствование экструдера // *Вестник ЧГАА*. 2015. Т. 71. С. 61-66.
- 9 Мартынова Д.В. и др. Разработка математической модели экструзии зернового белково-клетчатко-крахмалосодержащего сырья на шнековом пресс-экструдере // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017. № 1 (63).
- 10 Янова М. А. Влияние технологических параметров на изменение содержания белка при производстве муки методом экструдирования // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2015. № 4. С. 25-28.
- 11 Bordoloi R., Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters // *Indian Journal of Scientific Research and Technology*. 2014. V. 2. № 1. P. 1-3.
- 12 Bader Ul Ain H., Saeed F., Khan M.A., Niaz B. et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble // *Food science & nutrition*. 2019. V. 7. № 6. P. 2059-2067. doi: 10.1002/fsn3.1041

- 13 Peng W.X., Marchal J.L.M., Van der Poel A.F.B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing // *Animal Feed Science and Technology*. 2018. V. 237. P. 129-153. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2018.01.017
- 14 Kaur G.J. et al. Development of multigrain breakfast cereal using extrusion technology // *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 2015. V. 34. № 3. P. 219. doi: 10.5958/0976-0563.2015.00043.3
- 15 Meza S.L.R. et al. Production of innovative gluten-free breakfast cereals based on red and black rice by extrusion processing technology // *Journal of food science and technology*. 2019. V. 56. № 11. P. 4855-4866. doi: 10.1007/s13197-019-03951-y
- 16 Alqaisi O., Moraes L.E., Ndambi O.A., Williams R.B. Optimal dairy feed input selection under alternative feeds availability and relative prices // *Information Processing in Agriculture*. 2019. V. 6. № 4. P. 438-453. doi: 10.1016/j.inpa.2019.03.004
- 17 Amid S., Gundoshmian T.M., Shahgoli G., Rafiee S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopment analysis // *Information Processing in Agriculture*. 2016. V. 3. № 2. P. 83-91. doi: 10.1016/j.inpa.2016.03.003
- 18 Fu Q., Shen W., Wei X., Zheng P. et al. Prediction of the diet nutrients digestibility of dairy cows using Gaussian process regression // *Information Processing in Agriculture*. 2019. V. 6. № 3. P. 396-406. doi: 10.1016/j.inpa.2018.11.005
- 19 Zeyner A., Kirchof S., Susenbeth A., Südekum K.H. et al. A new protein evaluation system for horse feed from literature data // *Journal of nutritional science*. 2015. V. 4. doi: 10.1017/jns.2014.66
- 20 Chakraborty P., Shivhare U. S., Basu S. Effect of milk composition on sensory attributes and instrumental properties of Indian Cottage Cheese (chhana) // *NFS Journal*. 2021. V. 23. P. 8-16. doi: 10.1016/j.nfs.2021.02.002

