

УДК 664.69

В. Я. ГРУДАНОВ, В. М. ПОЗДНЯКОВ, А. А. БРЕНЧ, А. Б. ТОРГАН

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФОРМОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В МАТРИЦАХ С УЛУЧШЕННЫМИ
ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступило в редакцию 15.12.2011)

Введение. Продовольственная безопасность – это крупнейшая экономическая, народнохозяйственная и общественная проблема, относящаяся к числу важнейших приоритетов любого государства, в том числе и Беларуси. В соответствии с «Концепцией национальной продовольственной безопасности Республики Беларусь» непереносимыми условиями суверенитета и продовольственной безопасности страны являются необходимость обеспечения населения продуктами питания и формирование конкурентоспособных продовольственных товаров в ассортименте и объемах, достаточных для удовлетворения спроса на внутреннем рынке. Макароны занимают достаточно большую долю в пищевом рационе населения. Многовековая практика производства традиционных макаронных изделий показывает, что спрос на данный продукт всегда высокий. В то же время существующие конструкции матриц и прессов для производства макаронных изделий в целом имеют ряд существенных недостатков, к которым следует отнести высокие удельные энергозатраты и низкое качество макаронных изделий. В связи с этим актуальным является вопрос создания новых конструкций матриц или модернизации существующих матриц для обеспечения выпуска продукции надлежащего качества.

Математическая модель формирования макаронных изделий. Тестовая масса представляет собой поток реологической жидкости, формируется в каналах пресса и поступает в предматричную зону, из которой выдавливается через отверстия в матрице. Для исследования движения потока тестовой массы через формирующие отверстия матрицы пресса 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 неизоэнтальпического течения сплошной среды. Рассматриваем асимметричное движение среды, которое моделируется двумерным течением. В этом случае тангенциальная составляющая скорости равна нулю. Так как течение тестовой массы 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 следующем виде [1]:

уравнение несжимаемости

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

уравнения движения

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

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

уравнение энергии

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

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

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

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

$$\Pi = 3600 v_{\Pi} \rho_{\Gamma} f_{\kappa} n \frac{(100 - W_{\Gamma})}{(100 - W_{\text{изд}})}, \quad (5)$$

где v_{Π} – скорость выпрессовывания тестовой массы, м/с; ρ_{Γ} – плотность спрессованной тестовой массы, кг/м³; f_{κ} – площадь живого сечения канала вкладыша-фильеры, м²; n – количество вкладышей-фильер матрицы, шт.; W_{Γ} – влажность тестовой массы, %; $W_{\text{изд}}$ – влажность готовых изделий, %.

В выражении (5) почти все переменные известны, при этом особый интерес вызывает определение теоретической скорости выпрессовывания тестовой массы, 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, являются давление, оказываемое рабочими органами прессы на тестовую массу, и скорость выпрессовывания изделий.

Скорости прессования тестовой массы через формующие отверстия матрицы крайне неравномерны по сечению вкладышей-фильер, что в конечном счете ведет к снижению производительности прессы. На рис. 1 приведены экспериментальные эпюры температуры тестовой массы, давлений и скоростей прессования макаронных изделий через формующие отверстия круглой матрицы прессы типа ЛПЛ-2М [2]. Из рисунка 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 тестовой массы. Для определения скоростей течения тестовой массы рассмотрим тонкий цилиндрический канал конечной длины (исходя из существующих конструкций формующих механизмов – вкладышей-фильер). Предположим, что через него под действием разности давлений у входного и выходного

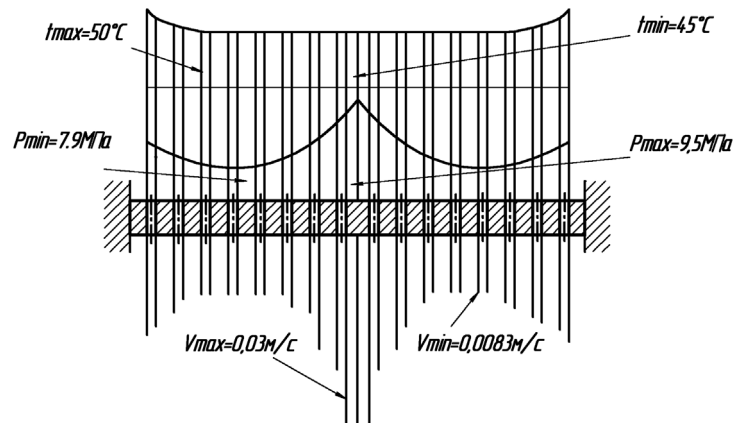


Рис. 1. Эпюры температуры тестовой массы, давлений прессования и скоростей выпрессовывания изделий

отверстий канала выпрессовывается тестовая масса с заданным коэффициентом вязкости. Учитывая симметричность поперечного сечения канала, можно предположить, что скорость тестовой массы во всех точках, равноотстоящих от корпуса пресса, одна и та же; скорость же у корпуса пресса вследствие прилипания к нему тестовой массы равна нулю. Следовательно, скорость слоя тестовой массы зависит от его расстояния до стенки канала: $v=v(r)$ [3].

