

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ВІТВОРЧАСЦІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 664.692.5

Поступила в редакцію 15.03.2016
Received 15.03.2016**В. Я. Груданов, А. Б. Торган***Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕЧЕНИЯ МАКАРОННОГО ТЕСТА В КАНАЛАХ
МАТРИЦЫ СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

В настоящее время неравномерность скоростей формирования макаронных изделий по сечению матрицы является нерешенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике. Конструкция матрицы является одним из определяющих факторов, влияющим на технико-экономические показатели работы пресса. Матрица включает в себя цилиндрический корпус с колодцами, расположенными на концентрических окружностях, установленные внутри колодцев вкладыши со сквозными формующими отверстиями, сгруппированными в гнезда, при этом наибольшее распространение в промышленности получили матрицы с различной высотой формующих отверстий ступенчато-переменного сечения. В статье предложена новая реологическая модель, с помощью которой устанавливаются соотношения между пластической и вязкой составляющей общего гидродинамического сопротивления при течении макаронного теста в канале ступенчато-переменного сечения. Разработана методика определения минимального давления формования, необходимого для преодоления пределов текучести при сдвиге (предельного сопротивления сдвигу) макаронного теста, находящегося в каналах кругового, кольцевого, прямоугольного и произвольного сечения). Показано, что в общем гидродинамическом сопротивлении преобладает вклад составляющей, обусловленной вязким сдвиговым деформированием при течении. Предложена методика приближенной расчетной оценки скоростных и силовых параметров течения макаронного теста в каналах ступенчато-переменного сечения с использованием модели Бингама. Приведены формулы для определения геометрических характеристик каналов ступенчато-переменного сечения, что позволяет выравнивать скорость выпрессовывания теста по всей рабочей поверхности матрицы. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании формующей оснастки, а также при разработке методов расчета процессов формирования макаронного теста.

Ключевые слова: сечение макаронной матрицы, формующий канал матрицы, коэффициент уплотнения теста, гидравлическое сопротивление, скорость выпрессовывания макаронных изделий, производительность пресса, отверстие ступенчато-переменного сечения, давление формования.

V. Ya. Grudanov, A. B. Torhan*The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

RHEOLOGICAL ASPECTS OF MACARONI BATTER FLOW IN CHANNELS OF MATRIX
OF STEP AND VARIABLE SECTION

Nowadays the non-uniform formation speed of macaroni products by the matrix cross section is an unsolved problem in both domestic and foreign practice. The matrix construction is one of determining factors having effect on the engineering and economic indicators of the press operation. The matrix consists of a cylindrical body with wells located on concentric circles, liners installed in the wells, with through formation openings grouped in nests, and nowadays the matrices with different heights of forming openings of step and variable section are most widely used in the industry. The article proposes a new rheological model for establishing interaction between the plastic and viscous component of the total flow resistance for macaroni batter in the channel of step and variable section. The method for determining the minimum forming pressure required to overcome the shear yield point (ultimate shearing resistance) of macaroni batter, located in the channels of circular,

ring, rectangular and arbitrary cross-section) is proposed. It is shown that contribution of component in total flow resistance dominates due to viscous shearing at flow. The method of approximate estimation of speed and force parameters of macaroni batter flow in the channels of step and variable section using the Bingham model is proposed. The formulae for determining the geometric characteristics of the channels of step and variable section are presented, allowing to align the batter pressing speed over the entire working surface of the matrix. The research results can be used for designing forming equipment, as well as for developing methods of calculation of macaroni batter formation processes.

Keywords: macaroni matrix cross-section, matrix formation channel, batter compression rate, flow resistance, macaroni products pressing speed, press performance, opening of step and variable section, forming pressure

Введение. Макароны являются весьма популярным продуктом питания среди населения многих стран мира. Популярность данных изделий подтверждают данные о потреблении данного продукта на душу населения. Так, в Италии этот показатель составляет 28 кг на человека, в других европейских странах – 9–12 кг, США – 11 кг, Российской Федерации и Республике Беларусь – 6–7 кг¹ [1–7].

Процессы формования макаронного теста широко распространены в пищевой промышленности при производстве сплошных (вермишель, лапша, спагетти) и полых (макаронные трубки, рожки) изделий. Тесто требуемого состава и влажности захватывается шнеком и последовательно проходит через четыре условно выделяемых участка прессующего корпуса макаронного пресса (рис. 1): загрузки и транспортирования (I), уплотнения (II), перемещения спрессованного теста по виткам шнека (III), нагнетания и выпрессовывания через формирующие отверстия матрицы (IV) [8, 9].

Основным рабочим узлом прессующего корпуса является матрица², отверстия которой имеют ступенчато-переменное или (реже) плавно изменяющееся сечение³, уменьшающееся от входа в матрицу до выхода из нее, где обычно устанавливается формирующая фильера [9–13].

Совершенствование теории и методов расчета формирующего оборудования является задачей, решение которой обеспечит оптимальное конструирование его узлов с целью получения продукции требуемого качества. В связи с этим возникает насущная потребность в математическом моделировании процесса формования, высокая значимость которого отмечается многими современными учеными.

Основные цели математического моделирования формования состоят в углублении физического (качественного) понимания процесса и в его количественном описании с максимально возможным приближением к реальной технологической практике. Значительный вклад в развитие математических моделей и методов расчета дозирующих зон одношнековых экструдеров внесли основоположники теории переработки полимеров Г. Шенкель, В. Elbirly, Н. Potente, J. Martin и др. [14–16]. Работу одношнековых прессов для пищевых производств изучали J. P. Melcion, J. L. Rossen, Н. И. Назаров, Ю. А. Мачихин, А. В. Горбатов и др. [17–21]. Фундаментальные исследования сложных явлений, происходящих при движении макаронного теста в прессующем корпусе и каналах матрицы, на которых базируется теория макаронного теста, были проведены Н. Н. Назаровым, Ю. А. Мачихиным [20, 22, 23].

В научно-технической литературе имеются отдельные подходы к изучению процесса формования и течения макаронного теста. Один из них основан на том, что макаронное тесто ведет себя подобно вязко-пластичной жидкости Бингама [23]. Такое допущение дается без тщательной проверки этой гипотезы и без выяснения вклада пластичной и вязкой составляющих в общее гидродинамическое сопротивление при течении теста в каналах ступенчато-переменного сечения.

¹ Статистический бюллетень: ежемесячник. – Минск : М-во статист. и анализа Респ. Беларусь, 2004. – 210 с.; Изделия макаронные. Общие технические условия : СТБ 1963-2009. – Введ. 01.07.10 (с отменой на территории Респ. Беларусь ГОСТ 875-92). – Минск : Госстандарт, 2010. – 28 с.; Колева, П. Исследование технологических макаронных свойств болгарских сортов твердой пшеницы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.01 / МГАПП. – М., 1995. – 24 с.

