

УДК 664.692.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В МАТРИЦАХ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Груданов В.Я., д.т.н.,

Торган А.Б., ст. преподаватель

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет»*

Тел. (017) 285-78-97

Аннотация – данная работа посвящена разработке математической модели процесса формования макаронных изделий, выявлены основные закономерности, влияющие на скорость выпрессовывания макаронных изделий, энергозатраты, производительность и качество готовых полуфабрикатов.

Ключевые слова – модель, макаронный пресс, матрица, скорости выпрессовывания макаронных изделий, реологические свойства макаронного теста, производительность макаронного пресса.

Постановка проблемы. В соответствии с государственной программой импортозамещения на 2006-2010 годы важнейшей народнохозяйственной задачей в области науки и инновационных технологий является проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных, прежде всего, на снижение зависимости страны от импорта товаров (работ, услуг) за счет удовлетворения внутреннего спроса высококачественной продукции собственного производства, повышения эффективности использования импортируемых энергетических и сырьевых ресурсов, видов производств, обеспечивающих потребности внутреннего рынка высококачественными конкурентоспособными товарами, аналогичными импортируемым в республику, что в полной мере относится к итальянским технологическим линиям по производству макаронных изделий, установленным в настоящее время на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов».

В то же самое время, как показывает опыт эксплуатации, даже самое современное зарубежное оборудование имеет ряд существенных недостатков в части экономии энергоресурсов, качества продукции и производительности. Так, например, итальянские матрицы фирмы Landucci не выдерживают плановых сроков эксплуатации (2000 часов), а их формующие механизмы не удовлетворяют технологическим требованиям по качеству уплотнения, пластификации и формованию

макаронних изделий. При этом, из-за неравномерной скорости выпрессовывания изделий имеет место закручивание полуфабрикатов, их слипание и хрупкость при различной длине, что приводит к увеличению количества отходов и снижению эффективности работы прессы в целом.

Раскрытие сущности происходящих процессов при формировании макаронных изделий и отмеченные выше недостатки служат основой для совершенствования существующего оборудования и создания новых рабочих органов узлов прессы.

Анализ прошлых исследований. До настоящего времени не в полной мере созданы научно-практические и методологические основы для проведения высококачественного процесса формирования макаронных изделий, что обуславливает необходимость проведения специальных теоретических и экспериментальных исследований, которые должны, прежде всего, базироваться на классических работах Н.И. Назарова, Г.М. Медведева, У.Л. Уилкинсона, Д.М. Мак-Келви, Д.Х. Чанта, Г.В. Виноградова, Н.Б. Урьева, Ю.А. Мачихина, С.А. Мочихина, В.М. Азарова, Б.А. Николаева, В.А. Силина, А.В. Горбатова, В.П. Юрьева, А.Н. Богатырева, В.В. Лукьянова и др.

Цель данной работы. Повышение качества формирования макаронных изделий на основе создания новых конструкций формирующих механизмов за счет оптимизации процесса формирования теста на всех его стадиях при минимальных удельных энергозатратах, высоком качестве и наибольшей производительности.

Математическая модель процесса формирования макаронных изделий. Тесто представляет собой поток реологической жидкости, формируется в каналах прессы и поступает в предматричную зону, из которой выдавливается через отверстия в матрице. Для исследования движения потока теста через формирующие отверстия матрицы прессы рассмотрим течение жидкости в ступенчатом цилиндрическом канале. Принимаем, что поток продукта при подходе к предматричной зоне уже установился и его течение можно считать стационарным.

Для каждого канала можно записать систему дифференциальных уравнений неизотермического течения сплошной среды. Рассматриваем асимметричное движение среды, которое моделируется двухмерным течением. В этом случае тангенциальная составляющая скорости равна нулю. Так как течение теста является стационарным, а сплошная среда - аномально-вязкой и несжимаемой, то, пренебрегая массовыми силами, которые малы вследствие довольно большой вязкости, дифференциальные уравнения можно представить в цилиндрической системе координат в виде [1]

– уравнения несжимаемости

$$(\partial v_z / \partial z) + (v_r / r) - (\partial v_r / \partial r) = 0; \quad (1)$$

– уравнения движения

$$p \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2}; \quad (2)$$

$$p \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]; \quad (3)$$

– уравнение энергии

$$\rho c \left(v_z \frac{\partial T}{\partial z} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \Phi, \quad (4)$$

где Φ – функция диссипации, характеризующая интенсивность преобразования кинетической энергии в тепловую.