Таким образом, имеем ламинарное течение – это упорядоченное течение тестовой массы, при котором она перемещается слоями, параллельно ее слоям в продольном сечении канала (рис. 2). 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, m^2 ; v_1 и v_2 – скорости слоев, отстоящих от стенки канала на расстояниях r_1 и r_2 соответственно; μ – коэффициент вязкости, $Pa \cdot c$.

Пусть длина канала l , давления у ее входного и выходного отверстий соответственно p и p_0 . Зная основной закон вязкого течения (6), получаем дифференциальное уравнение для скорости течения тестовой массы. Для этого выделим в канале элементарный цилиндр длины Δl и радиуса r и изменим его радиус на Δr (рис. 2). Этот цилиндр будет испытывать трение, сила которого, согласно закону Ньютона, будет равна

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

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 получим

$$\Delta v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\Delta P}{\Delta l} r \Delta r. \quad (9)$$

Так как поперечные сечения канала одинаковы по всей длине, то давление в нем распределяется равномерно и равно $(p - p_0)/l$, поэтому $\Delta P/\Delta l = (p - p_0)/l$. Значит,

$$\Delta v = -\frac{1}{2\mu} \frac{\Delta P}{\Delta l} r \Delta r \quad (10)$$

или в дифференциальной форме

$$dv = -\frac{1}{2\mu} \frac{p - p_0}{l} r dr. \quad (11)$$

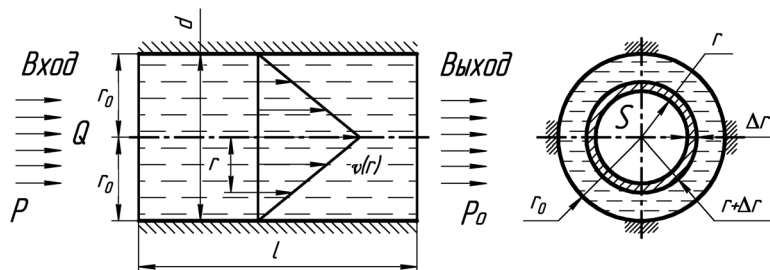


Рис. 2. Схема движения тестовой массы в цилиндрическом канале: Q – объем тестовой массы; p – давление у входного отверстия; p_0 – давление у выходного отверстия; d – диаметр канала; r – радиус канала, S – боковая поверхность канала; r_0 – радиус канала; r – радиус цилиндра длиной Δl

Дифференциальное уравнение (10) с условием $v(r_0) = 0$ является задачей Коши. Поэтому, интегрируя (11), получаем

$$\int_0^v d\alpha = -\frac{p-p_0}{2\mu l} \int_{r_0}^r \rho d\rho \quad \text{или} \quad v = \frac{1}{4\mu} \frac{p-p_0}{l} (r_0^2 - r^2). \quad (12)$$

Отметим также, что все вышеприведенные рассуждения и последняя формула справедливы для нормально вязких, так называемых ньютоновских жидкостей.

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

$$\Delta f = \pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2 = \pi(r^2 + 2r\Delta r + \Delta r^2) - \pi r^2 = 2\pi r \Delta r. \quad (13)$$

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

$$\Delta Q = \Delta f v, \quad (14)$$

где v – скорость ламинарного течения, м/с.

Учитывая равенство (12) и значение Δf , получаем

$$\Delta Q = \frac{\pi}{2\mu} \frac{p-p_0}{l} r(r_0^2 - r^2) \Delta r$$

или в дифференциальной форме

$$dQ = \frac{\pi}{2\mu} \frac{p-p_0}{l} r(r_0^2 - r^2) dr. \quad (15)$$

Наша задача – определение объема тестовой массы, протекающей за 1 с через поперечное сечение канала, если известны давление p у входного отверстия канала, давление p_0 у выходного отверстия канала, диаметр d канала, длина l , коэффициент вязкости μ и скорость течения v тестовой массы.