² Матрица для производства макаронных изделий: а.с. 491365 СССР: М. Кл. А21С11/16/ Ю. А. Лебедев, Б. А. Хохлов, Л. А. Буров ; дата публ.: 15.11.1975.; Матрица для производства макаронных изделий: а.с. 1773361 СССР: МПК 5 А21С11/16/ А. В. Горбань ; дата публ.: 12.07.1990.

³ Матрица для прессования вермишели: пат. 13326 Респ. Беларусь : МПК А21С11 / 00 (2009) / В. Я. Груданов, А. А. Бренч, А. Б. Торган, Л. Т. Ткачева; дата публ. 26.03.2010.

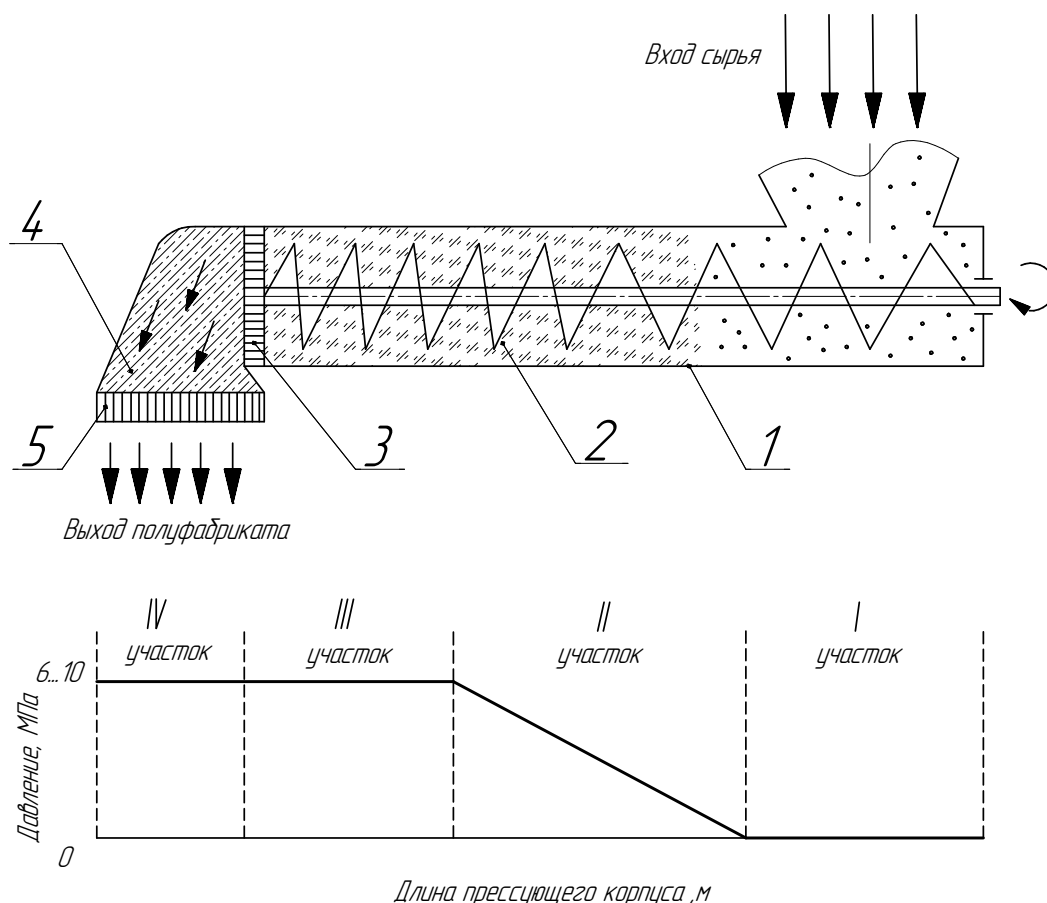


Рис. 1. Схема прессующего корпуса макаронного пересса: 1 – корпус; 2 – шнек; 3 – перфорированная решетка; 4 – предматричная камера; 5 – матрица
 Fig. 1. Diagram of pressing housing for macaroni press: 1 – housing; 2 – auger; 3 – perforated grille; 4 – pre-matrix camera; 5 – matrix

Однако тщательный анализ экспериментальных данных показывает, что решение, основанное на линейной модели Бингама, является приближенным, это также подтверждает анализ и обработка данных и таблиц [19, 24] с построением кривых $\tau = f(\dot{\gamma})$ (рис. 2).

Как видно из рис. 2, полученные зависимости нелинейны и требуют соответствующего решения.

Общие условия. Вязко-пластичное течение теста. При течении макаронного теста в канале ступенчато-переменного сечения будут две зоны (рис. 3).

В зоне 1 на периферии канала касательные напряжения τ будут больше сдвиговой прочности материала τ_0 . Следовательно, в этой зоне будет реализовываться сдвиговое течение теста. Зона 2 («ядро течения») располагается вблизи оси канала. Здесь $\tau < \tau_0$, поэтому материал будет двигаться с постоянной скоростью.

Рассмотрим схему выпрессовывания макаронных изделий и найдем взаимосвязь скорости течения и производительности канала с перепадом давления на i -м участке (рис. 4).

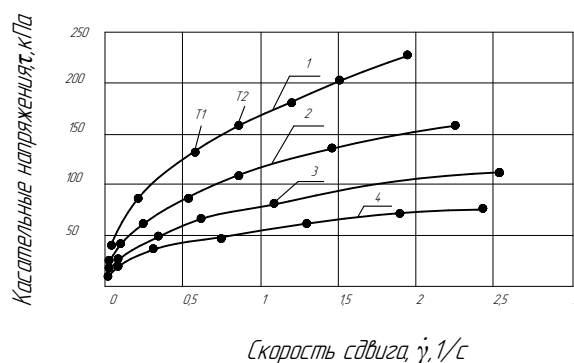


Рис. 2. График зависимости касательных напряжений τ макаронного теста из муки 1-го сорта от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ при температуре 40 °С, давлении 4,9 МПа и различной влажности: 1 – 28,5 %; 2 – 30,0 %; 3 – 31,0 %; 4 – 32,0 %
 Fig. 2. Diagram of dependence of shear stresses τ of macaroni dough made of 1st grade flour on the shear rate $\dot{\gamma}$ at temperature of 40 °С, pressure of 4.9 МПа at different humidity: 1 – 28,5 %; 2 – 30,0 %; 3 – 31,0 %; 4 – 32,0 %