### References

- 1 Kamau E.H., Nkhata S.G., Ayua E.O. Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients and bioactive components of cereals and legumes. *Food science & nutrition*. 2020. vol. 8. no. 4. pp. 1753-1765. doi: 10.1002/fsn3.1473
- 2 Zolotarev A., Sedyuk I., Zolotareva S. Productivity of dairy cows using the latest feeding technology. *Scientific and technical bulletin of the Institute of Livestock of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine*. 2020. no. 124. pp. 79-88. (in Russian).
- 3 Moreno C.R., Fernández P.C.R., Rodríguez E.O.C., Carrillo J.M. et al. Changes in nutritional properties and bioactive compounds in cereals during extrusion cooking. *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*. 2018. pp. 104-124. doi: 10.5772/intechopen.68753
- 4 Mikaeli V. *Extrusion heads for plastics and rubber: Designs and technical calculations*. SPb, Profession, 2007. 472 p. (in Russian).
- 5 Chuprina E.G., Vlasov A.B., Yurin D.A., Yurina N.A. Forage product in the diets of fresh cows, consisting of protected soy and sunflower protein. *Feeding agricultural animals and fodder production*. 2020. no. 10 (183). pp. 24-32. doi: 10.33920/sel-05-2010-03 (in Russian).
- 6 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Derkanosova A.A., Mikhailova N.A. et al. Mathematical support of the extrusion process of anomalously viscous media by methods of experiment planning. *Proceedings of VSUET*. 2018. no. 3. pp. 37-42. doi: 10.20914/2310-1202-2018-3-37-42 (in Russian).
- 7 Nikmaram N., Leong S.Y., Koubaa M., Zhu Z. et al. Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: An overview. *Food control*. 2017. vol. 79. pp. 62-73. doi: 10.1016/j.foodcont.2017.03.027
- 8 Nikolaev V.N., Yavorskiy V.I. Analysis of the process of extrusion of feed and improvement of the extruder // *Bulletin of ChGAA*. 2015. vol. 71. pp. 61-66. (in Russian).
- 9 Martynova D.V. et al. Development of a mathematical model for extrusion of grain protein-fiber-starch-containing raw materials on a screw press extruder. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2017. no. 1 (63). (in Russian).
- 10 Yanova M.A. Influence of technological parameters on the change in protein content during the production of flour by the extrusion method. *Bulletin of higher educational institutions. Food technology*. 2015. no. 4. pp. 25-28. (in Russian).
- 11 Bordoloi R., Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*. 2014. vol. 2. no. 1. pp. 1-3.
- 12 Bader Ul Ain H., Saeed F., Khan M.A., Niaz B. et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble. *Food science & nutrition*. 2019. vol. 7. no. 6. pp. 2059-2067. doi: 10.1002/fsn3.1041
- 13 Peng W.X., Marchal J.L.M., Van der Poel A.F.B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing. *Animal Feed Science and Technology*. 2018. vol. 237. pp. 129-153. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2018.01.017
- 14 Kaur G.J. et al. Development of multigrain breakfast cereal using extrusion technology. *Asian Journal of Dairy and Food Research*. 2015. vol. 34. no. 3. pp. 219. doi: 10.5958/0976-0563.2015.00043.3
- 15 Meza S.L.R. et al. Production of innovative gluten-free breakfast cereals based on red and black rice by extrusion processing technology. *Journal of food science and technology*. 2019. vol. 56. no. 11. pp. 4855-4866. doi: 10.1007/s13197-019-03951-y
- 16 Alqaisi O., Moraes L.E., Ndambi O.A., Williams R.B. Optimal dairy feed input selection under alternative feeds availability and relative prices. *Information Processing in Agriculture*. 2019. vol. 6. no. 4. pp. 438-453. doi: 10.1016/j.inpa.2019.03.004
- 17 Amid S., Gundoshmian T.M., Shahgoli G., Rafiee S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopment analysis. *Information Processing in Agriculture*. 2016. vol. 3. no. 2. pp. 83-91. doi: 10.1016/j.inpa.2016.03.003
- 18 Fu Q., Shen W., Wei X., Zheng P. et al. Prediction of the diet nutrients digestibility of dairy cows using Gaussian process regression. *Information Processing in Agriculture*. 2019. vol. 6. no. 3. pp. 396-406. doi: 10.1016/j.inpa.2018.11.005
- 19 Zeyner A., Kirchof S., Susenbeth A., Südekum K.H. et al. A new protein evaluation system for horse feed from literature data. *Journal of nutritional science*. 2015. vol. 4. doi: 10.1017/jns.2014.66
- 20 Chakraborty P., Shivhare U.S., Basu S. Effect of milk composition on sensory attributes and instrumental properties of Indian Cottage Cheese (chhana). *NFS Journal*. 2021. vol. 23. pp. 8-16. doi: 10.1016/j.nfs.2021.02.002

**Сведения об авторах**

**Валерий А. Афанасьев** д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vnii\_kp@vmail.ru

**Лариса Н. Фролова** д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, Fln-84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6505-4136>

**Константин А. Сизиков** экстерн, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ska@combikorm.ru

**Александр Н. Остриков** д.т.н., заведующий, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

**Светлана Н. Зобова** экстерн, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@yandex.ru

**Вклад авторов**

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

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about authors**

**Valerii A. Afanasiev** Dr. Sci. (Engin.), professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, vnii\_kp@vmail.ru

**Larisa N. Frolova** Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, Fln-84@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6505-4136>

**Konstantin A. Sizikov** external student, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ska@combikorm.ru

**Aleksandr N. Ostrikov** Dr. Sci. (Engin.), head of department, , technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

**Svetlana N. Zobova** external student, technology of fats, processes and devices of chemical and food productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@yandex.ru

**Contribution**

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

|                             |                                       |                                    |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Поступила</b> 12/01/2021 | <b>После редакции</b> 09/02/2021      | <b>Принята в печать</b> 02/03/2021 |
| <b>Received</b> 12/01/2021  | <b>Accepted in revised</b> 09/02/2021 | <b>Accepted</b> 02/03/2021         |