Если радиус изменяется от 0 до r_0 , то Q меняется от 0 до Q_0 . Интегрируя (15) в указанных пределах, получаем

$$\int_0^{Q_0} dQ = \frac{\pi}{2\mu} \frac{p-p_0}{l} \int_0^{r_0} r(r_0^2 - r^2) dr,$$

откуда

$$Q_0 = \frac{\pi}{128} \frac{p-p_0}{l} \frac{d^4}{\mu}. \quad (16)$$

Формула (15) выражает закон Пуазейля, по которому определяется объем тестовой массы, протекающей за 1 с через поперечное сечение тонкого канала, при этом важно знать зависимость производительности (объема тестовой массы) матрицы и скорости процесса выпрессовывания от гидравлического сопротивления формирующих каналов. Рассмотрим схему выпрессовывания макаронных изделий более подробно (рис. 3).

В данном процессе формования макаронных изделий скорость движения тестовой массы через вкладыши-фильеры, значение разности давлений и гидравлического сопротивления матрицы с течением времени изменяются, поэтому переменную скорости движения сырья целесообразно выразить в дифференциальной форме, используя уравнения движения (2), (3):

$$v = \frac{dQ}{S_m d\tau}. \quad (17)$$

Здесь Q – объем сырья, м³; S_m – площадь проходного (живого сечения) матрицы, м²; τ – продолжительность процесса, с.

Согласно теории А. Г. Касаткина, скорость процесса пропорциональна движущей силе (разности давлений) и обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению формирующего механизма. Тогда основное дифференциальное уравнение движения тестовой массы будет иметь вид

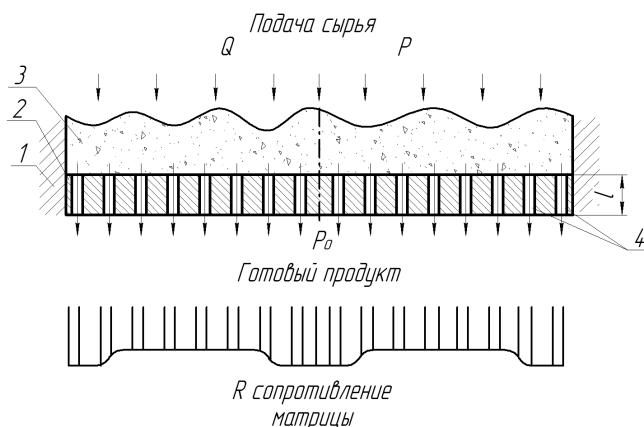


Рис. 3. Схема выпрессовывания макаронных изделий: 1 – корпус; 2 – матрица; 3 – тестовая масса в предматричной камере; 4 – вкладыш-фильера; Q – объем сырья, м^3 ; l – толщина матрицы (длина канала); p, p_0 – давление у входного и выходного отверстия соответственно

$$\frac{dQ}{S_M d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu R_M}, \quad (18)$$

где ΔP – разность давлений, Па; μ – вязкость сырья, $\text{Па} \cdot \text{с}$; R_M – гидравлическое сопротивление матрицы, м^{-1} .

Приняв $Q = 0$, что соответствует началу процесса формования, когда на матрице отсутствует тестовая масса, из уравнения (18) получаем

$$R_M = \frac{\Delta P}{\mu v}. \quad (19)$$

При $\mu = 1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ и $v = 1 \text{ м}/\text{с}$ величина $R_M = \Delta P$. Это означает, что сопротивление матрицы численно равно разности перепада давлений, необходимой для того, чтобы тестовая масса с вязкостью $1 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ проходила через матрицу со скоростью $1 \text{ м}/\text{с}$. При $\Delta P = \text{const}$ и неизменной температуре для данной конструкции все входящие в уравнение (19) величины, за исключением v и τ , имеют постоянное значение.

Проинтегрируем уравнение (19) в пределах от 0 до Q и от 0 до τ :

$$\int_0^Q \mu R_M dQ = \int_0^\tau \Delta P S_M d\tau \text{ или } \mu R_M Q = \Delta P S_M \tau,$$

тогда

$$Q = \frac{\Delta P S_M \tau}{\mu R_M}, \text{ м}^3. \quad (20)$$

Уравнение (20) показывает непосредственную зависимость продолжительности процесса от объема полуфабриката (сформованных макаронных изделий) Q . Из этого уравнения 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 (20) 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. Выражение (12) позволяет более подробно расписать давление p в предматричной камере, которое создает сопротивление матрицы потоку тестовой массы.

Распределение давлений в канале с регулируемым выходным сечением. Определим давление в канале цилиндрической формы, выделим на расстоянии x элементарный слой материала

(тестовой массы) толщиной dx (рис. 4). Слева на него действует 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:

$$p_x f_k - (p_x + dp_x) f_t - f_t q_x u dx = 0, \quad (21)$$

где u – периметр поперечного сечения канала, м; f_k – площадь сечения канала, м²; f_t – коэффициент трения тестовой массы о стенки канала.