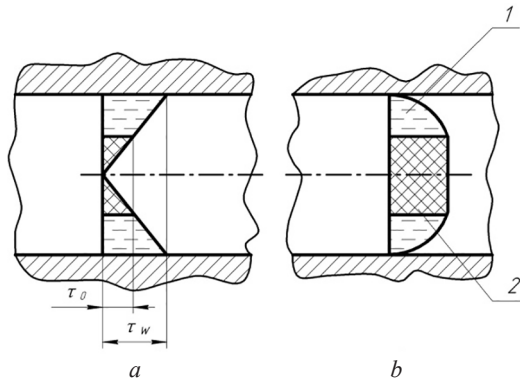


Рис. 3. Схема распределения касательных напряжений (а) и скоростей течения (б) макаронного теста в канале круглого сечения: 1 – зона сдвигового деформирования (первая зона); 2 – «ядро течения» (вторая зона); τ_w – касательное напряжение на стенках канала; τ_0 – сдвиговая прочность материала (касательные напряжения на границе раздела зон)

Fig. 3. Diagram of shear stress distribution (a) and flow rates (b) of macaroni dough in circular cross section channel: 1 – shearing zone (the first zone); 2 – “flow core” (the second zone); τ_w – shear stress on the channel walls; τ_0 – material shear strength (shear stresses on the zones border)

Поскольку $\dot{\gamma}_n = -\frac{dv}{dr}$, то зависимость (2) преобразуется в следующее дифференциальное уравнение:

$$-\frac{dv}{dr} = \left(\frac{\Delta P_i r}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^n \tag{3}$$

Для интегрирования уравнения (3) введем новую переменную

$$u_1 = \frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \tag{4}$$

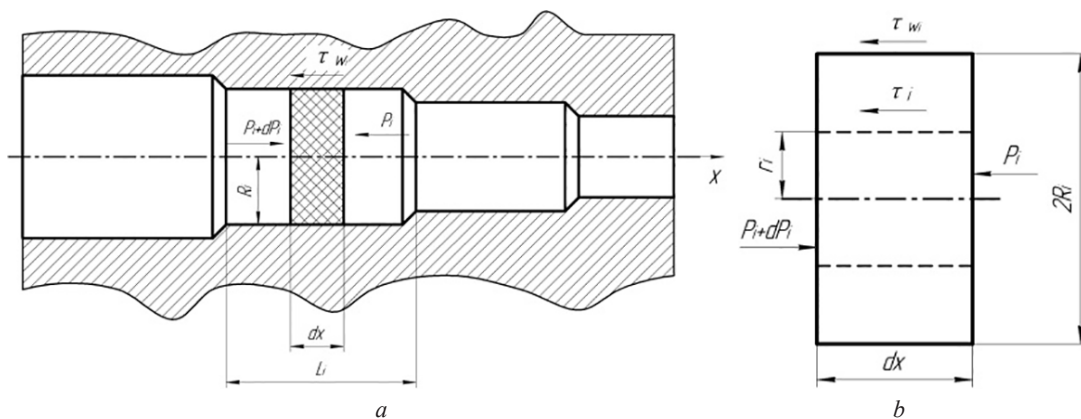


Рис. 4. Расчетная схема для определения параметров течения макаронного теста: а – схема ступенчатого канала; б – схема напряжений, действующих на элемент длиной dx и радиусом R_i ; P_i – осевое давление; dP_i – прирост давления формования; τ_w и τ_i – касательные напряжения на стенках канала и на элементе длиной dx ; R_i – радиус канала i -й ступени; r_i – радиус элемента длиной dx , L_i – длина i -го участка ступенчатого канала

Fig. 4. Calculation diagram for determination of macaroni dough flow parameters: а – diagram of stresses applied on element with width dx and radius R_i ; P_i – axial pressure; dP_i – formation pressure gain; τ_w and τ_i – shear stress on walls of channel and on element with length dx ; R_i – channel radius of i -step; r_i – radius of element with length dx , L_i – length of i -step zone of step channel

Построение нелинейной реологической модели.

Для описания реологического поведения макаронного теста примем закон Балкли-Гершеля, с целью учета нелинейности [25]:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \tag{1}$$

или в нормированном виде

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}_n^n, \tag{1, a}$$

где τ_0 – сдвиговая прочность материала (сопротивление сдвигу), МПа; k – аналог пластической вязкости (коэффициент консистенции); n – показатель степени; $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} ; $\dot{\gamma}_n = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}$ – нормированная (безразмерная) скорость сдвига; $\dot{\gamma}_n = 1 \text{ c}^{-1}$ – нормирующий множитель.

При $n = 1$ нелинейное уравнение Балкли-Гершеля преобразуется в формулу Шведова-Бингама.

Решив уравнение (1) относительно скорости сдвига, получим:

$$\dot{\gamma}_n = \left(\frac{\tau - \tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{\Delta P_i r}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \tag{2}$$

Тогда

$$du_1 = \frac{\Delta P_i}{2L_i k} dr, \quad (5)$$

$$dr = \frac{2L_i k}{\Delta P_i} du_1. \quad (6)$$

Подставив уравнения (4), (5) и (6) в формулу (3), после интегрирования получим:

$$v = -\int u_1^{\frac{1}{n}} \frac{2L_i k}{\Delta P_i} du_1 + C = C - \frac{u_1^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i}. \quad (7)$$

При помощи зависимости (4) запишем уравнение для скорости в зоне сдвигового деформирования:

$$v = v_1 = C - \frac{\left(\frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1}{n}+1}}{\frac{1}{n}+1} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (8)$$

Для нахождения постоянной интегрирования C примем условие «прилипания», согласно которому скорость материала v_1 на стенке канала ($r_i = R_i$) равна нулю.

Отсюда

$$C = \frac{\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}}}{\frac{1+n}{n}} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (9)$$

Подставив значение константы C из формулы (9) в уравнение (8), для распределения скорости v_1 по зоне сдвигового деформирования, получим:

$$v_1 = \frac{n}{n+1} \left[\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} - \left(\frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (10)$$

Определим радиус r_{0i} ядра течения, которое разделяет зону сдвигового деформирования от зоны отсутствия сдвига. На границе раздела зон касательные напряжения τ равны пределу сдвиговой прочности τ_0 .