Уравнения (2) и (3) характеризуют характер течения теста, определяют величину гидравлического сопротивления процесса, скорость выпрессовывания и, как следствие, производительность.

Фактическую производительность прессы можно принять по производительности матрицы и рассчитать по формуле

$$\Pi = 3600 \cdot v_n \cdot \rho_T \cdot f_k \cdot n \cdot \frac{(100 - W_T)}{(100 - W_{изд})}, \quad (5)$$

где v_n – скорость выпрессовывания теста, м/с;

ρ_T – плотность спрессованного теста, кг/м³;

f_k – площадь живого сечения канала вкладыш-фильеры, м²;

n – количество вкладыш-фильер матрицы, шт.;

W_T – влажность теста, %;

$W_{изд}$ – влажность готовых изделий, %.

В выражении (5) почти все переменные известны, при этом особый интерес, вызывает определение теоретической скорости выпрессовывания теста, так как от ее значения и равномерности будет зависеть производительность макаронного прессы, а также качество готового продукта.

Скорость выпрессовывания макаронных изделий. Основными величинами, характеризующими режим прессования, является давление, оказываемое рабочими органами прессы на тесто, и скорость выпрессовывания изделий.

Скорости прессования теста через формирующие отверстия матрицы крайне неравномерны по сечению вкладыш-фильеры, что, в конечном

счете, ведет к снижению производительности прессы. На рис. 1 приведены экспериментальные эпюры температуры теста, давлений и скоростей прессования изделий через формующие отверстия круглой матрицы прессы типа ЛПЛ-2М [2].

Из рис. 1 видно, что при скоростях выпрессовывания от $v_{min}=0,0083$ м/с и до $v_{max}=0,03$ м/с, имеет место ламинарный характер течения теста.

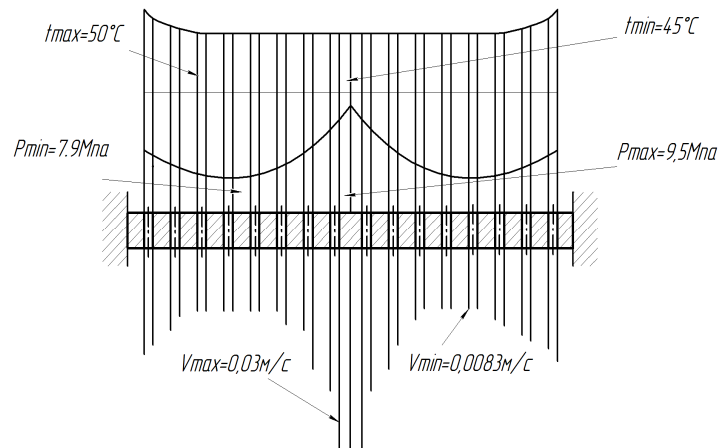


Рис. 1. Эпюры температуры теста, давлений прессования и скоростей выпрессовывания изделий.

Предположим, что через него под действием разности давлений у входного и выходного отверстий канала протекает тесто с заданным коэффициентом вязкости. Учитывая симметричность поперечного сечения канала, можно предположить, что скорость теста во всех точках, равноотстоящих от стенки, одна и та же; скорость же у стенки, вследствие прилипания к ней теста, равна нулю. Другими словами, скорость слоя теста зависит от его расстояния до стенки канала: $v=v(r)$ [3]. Итак, имеем ламинарное течение, при котором рабочее тесто перемещается слоями параллельно слоям теста в продольном сечении канала (рис. 2).

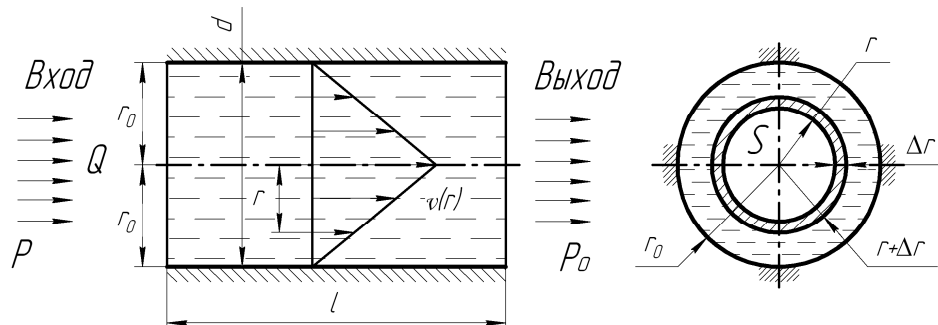


Рис. 2. Схема движения теста в цилиндрическом канале:

Q – объем теста; p – давление у входного отверстия; p_0 – давление у выходного отверстия; d – диаметр канала; r – радиус канала, S – боковая поверхность канала; r_0 – радиус канала; r – радиус цилиндра длиной Δl .