Поставив в уравнение $\tau_i = \tau_w \frac{r_i}{R_i}$ вместо τ_i значение τ_0 , а вместо r_i – значение r_{0i} и решив полученное уравнение относительно r_{0i} , запишем

$$r_{0i} = \tau_0 \frac{2L_i}{\Delta P_i}. \quad (11)$$

Максимальная скорость v_{\max} течения макаронного теста будет на границе раздела реологических зон формирующего канала (при $r = r_0$). Ее значение можно найти, подставив r_{0i} из формулы (11) в выражение (10):

$$v_{\max} = \frac{n}{n+1} \left[\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} - \left(\frac{\Delta P_i r_{0i}}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}\right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (12)$$

Нетрудно убедиться, что второе слагаемое в скобках равно нулю. Для этого нужно подставить значение r_{0i} из уравнения (11), тогда

$$v_{\max} = C = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (13)$$

Суммарный расход (производительность) Q_i будет складываться как сумма расходов через зону сдвигового деформирования Q_{1i} и зону «ядра течения» Q_{2i} :

$$Q_i = Q_{1i} + Q_{2i}. \quad (14)$$

Величина Q_{2i} может быть определена как произведение скорости $v_{1\max}$ на площадь A «ядра течения» $A = \pi r_0^2$:

$$Q_{2i} = \pi r_0^2 v_{1\max} = \pi \left(\frac{2\tau_0 L_i}{\Delta P_i} \right)^2 \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \quad (15)$$

Объемный расход (производительность) по зоне сдвигового деформирования можно найти из следующим образом. Элементарный расход dQ_{1i} равен произведению скорости течения v_1 на элементарную площадь $dA = 2\pi r_i dr$:

$$dQ_{1i} = 2\pi r_i v_1 dr. \quad (16)$$

Подставив значения v_1 из формулы (10), получим

$$dQ_{1i} = 2\pi \frac{n}{n+1} \left[\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} - \left(\frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0 r_i dr. \quad (17)$$

Проинтегрируем уравнение (17) в пределах от r_{0i} до R_i , в результате получим уравнение для расчета производительности Q_{1i} :

$$\begin{aligned} Q_{1i} &= \int_{r_{0i}}^{R_i} 2\pi \frac{n}{n+1} \left[\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} - \left(\frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \right] \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0 r_i dr = \\ &= 2\pi \frac{n}{n+1} \left[\left(\frac{\Delta P_i R_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} \left(\frac{R_i^2 - r_{0i}^2}{2} \right) - \int_{r_{0i}}^{R_i} \left(\frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1+n}{n}} r_i dr \right] \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \end{aligned} \quad (18)$$

Вычислим интеграл, входящий в уравнение (18), с использованием метода замены переменной. Пусть $u_1 = \frac{\Delta P_i r_i}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}$; $du_1 = \frac{\Delta P_i dr}{2L_i k}$; $dr = \frac{2L_i k}{\Delta P_i} du_1$.

$$r_i = \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \left(u_1 - \frac{\tau_0}{k} \right). \quad (19)$$

Тогда

$$\begin{aligned} Y &= \int u_1^{\frac{1+n}{n}} \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \left(u_1 - \frac{\tau_0}{k} \right) \frac{2L_i k}{\Delta P_i} du_1 = \\ &= \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \int u_1^{\frac{1+n}{n}} \left(u_1 - \frac{\tau_0}{k} \right) du_1 = \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \int u_1^{\frac{1+n}{n}} \left(u_1 - \frac{\tau_0}{k} \right) du_1 = \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 u_1^{\frac{1}{n+2}} \left(\frac{u_1}{\frac{1}{n+3}} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n+2}} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

При помощи уравнения (19), вернувшись от u_1 к исходной переменной r_i , получим

$$\begin{aligned}
 Y &= \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_i r_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+2} \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_i r_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] \Bigg|_{r_{0i}}^{R_i} = \\
 &= \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left\{ \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+2} \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{\Delta P_i r_{0i} - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+2} \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_i r_{0i} - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] \right\}. \tag{21}
 \end{aligned}$$

Так как $\frac{\Delta P_i r_{0i} - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} = 0$, то

$$Y = \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+2} \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right]. \tag{22}$$

Подставив значение интеграла Y из формулы (22) в уравнение (18), окончательно запишем уравнение для расчета объемного расхода (производительности) по зоне сдвигового деформирования:

$$\begin{aligned}
 Q_{i1} &= 2\pi \frac{n}{n+1} \left\{ \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+1} \left(\frac{R_i^2 - r_{0i}^2}{2} \right) - \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+2} \left[\frac{\left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] \right\} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0 = \\
 &= 2\pi \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+1} \left\{ \left(\frac{R_i^2 - r_{0i}^2}{2} \right) - \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right) \left[\frac{\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] \right\} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \tag{23}
 \end{aligned}$$

Тогда суммарный расход (производительность) Q_i будет равен

$$\begin{aligned}
 Q_i = Q_{1i} + Q_{2i} &= 2\pi \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right)^{\frac{1}{n}+1} \left\{ \left(\frac{R_i^2 - r_{0i}^2}{2} \right) - \left(\frac{2L_i k}{\Delta P_i} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k} \right) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \left[\frac{\frac{\Delta P_i R_i - \tau_0}{2L_i k} - \frac{\tau_0}{k}}{\frac{1}{n}+3} - \frac{\tau_0}{k} \frac{1}{\frac{1}{n}+2} \right] + 2 \left(\frac{\tau_0 L_i}{\Delta P_i} \right)^2 \right\} \cdot \frac{2L_i k}{\Delta P_i} \dot{\gamma}_0. \tag{24}
 \end{aligned}$$

Данное уравнение позволяет более точно вычислять скорости, расходы и перепады давления в зоне сдвигового деформирования по сравнению с приближенным решением, основанным на линейной модели Шведова-Бингама. Однако для использования полученной зависимости необходимо знать численные значения реологических констант, входящих в уравнение Балкли-Гершеля. Поскольку в научно-технической литературе такие сведения отсутствуют, то возникает необходимость разработки методики определения этих констант путем обработки имеющихся кривых течения.

Определение реологических констант. Для нахождения констант k и n для точек T_1 и T_2 (см. рис. 2) запишем систему уравнений:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \eta_1 \dot{\gamma}_1 = \tau_0 + k \dot{\gamma}_1^n, \\ \tau_2 &= \eta_2 \dot{\gamma}_2 = \tau_0 + k \dot{\gamma}_2^n.\end{aligned}\quad (25)$$

Из системы уравнений, зная τ и τ_0 , получим

$$\tau_1 = \eta_1 \dot{\gamma}_1 = \tau_0 + k \dot{\gamma}_1^n, \quad (26)$$

$$\tau_2 = \eta_2 \dot{\gamma}_2 = \tau_0 + k \dot{\gamma}_2^n. \quad (27)$$

Разделив уравнение (27) на (26), получим

$$\left(\frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1}\right)^n = \frac{\eta_2 \dot{\gamma}_2 - \tau_0}{\eta_1 \dot{\gamma}_1 - \tau_0}. \quad (28)$$

Прологарифмируем уравнение (28) и выразим константу n :

$$n = \frac{\ln \frac{\eta_2 \dot{\gamma}_2 - \tau_0}{\eta_1 \dot{\gamma}_1 - \tau_0}}{\ln \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1}}. \quad (29)$$

Константу k находим из уравнения (27) или (26) соответственно:

$$k = \frac{\eta_1 \dot{\gamma}_1 - \tau_0}{\dot{\gamma}_1^n} \text{ или } k = \frac{\eta_2 \dot{\gamma}_2 - \tau_0}{\dot{\gamma}_2^n}. \quad (30)$$

Расчетные значения констант k и n для наиболее распространенного состава теста при температуре 40 °С приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Расчетные значения констант k и n для теста при температуре 40 °С

Table 1. Calculated values of constants k and n for test at temperature of 40 °С

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Значение реологических констант	
	n	k , кПа
0,020	0,471	102,79
0,098	0,457	110,47
0,280	0,488	112,18
0,530	0,503	111,72
0,890	0,492	111,60
1,440	0,427	111,05

Анализ данных табл. 1 показывает хорошую воспроизводимость результатов. Среднее значение коэффициента n составляет 0,473 и k – 109,97 кПа.

Таким образом, нелинейная вязкопластическая модель Балкли-Гершеля с достаточной точностью описывает реологическое поведение макаронного теста в производственных условиях.

Оптимизация конструкции матрицы. Новые технические решения. Принципиально-конструктивная схема матрицы с каналами ступенчато-переменного сечения приведена на рис. 5. Матрица для прессования вермишели содержит плоский перфорированный диск 1 диаметром D_m постоянной толщины и общей площадью S_m , отверстия перфорации 2 выполнены ступенчато по толщине матрицы, при этом высота ступеней и их диаметры уменьшаются по ходу движения теста в сторону выходной формирующей щели 3. Матрица по толщине диска 1 в горизонтальной плоскости условно разделена на ряд ступенчатых зон. Зона I образована предматричной камерой 4 и входным отверстием 5 диаметром $d_{отв}$. Зона II образована переходом входного отверстия 5 в отверстие 6 диаметром d_1 , зона III образована отверстием 6 и отверстием 7 диаметром d_2 . Зона IV образуется переходом отверстия 7 в формирующую щель 3 диаметром $d_{щ}$; $z_{отв}$ – входные отверстия перфорации 2 матрицы. Стрелками показано направление движение теста. Рабочее положение матрицы горизонтальное [13].

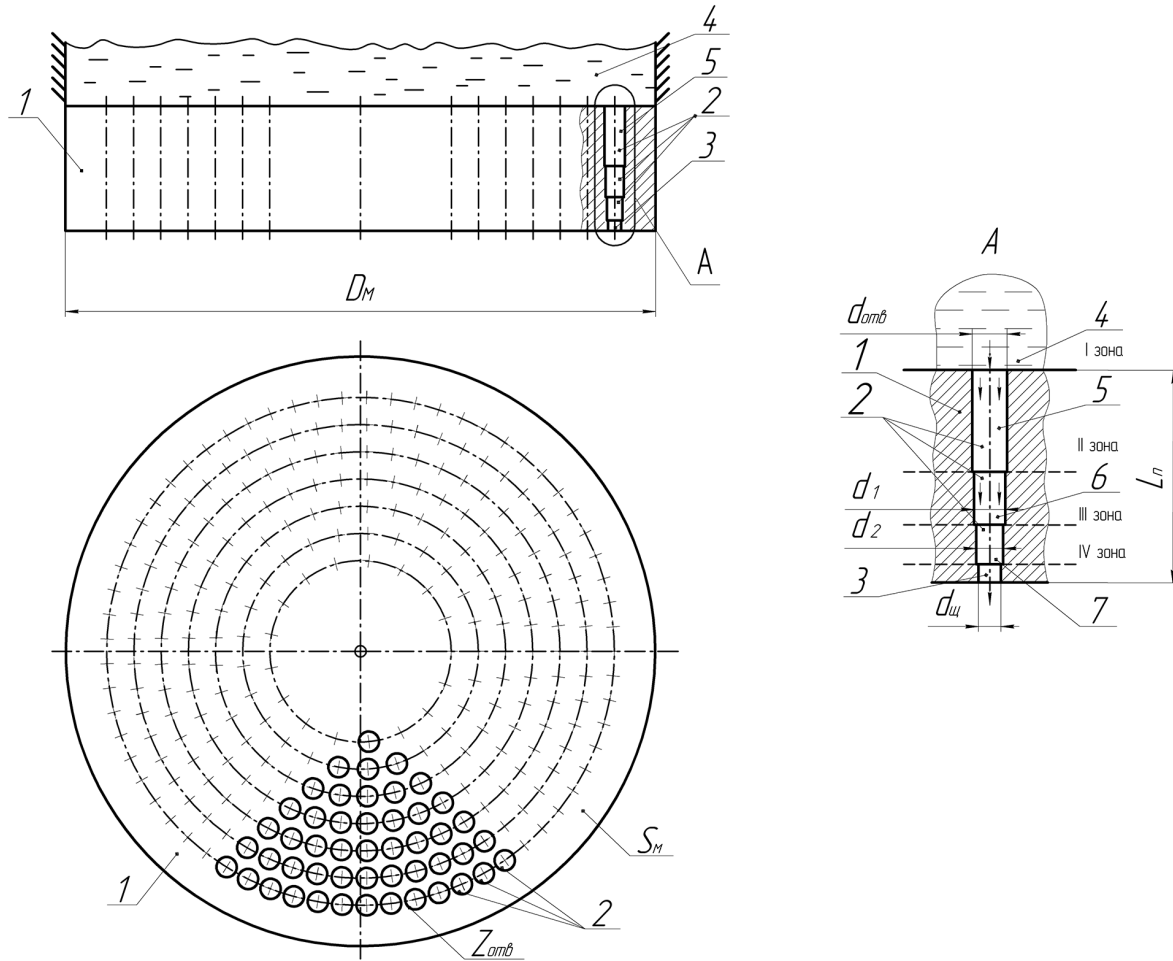


Рис. 5. Принципиально-конструктивная схема матрицы с каналами ступенчато-переменного сечения: 1 – матрица; 2 – отверстия матрицы; 3 – формирующая щель; 4 – предматричная камера; 5 – входное отверстие I зоны; 6 – отверстие II зоны; 7 – отверстие III зоны; D_M – диаметр матрицы; S_M – площадь матрицы; $z_{отв}$ – количество входных отверстий матрицы; $d_{отв}$ – диаметр входного отверстия матрицы; d_1 – диаметр входного отверстия первой ступени; d_2 – диаметр входного отверстия второй ступени; $d_{щ}$ – диаметр формирующей щели; L_n – полная длина канала

Fig. 5. Basic structural matrix diagram with channels of step-and-variable cross section: 1 – matrix; 2 – matrix openings; 3 – forming gap; 4 – pre-matrix camera; 5 – I zone input opening; 6 – II zone opening; 7 – III zone opening; D_M – matrix diameter; S_M – matrix area; $z_{отв}$ – number of matrix input openings; $d_{отв}$ – diameter of matrix input opening; d_1 – diameter of the first step input opening; d_2 – diameter of the second step input opening; $d_{щ}$ – diameter of forming gap; L_n – overall length of the channel

В данном устройстве геометрические параметры матрицы и входных отверстий связаны между собой соотношением

$$\frac{S_M}{\sum f_{отв} z_{отв}} = \frac{f_{отв}}{f_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_2}{f_{щ}}, \quad (31)$$

где $f_{отв}$ – площадь входных отверстий матрицы, м; f_1 – площадь входного отверстия первой ступени, м; f_2 – площадь входного отверстия второй ступени, м; $f_{щ}$ – площадь формирующей щели, м.