При ламинарном течении можно использовать основной закон Ньютона для вязкого течения, суть которого определяется выражением

$$F_T = \mu \frac{v_2 - v_1}{r_2 - r_1} S, \quad (6)$$

где F_T - сила внутреннего трения, Н;

S - площадь слоя, м²;

v_1 и v_2 - скорости слоев, отстоящих от стенки канала на расстояниях r_1 и r_2 соответственно;

μ - коэффициент вязкости, Па·с.

Пусть длина канала l , давления у ее входного и выходного отверстий соответственно p и p_0 . Зная основной закон вязкого течения (6), получим дифференциальное уравнение для скорости течения теста.

Для этого выделим в канале элементарный цилиндр длиной Δl и радиусом r и изменим его радиус на Δr (рис. 2).

Этот цилиндр будет испытывать трение, сила которого согласно закону Ньютона будет равна

$$\Delta F_m = \mu \frac{\Delta v}{\Delta r} \Delta S = \mu \frac{\Delta v}{\Delta r} 2\pi r \Delta l. \quad (7)$$

Силе трения противодействует сила давления, которая равна ΔF_T и противоположна ей по направлению, т.е.

$$\Delta F_T = -\pi r^2 \Delta P, \quad (8)$$

где πr^2 - площадь основания элементарного цилиндра;
 $P = p - p_0$.

Приравняв правые части двух последних равенств для ΔF_T и проведя соответствующие преобразования, получим

$$v = \frac{1}{4\mu} \frac{p - p_0}{l} (r_0^2 - r^2). \quad (9)$$

Выделим в поперечном сечении канала элементарное кольцо радиусом r и толщиной Δr (рис. 2) и найдем его площадь Δf как разность площадей двух кругов с радиусами $r + \Delta r$ и r

$$\Delta f = \pi (r + \Delta r)^2 - \pi r^2 = \pi (r^2 + 2r\Delta r + \Delta r^2) - \pi r^2 = 2\pi r \Delta r. \quad (10)$$

Тогда объем теста ΔQ , протекающий через это кольцо за 1 с, будет равен

$$\Delta Q = \Delta f v, \quad (11)$$

где V - скорость ламинарного течения, м/с.

Учитывая равенство (9) и значение Δf , получаем в дифференциальной форме

$$dQ = \frac{\pi}{2\mu} \frac{p - p_0}{l} r (r_0^2 - r^2) dr. \quad (12)$$

Формула (12) выражает закон Пуазейля, по которому определяется объем теста, протекающего за 1 с через поперечное сечение тонкого канала, при этом важно знать зависимость производительности (объема теста) матрицы и скорости процесса выпрессовывания от гидравлического сопротивления формирующих каналов. Для этого рассмотрим схему выпрессовывания макаронных изделий более подробно (рис. 3).

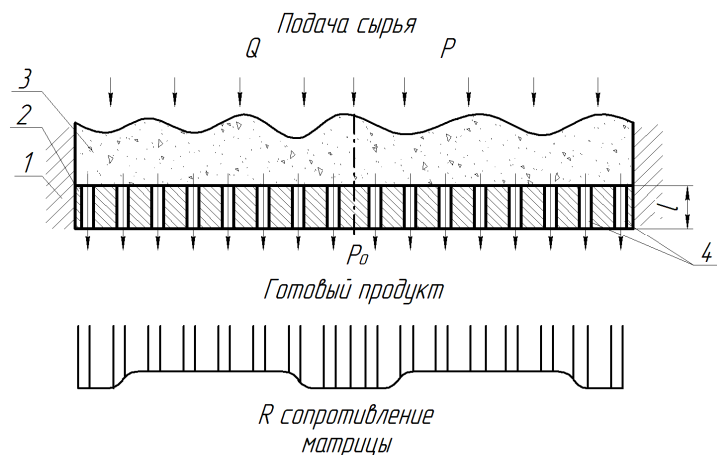


Рис. 3. Схема выпрессовывания макаронных изделий:

1 – корпус; 2 – матрица; 3 – тесто в предматричной камере; 4 – вкладыш-фильера; Q – объем сырья, м³; l – толщина матрицы (длина канала); p, p_0 – давление у входного и выходного отверстий.