Площадь матрицы можно найти из выражения $S_M = \frac{\pi D_M^2}{4}$, а площади ступеней отверстий можно представить в следующем виде:

$$f_{отв} = \frac{\pi d_{отв}^2}{4}, \quad f_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}, \quad f_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}, \quad f_{щ} = \frac{\pi d_{щ}^2}{4}.$$

Окончательно получим такое соотношение:

$$\frac{D_M^2}{d_{отв}^2 z_{отв}} = \frac{d_{отв}^2}{d_1^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{d_2^2}{d_{щ}^2}, \quad \text{или} \quad \frac{S_M}{\sum f_{отв} z_{отв}} = \frac{d_{отв}^2}{d_1^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{d_2^2}{d_{щ}^2}. \quad (32)$$

В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, здесь оно постепенно уплотняется, освобождается от включений воздуха, становится плотной, упруго-пластичной и вязкой массой. Сформировавшееся в шнековой камере тесто нагнетается далее в небольшое предматричное пространство, заканчивающееся прессовой матрицей с постепенным уменьшением сечения ступеней входных отверстий. Из предматричной камеры 4 тесто нагнетается в отверстие 5 зоны I, затем попадает в отверстие 6 зоны II, далее – в отверстие 7 зоны III и, наконец, в формующую щель 3 зоны IV. При движении теста из зоны I в зону IV диаметры входных отверстий постоянно уменьшаются, а количество отверстий остается постоянным. Это приводит к уменьшению площади проходного (живого) сечения и, как следствие, к уплотнению и сжатию теста. Особо важно, чтобы уплотнение теста проходило постепенно и равномерно. Это позволит последовательно увеличить гидравлическое сопротивление и давление во всех ступенях входных отверстий. Данный процесс может характеризоваться коэффициентом уплотнения (сжатия), под которым понимается отношение объемов теста до и после сжатия (или до и после ступеней). С целью упрощения расчетов отношения объемов теста можно заменить отношением площадей. Тогда коэффициент уплотнения можно определить по следующим формулам:

для I зоны:

$$k_1 = \frac{S_M}{\sum f_{\text{отв}} z_{\text{отв}}}; \quad (33)$$

для II зоны:

$$k_2 = \frac{d_{\text{отв}}^2}{d_1^2}; \quad (34)$$

для III зоны:

$$k_3 = \frac{d_1^2}{d_2^2}; \quad (35)$$

для IV зоны:

$$k_4 = \frac{d_2^2}{d_{\text{ш}}^2}. \quad (36)$$

В данной матрице коэффициент уплотнения теста имеет постоянное значение для всех зон в процессе выпрессовывания теста, так как $\frac{S_M}{\sum f_{\text{отв}} z_{\text{отв}}} = \frac{d_{\text{отв}}^2}{d_1^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{d_2^2}{d_{\text{ш}}^2}$ и $k_1 = k_2 = k_3 = k_4$.

Следовательно, полученное соотношение позволяет в данной конструкции матрицы получить постепенное и равномерное увеличение гидравлического сопротивления и давления во всех ступенях отверстий по ходу движения теста через матрицу и достичь равенства коэффициента уплотнения теста. Это гарантирует более качественное формование сырья, увеличение производительности матрицы и макаронного пресса в целом и, следовательно, повышение эффективности работы устройства.

Заключение. В данной статье предложена методика расчетной оценки скоростных и силовых параметров течения макаронного теста в каналах ступенчато-переменного сечения с использованием нелинейной модели Балкли-Гершеля. Показано, что для обычно используемых в производственной практике технологических параметров формования макаронного теста (температура 40 °С, влажность 30 %) данная нелинейная реологическая модель более точно описывает сдвиговые деформации теста. Получены зависимости реологических констант (коэффициента консистенции k и показателя степени n при скорости сдвига $\dot{\gamma}$) от сдвиговой прочности материала τ_0 и пластической вязкости $\eta_{\text{пл}}$, позволяющие определять оптимальную скорость выпрессовывания макаронных изделий и объемную производительность канала ступенчато-переменного сечения. Предложена расчетная модель конструкции матрицы с каналами ступенчато-переменного сечения, в которой размеры входных отверстий канала связаны с параметрами матрицы определенным соотношением. Формующий канал условно разделен на зоны (ступени). При движении теста из одной зоны (ступени) в другую диаметры входных отверстий постоянно умень-

шаются, а количество отверстий остается постоянным. Такое понижение диаметра отверстий приводит к уменьшению площади проходного (живого) сечения и, как следствие, к уплотнению и сжатию теста. Важно, чтобы уплотнение теста проходило постепенно и равномерно. Это позволяет последовательно увеличивать гидравлическое сопротивление и давление во всех ступенях входных отверстий. Данный процесс характеризуется коэффициентом уплотнения (сжатия), который в представленной конструкции матрицы имеет одинаковое значение в каждой ступени. Новая конструкция матрицы позволяет выравнивать гидравлическое сопротивление и скорости выпрессовывания и, как следствие, увеличивать производительность прессы. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании узла формования макаронного прессы с оптимальными параметрами.

Список использованных источников

1. Рынок макаронных изделий в России // Хлебопродукты. – 2003. – №4. – С. 8–9.
2. Юсупова, Г.Г. Методы контроля качества муки по реологическим свойствам теста / Г.Г. Юсупова, О.Н. Бердышникова // Хлебопекар. пр-во. – 2011. – №2. – С. 48–53.
3. Исследование изменения реологических свойств теста из муки различных сортов пшеницы при их смешивании / Д.М. Сычева [и др.] // Техника и технология пищевых производств : тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф., 23–24 апр. 2015 г. / Могилев. гос. ун-т продовольствия ; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 78.
4. Юрчак, В.Г. Исследование структурно-механических свойств полуфабрикатов при производстве макаронных изделий с сухим яичным белком / В.Г. Юрчак, Т.П. Голикова, А.А. Альсаид // Хлебопечение России. – 2008. – №2. – С. 14–16.
5. Пшенишнюк, Г.Ф. Биохимические свойства зерна мягких и твердых сортов пшеницы / Г.Ф. Пшенишнюк, А.И. Рыбак // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1988. – №5. – С. 32–34.
6. Шнейдер, Т.И. Научное обеспечение макаронной промышленности / Т.И. Шнейдер // Хлебопечение России. – 2002. – №3. – С. 32–35.
7. Коргина, Т.В. Расширение ассортимента макаронных изделий за счёт использования растительного сырья / Т.В. Коргина, Г.А. Осипова, Д.С. Сечина // Хлебопродукты. – 2014. – №2. – С. 39–41.
8. Груданов, В.Я. Процесс формования макаронных изделий в узлах прессования с улучшенными гидравлическими и технологическими характеристиками / В.Я. Груданов, А.Б. Торган, В.М. Поздняков // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – №2. – С. 58–65.
9. Торган, А.Б. Совершенствование конструкции матрицы шнекового макаронного прессы / А.Б. Торган, И.Е. Дацук // Агропанорама. – 2009. – №2. – С. 21–24.
10. Иванов, В.С. Установка для высокотемпературного формования макаронных изделий / В.С. Иванов, М.В. Белова // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. – 2011. – №2, ч. 1. – С. 45–48.
11. Торган, А.Б. Новые технические решения в конструировании матрицы и вкладыша макаронного прессы / А.Б. Торган, П.В. Станкевич // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : докл. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 марта 2013 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: А.А. Бренч [и др.]. – Минск, 2013. – С. 75–78.
12. Станкевич, П.В. Составные матрицы для производства макаронных изделий / П.В. Станкевич // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 окт. 2014 г. : в 2 ч. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: И.Н. Шило [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 368–371.
13. Попов, В.П. Повышение качества макаронных полуфабрикатов в результате оптимального управления реологическими свойствами макаронного теста / В.П. Попов, М.Ю. Шрейдер, А.М. Пищухин // Управление реологическими свойствами пищевых продуктов : сб. материалов 1-й науч.-практ. конф. и выст. с междунар. участием, 25–26 сент. 2008 г. / Моск. гос. ун-т пищевых пр-в ; сост. В.Я. Черных. – М., 2008. – С. 122–127.
14. Шенкель, Г. Шнековые прессы для пластмасс: принцип действия, конструирование и эксплуатация / Г. Шенкель ; пер. с нем. Г.П. Делекторского [и др.] ; под ред. А.Я. Шапиро. – Л. : Госхимиздат, 1962. – 467 с.
15. Mathematical modeling of melting of polymers in barrier-screw extruders / B. Elbirlı [et al.] // Polymer Engineering & Science. – 1983. – Vol. 23, N2. – P. 86–94.
16. Sarghini, F. Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process / F. Sarghini, A. Romano, P. Masi // J. of Food Engineering. – 2016. – Vol. 176. – P. 56–70.
17. Melcion, J.P. La cuisson-extrusion dans le domaine alimentaire: principe, applications, perspectives / J.P. Melcion, P. Colonna // Revue de l'Alimentation Animale. – 1983. – N368. – S. 45–54.
18. Rossen, J.L. Food extrusion / J.L. Rossen, R.C. Miller // Food Technology. – 1973. – Vol. 27, N8. – P. 48–53.
19. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов : справочник / А.В. Горбатов [и др.] ; под ред. А.В. Горбатова. – М. : Лег. и пищевая пром-сть, 1982. – 296 с.
20. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М. : Лег. и пищевая пром-сть, 1981. – 216 с.
21. Разработка и исследование малогабаритного прессы для производства макаронных изделий / Р.Р. Эльмесов [и др.] // Соврем. проблемы науки и образования. – 2015. – №2. – С. 145–151.

22. Стрелюхина, А. Н. Анализ и повышение качества и безопасности технологической системы макаронного производства / А. Н. Стрелюхина, С. А. Мачихин // *Хранение и перераб. сельхозсырья*. – 2008. – № 3. – С. 74–78.
23. Назаров, Н. И. Структурно-механические свойства макаронного теста / Н. И. Назаров, М. А. Калинина, Ю. В. Калинин // *Хлебопекар. и кондитер. пром-сть*. – 1971. – № 2. – С. 18–20.
24. Артемьева, Н. Н. Структурно-механические характеристики макаронных изделий – объективные показатели их качества / Н. Н. Артемьева, С. А. Давыдова // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та*. – 2007. – № 3. – С. 130–134.
25. Торган, А. Б. Анализ реологических аспектов течения макаронного теста в каналах ступенчато-переменного сечения с использованием нелинейной модели Балкли-Гершеля / А. Б. Торган // *Пищевая пром-сть: наука и технологии*. – 2015. – № 3 (29). – С. 64–71.