Согласно теории Касаткина А.Г. скорость процесса пропорциональна движущей силе (разности давлений) и обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению формирующего

механизма. Тогда основное дифференциальное уравнение движения теста будет иметь вид

$$\frac{dQ}{S_m d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu R_m}, \quad (13)$$

где ΔP – разность давлений, Па; μ – вязкость сырья, Па·с; R_m – гидравлическое сопротивление матрицы, м⁻¹.

Приняв $Q = 0$, что соответствует началу процесса формования, когда на матрице нет сырья из (13), получаем

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu \cdot v}. \quad (14)$$

При $\mu = 1$ Н·с/м² и $v = 1$ м/с, величина $R_m = \Delta P$. Это означает, что сопротивление матрицы численно равно разности перепада давлений, необходимой для того, чтобы тесто с вязкостью 1 Н·с/м² проходило через матрицу со скоростью 1 м/с. При $\Delta P = \text{const}$ и неизменной температуре для данной конструкции все входящие в уравнение (14) величины, за исключением v и τ , постоянны.

Проинтегрируем уравнение (14) в пределах от 0 до Q и от 0 до τ , получим

$$Q = \frac{\Delta P S_m \tau}{\mu R_m}. \quad (15)$$

Уравнение (15) показывает непосредственную зависимость продолжительности процесса от объема полуфабриката (сформированных макаронных изделий) Q . Из уравнения (15) следует, что при $\Delta P = \text{const}$ по мере увеличения объема готового продукта, а, следовательно, и продолжительности процесса, скорость формования уменьшается, а с увеличением проходного (живого) сечения S скорость процесса возрастает. Из уравнения (15) также видно, что с ростом гидравлического сопротивления матрицы R_m скорость процесса уменьшается. Таким образом, совершенствование процесса формования должно проходить по следующим направлениям: увеличение проходного (живого) сечения матрицы; уменьшение гидравлического сопротивления матрицы.

В выражении (9) возможно более подробно расписать давление в предматричной камере p , которое создает сопротивление матрицы потоку теста.

Распределение давлений в канале с регулируемым выходным сечением. Установим распределение давлений в канале цилиндрической формы, выделим на расстоянии x элементарный слой материала (теста) толщиной dx (рис. 4). Слева на него действуют давление p_x , справа – $p_x + dp_x$, а по периметру – давление q_x , поэтому уравнение равновесия слоя в проекции на ось X запишется так

$$p_x f_k - (p_x + dp_x) f_k - f_m q_x u dx = 0, \quad (16)$$

где u – периметр поперечного сечения канала, м;

f_k – площадь сечения канала, м²;

f_m – коэффициент трения теста о стенки канала.

После соответствующих преобразований уравнения и интегрирования левой и правой части в пределах от p до p_x и от 0 до x , получим

$$p_x = \left(p + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \exp \left(-f_m \gamma_1 \frac{u}{f_k} x \right) - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (17)$$

Пользуясь уравнением (17), можно определить давление p_x на любом расстоянии x от предматричной камеры.

Выведем зависимость сопротивления канала с регулируемым сечением от его геометрических параметров (рис. 4). Для этого составим дифференциальное уравнение равновесия выделенного элемента теста толщиной dx_1 .

Примем f_{k_0} , u_0 и f_k , u – начальные и конечные площадь и периметр поперечного сечения канала; L_1 – длина регулируемой части канала; α – угол наклона стенки к оси канала.

Условие равновесия с учетом сил трения запишется так

$$p_{x_1} f_{k_{x_1}} - (p_{x_1} + dp_{x_1}) f_{k_{x_1}} - q_{x_1} u_{x_1} dx_1 \sin \alpha - q_{x_1} u_{x_1} dx_1 f_t \cos \alpha = 0, \quad (18)$$

где u – периметр поперечного сечения канала, м;

f_k – площадь сечения канала, м²;

f_t – коэффициент трения теста о стенки канала.

Проведя соответствующие преобразования получим уравнение, позволяющее определить осевые давления в любом сечении регулируемого канала

$$p_{x_1} = \left(p_{max} + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{кол} - 2x_1 \tan \alpha}{D_{кол}} \right) K_0 - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (19)$$

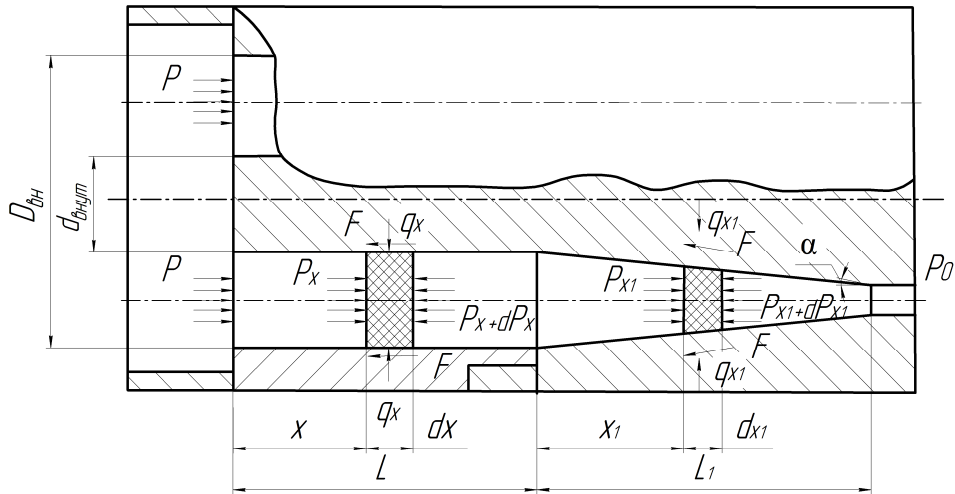


Рис. 4. Схема вкладыш-фильеры с регулируемым кольцевым каналом:

$D_{вн}$ – внешний диаметр кольца; $d_{внут}$ – внутренний диаметр кольца; p_0 – давление на выходе; p – осевое давление; p_{max} – максимальное давление канала с регулируемым сечением; L – длина цилиндрической части вкладыш-фильеры; L_1 – длина конусной части вкладыш-фильеры; q – боковое давление; F_T – сила трения.

Решив данное уравнение относительно p_{max} и приняв $x_1 = L_1$ и $p_{x_1} = p_0$ (сопротивлению на выходе), а также расписав $D_{кол}$, получим выражение максимального сопротивления канала с регулируемым сечением, которое будет иметь вид

$$p_{max} = \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{вн} - d_{внут}}{(D_{вн} - d_{внут}) - 2L_1 \tan \alpha} \right) K_0 - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (20)$$

Максимальное сопротивление вкладыш-фильеры вычисляемое по формулам (20), представляет собой противодействие при уплотнении в канале с регулируемым сечением. Приравняем правые части уравнений (19) и (20) и выразим давление теста в предматричной камере p , создаваемое сопротивлением матрицы

$$p = \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{вн} - d_{внут}}{(D_{вн} - d_{внут}) - 2L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} \exp f_m \gamma_1 \frac{4}{D_{вн} - d_{внут}} L - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (21)$$

Из выражения (21) можно выразить длину канала L_1 , необходимую для получения макаронных полуфабрикатов заданной плотности ρ , связанной с давлением p соотношением

$$L_1 = \frac{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}}{2 \tan \alpha} \left(1 - \left[\frac{p + q_0 / \gamma_1}{p_0 + q_0 / \gamma_1} \exp(-f_{\tau} \gamma_1 \frac{4}{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}} L) \right]^{-1/K_0} \right). \quad (22)$$

Подставив уравнения (9) и (21) в выражение (5) и выразив диаметры кольцевого канала через радиусы, получим выражение, позволяющее рассчитать производительность макаронного пресса

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{3600 \rho_{\tau} f_{\kappa} n}{4 \mu (L + L_1)} \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\left(\frac{r_0 - r}{(r_0 - r) - L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} \exp f_{\tau} \gamma_1 \frac{2L}{r_0 - r} - 1 \right) \times \\ & \times (r_0^2 - r^2) \left(\frac{100 - W_{\tau}}{100 - W_{\text{изд}}} \right), \quad (23) \end{aligned}$$

где r_0 и r – внешний и внутренний радиусы начального размера кольцевого канала вкладыш-фильеры, м.

Анализ данного выражения позволяет сделать вывод, что производительность макаронного пресса зависит от конструктивных, физико-механических и технологических параметров.