References

1. *Rynek makaronnych izdeliy v Rossii* [Pasta market in Russia]. *Khleboпродукты* [Bakery], 2003, no. 4, pp. 8–9. (In Russian).
2. Yusupova G.G., Berdyshnikova O.N. *Metody kontrolya kachestva muki po reologicheskim svoystvam testa* [Quality control methods in respect of rheological properties of dough]. *Khlebopekarnoe proizvodstvo* [Bakery], 2011, no. 2, pp. 48–53. (In Russian).
3. Sycheva D.M., Nelyubina E.V., Franchenko E.S., Bus'ko E.S. *Issledovanie izmeneniya reologicheskikh svoystv testa iz muki razlichnykh sortov pshenitsy pri ikh smeshivanii* [Study of rheological properties changes of dough made from flour of different wheat varieties to be mixed]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv : tezisy dokladov X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 23–24 aprelya 2015 g.* [Technology of food production: book of abstracts of the X International scientific and technical conference, 23–24 April 2015]. Mogilev, 2015, pp. 78. (In Russian).
4. Yurchak V.G., Golikova T.P., Al'said A.A. *Issledovanie strukturno-mekhanicheskikh svoystv polufabrikatov pri proizvodstve makaronnykh izdeliy s sukhim yaichnym belkom* [Study of structural and mechanical properties of semi-finished products when producing pasta with dried egg white]. *Khlebopechenie Rossii* [Russian Bakery], 2008, no. 2, pp. 14–16. (In Russian).
5. Pshenishnyuk G.F., Rybak A.I. *Biokhimicheskie svoystva zerna myagkikh i tverdykh sortov pshenitsy* [Biochemical properties of grain of soft and durum wheat]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* [Proceedings of the Universities. Food Technology], 1988, no. 5, pp. 32–34.
6. Shneyder T.I. *Nauchnoe obespechenie makaronnoy promyshlennosti* [Scientific support of pasta industry]. *Khlebopechenie Rossii* [Bakery Russia], 2002, no. 3, pp. 32–35. (In Russian).
7. Korgina T.V., Osipova G.A., Sechina D.S. *Rasshirenie assortimenta makaronnykh izdeliy za schet ispol'zovaniya rastitel'nogo syr'ya* [Expanding the range of pasta through the use of vegetable raw materials]. *Khleboпродукты* [Bakery], 2014, no. 2, pp. 39–41. (In Russian).
8. Grudanov V.Ya., Torgan A.B., Pozdnyakov V.M. *Protsess formovaniya makaronnykh izdeliy v uzlakh pressovaniya s uluchshennymi gidravlicheskimi i tekhnologicheskimi kharakteristikami* [Process of forming pasta in pressing units with improved hydraulic and technological characteristics]. *Vestsi Natsyyanal'nay akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical series], 2013, no. 2, pp. 58–65. (In Russian).
9. Torgan A.B., Datsuk I.E. *Sovershenstvovanie konstruksii matritsy shnekovogo makaronnogo pressa* [Improving the design of the matrix of a screw pasta press]. *Agropanorama* [Agropanorama], 2009, no. 2, pp. 21–24. (In Russian).
10. Ivanov V.S., Belova M.V. *Ustanovka dlya vysokotemperaturnogo formovaniya makaronnykh izdeliy* [Appliance for high-temperature formation of pasta]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University Bulletin], 2011, no. 2, pt. 1, pp. 45–48. (In Russian).
11. Torgan A.B., Stankevich P.V. *Novye tekhnicheskie resheniya v konstruirovani matritsy i vkladyshe makaronnogo pressa* [New technical solutions in the design of matrix and liner of macaroni press]. *Pererabotka i upravlenie kachestvom sel'skokhozyaystvennoy produktsii: doklady mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 21–22 marta 2013 g.* [Processing and quality control of agricultural products: reports of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, March 21–22, 2013]. Minsk, 2013, pp. 75–78. (In Russian).
12. Stankevich P.V. *Sostavnye matritsy dlya proizvodstva makaronnykh izdeliy* [Composite matrix for the production of pasta]. *Tekhnicheskoe i kadrovoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Minsk, 23–24 oktyabrya 2014 g.* [Technical support and staffing of innovative technologies in agriculture: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Minsk, October 23–24, 2014], Minsk, 2014, vol. 1, pp. 368–371. (In Russian).
13. Popov V.P., Shreyder M.Yu., Pishchukhin A.M. *Povyshenie kachestva makaronnykh polufabrikatov v rezul'tate optimal'nogo upravleniya reologicheskimi svoystvami makaronnogo testa* [Improving the quality of semi-finished pasta as a result of optimal control of rheological properties of pasta]. *Upravlenie reologicheskimi svoystvami pishchevykh produktov : sbornik materialov I-y nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki s mezhdunarodnym uchastiem, 25–26 sentyabrya 2008 g.* [Management of rheological properties of food: a collection of materials of I Scientific and Practical Conference and International Exhibition, 25–26 September 2008]. Moscow, 2008, pp. 122–127. (In Russian).
14. Schenkel G. *Schneckenpressen für Kunststoffe. Wirkungsweise, Ausführung und Betrieb*. Munchen, Carl Hanser Verlag, 1959. 418 p. (Russ. ed.: Shenkel' G. Shnekovye pressy dlya plastmass: printsip deystviya, konstruirovaniye i ekspluatatsiya. Leningrad, Goskhimizdat Publ., 1962. 467 p.)
15. Elbirli B., Lindt J.T., Gottgetreu S.R., Baba S.M. Mathematical modeling of melting of polymers in barrier-screw extruders. *Polymer Engineering & Science*, 1983, vol. 23, no. 2, pp. 86–94. doi: 10.1002/pen.760230207.

16. Sarghini F., Romano A., Masi P. Experimental analysis and numerical simulation of pasta dough extrusion process. *Journal of Food Engineering*, 2016, vol. 176, pp. 56–70. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2015.09.029.
17. Melcion J.P., Colonna P. La cuisson-extrusion dans le domaine alimentaire: principe, applications, perspectives. *Revue de l'Alimentation Animale*, 1983, no. 368, pp. 45–54.
18. Rossen J.L., Miller R.C. Food extrusion. *Food Technology*, 1973, vol. 27, no. 8, pp. 48–53.
19. Gorbatov A.V. (ed.) *Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov* [Structural and mechanical characteristics of foodstuffs]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ. 1982. 296 p. (In Russian).
20. Machikhin Yu.A., Machikhin S.A. *Inzhenernaya reologiya pishchevykh materialov* [Engineering rheology of food materials]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981. 216 p. (In Russian).
21. El'mesov R.R., Didanov A.M., Tlishev A.B., Didanov M.Ts. *Razrabotka i issledovanie malogabaritnogo pressa dlya proizvodstva makaronnykh izdeliy* [Development and research of small-size press for pasta production]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2015, no. 2, pp. 145–151. (In Russian).
22. Strelyukhina A.N., Machikhin S.A. *Analiz i povyshenie kachestva i bezopasnosti tekhnologicheskoy sistemy makaronnogo proizvodstva* [Analysis and improvement of the quality and safety of the technological system of pasta production]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and Processing of Farm Products], 2008, no. 3, pp. 74–78. (In Russian).
23. Nazarov N.I., Kalinina M.A., Kalinin Yu.V. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva makaronnogo testa* [Structural and mechanical properties of pasta]. *Khlebopekarnaya i konditerskaya promyshlennost'* [Bakery and Confectionery Industry], 1971, no. 2, pp. 18–20. (In Russian).
24. Artem'eva N.N., Davydova S.A. *Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki makaronnykh izdeliy – ob'ektivnye pokazateli ikh kachestva* [Structural and mechanical characteristics of pasta – objective indicators of quality]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Journal of Astrakhan State Technical University], 2007, no. 3, pp. 130–134. (In Russian).
25. Torgan A.B. *Analiz reologicheskikh aspektov techeniya makaronnogo testa v kanalakh stupenchato-peremennogo secheniya s ispol'zovanie nelineynoy modeli Balkli-Gershelya* [Analysis of rheological aspects of pasta flow in step-variable cross-section channels with the use of nonlinear Herschel-Bulkley models]. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii* [Food Industry: Science and Technology], 2015, no. 3 (29), pp. 64–71. (In Russian).

Информация об авторах

Груданов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220124 г. Минск, Республика Беларусь).

Торган Анна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220124 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anechkat@tut.by.

Для цитирования

Груданов, В.Я. Реологические аспекты течения макаронного теста в каналах матрицы ступенчато-переменного сечения / В.Я. Груданов, А.Б. Торган // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2017. – №1. – С. 109–121.

Information about the author

Grudanov Vladimir Ya. – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220124, Republic of Belarus).

Torhan Anna B. – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., Minsk 220124, Republic of Belarus). E-mail: anechkat@tut.by

For citation

Grudanov V. Ya., Torhan A. B. Rheological aspects of macaroni batter flow in channels of matrix of step and variable section. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, agrarian series*, 2017, no 1, pp. 109–121.