Результаты экспериментальных исследований. На основании теоретических и экспериментальных исследований была изготовлена конструкторская документация на матрицу и вкладыш-фильеру новой конструкции. Были проведены производственные испытания в филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» на итальянской линии фирмы FAVA. В ходе производственных испытаний выяснилось, что в процессе формования скорость выпрессовывания макаронных изделий на внешней и внутренней окружностях матрицы была неравномерна по сравнению с центральной частью, а также происходило закручивание макаронных изделий. Чтобы выровнять поток теста, было принято решение увеличить гидравлическое сопротивление матрицы на внешней и внутренней окружностях за счет уменьшения площади входных отверстий вкладыш-фильеры (рис.3). Это позволило стабилизировать поток теста, выровнять скорость выпрессовывания и получить продукцию высокого качества. В итоге производительность макаронного пресса увеличилась на 10-12 %. Годовой экономический эффект от внедрения новых формующих механизмов составил 121 млн. руб. (на один вид макаронных изделий).

Для оценки адекватности полученной математической зависимости выражения (23) проводилась дополнительная серия экспериментов по определению влияния влажности теста на производительность макаронного пресса. По полученным в ходе эксперимента данным и теоретическим расчетам построены зависимости производительности макаронного пресса от влажности теста (рис. 5).

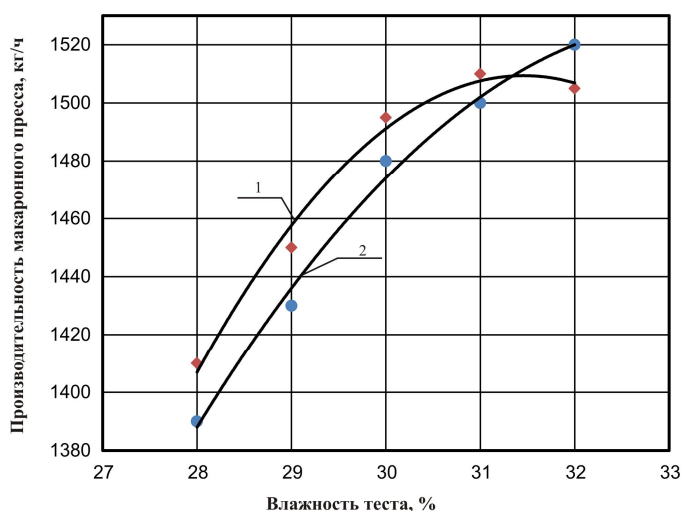


Рис. 5. Зависимость производительности макаронного пресса от влажности теста:

- 1 – экспериментальная производительность макаронного пресса;
- 2 – теоретическая производительность макаронного пресса.

Заключение. Проведенные исследования позволили математически описать процесс формования макаронных изделий и выявить основные закономерности, влияющие на скорость выпрессовывания, энергозатраты, производительность и качество готовых полуфабрикатов.

Установлено, что скорость процесса во многом определяется гидравлическим сопротивлением формирующих каналов, а качество готовых изделий зависит от характера уплотнения теста. На основе теоретических и экспериментальных исследований была разработана новая конструкция формирующих механизмов макаронных изделий, защищенная патентом РБ на изобретение № 13326 [4].

Литература:

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Москва: Химия, 1971. – 784 с.
2. Назаров Н. И. Технология макаронных изделий / Н. И. Назаров. – Москва: Пищевая промышленность, 1978. – 287 с.

3. *Скатецкий, В.Г.* Математическое моделирование физико-химических процессов / В.Г. Скатецкий – Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 144 с.

4. Матрица для прессования вермишели: пат. № 13326 Респ. Беларусь. МПК (2009). А21С11 /00/ В.Я. Груданов, А.А. Бренч, А.Б. Торган, Л.Т. Ткачева; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». – заяв. 14.04.08, опубликовано 26.03.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэл. уласн. – 2009, № 6.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В МАТРИЦАХ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Груданов В.Я., Торган А.Б.

Аннотация - описана математическая модель процесса формования макаронных изделий и выявлены основные закономерности, влияющие на скорость выпрессовывания, энергозатраты, производительность и качество готовых полуфабрикатов. Разработана новая конструкция формующих механизмов макаронных изделий с уменьшенным гидравлическим сопротивлением при увеличенном проходном сечении формующих каналов, обеспечивающих более равномерное, постепенное и последовательное уплотнение теста.

MODELING OF THE MOLDING PROCESS PASTA IN A MATRIX IMPROVED CHARACTERISTICS

V.Ya. Grudanov, H. Torhan

Summary

The paper describes a mathematical model of the forming process of pasta. Determined by the basic laws that affect the speed pressing, power consumption, performance and quality semi-finished. A new design form of the mechanism of pasta, with reduced hydraulic resistance at increased throat area forming channels, providing a more uniform and consistent compaction test.