После соответствующих преобразований уравнение примет вид

$$\frac{dp_x}{\gamma_1 p_x + q_0} + f_t \frac{u}{f_k} dx = 0.$$

Интегрируя левую и правую части уравнения в пределах от p до p_x и от 0 до x , получаем

$$\ln \frac{q_0 + \gamma_1 p_x}{q_0 + \gamma_1 p} = -\frac{u}{f_k} f_t x$$

или, решив данное уравнение относительно p_x , будем иметь

$$p_x = \left(p + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \exp \left(-f_t \gamma_1 \frac{u}{f_k} x \right) - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (22)$$

Пользуясь уравнением (22), 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 тестовой массы толщиной dx_1 .

Примем f_{k0} , 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:

$$p_{x_1} f_{kx_1} - (p_{x_1} + dp_{x_1}) f_{kx_1} - q_{x_1} u_{x_1} dx_1 \sin \alpha - q_{x_1} u_{x_1} dx_1 f_t \cos \alpha = 0, \quad (23)$$

где u – периметр поперечного сечения канал, м; f_k – площадь сечения канала, м²; f_t – коэффициент трения тестовой массы о стенки канала.

Заменив q_{x_1} через $\gamma_1 p_{x_1} + q_0$, после упрощений получим

$$-f_{kx_1} dp_{x_1} - (\gamma_1 p_{x_1} + q_0) u_{x_1} (\sin \alpha + f_t \cos \alpha) dx_1 = 0.$$

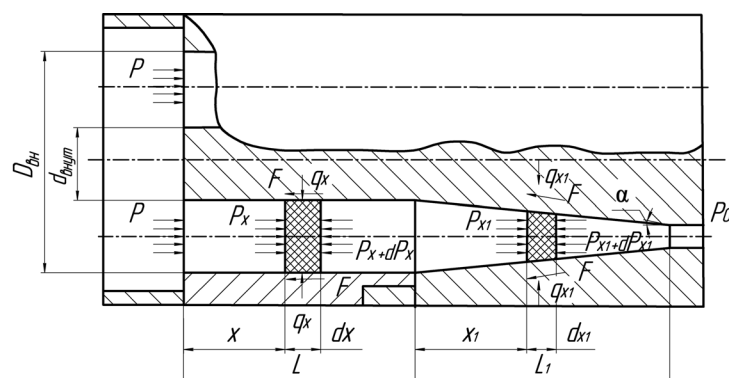


Рис. 4. Схема вкладыша-фильеры с регулируемым кольцевым каналом: $D_{вн}$ – внешний диаметр кольца; $d_{внут}$ – внутренний диаметр кольца; p_0 – давление на выходе; p – осевое давление; p_{max} – максимальное давление канала с регулируемым сечением; L – длина цилиндрической части вкладыша-фильеры; L_1 – длина конусной части вкладыша-фильеры; q – боковое давление; F_t – сила трения

Обозначив $(\sin \alpha + f_t \cos \alpha) = K$ и разделив переменные, получим

$$-\frac{dp_{x_1}}{\gamma_1 p_{x_1} + q_0} = \frac{u_{x_1}}{f_{\text{кк}_1}} K dx_1,$$

где $\frac{u_{x_1}}{f_{\text{кк}_1}}$ – отношение периметра поперечного сечения канала к его площади для координаты x_1 .

Для канала с кольцевым сечением

$$\frac{u_{x_1}}{f_{\text{кк}_1}} = \frac{4}{D_{\text{кол}} - 2x_1 \tan \alpha},$$

где $D_{\text{кол}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}} = 2(r_0 - r)$ – начальный диаметр кольцевого канала, тогда

$$-\frac{dp_{x_1}}{\gamma_1 p_{x_1} + q_0} = \frac{4K}{D_{\text{кол}} - 2x_1 \tan \alpha} dx_1.$$

После интегрирования получим

$$\frac{1}{\gamma_1} \ln(\gamma_1 p_{x_1} + q_0) = \frac{4K}{2 \tan \alpha} \ln(D_{\text{кол}} - 2x_1 \tan \alpha) + C. \quad (24)$$

Постоянную интегрирования C определим из следующих начальных условий: $x_1 = 0$, $p_{x_1} = p_{\text{max}}$. Тогда $\frac{1}{\gamma_1} \ln(\gamma_1 p_{\text{max}} + q_0) = \frac{2K}{\tan \alpha} \ln D_{\text{кол}} + C$,

откуда
$$C = \frac{1}{\gamma_1} \ln(\gamma_1 p_{\text{max}} + q_0) - \frac{2K}{\tan \alpha} \ln D_{\text{кол}}.$$

Подставляя это значение C в уравнение (24), после преобразований получаем частное решение дифференциального уравнения

$$p_{x_1} = \left(p_{\text{max}} + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{\text{кол}} - 2x_1 \tan \alpha}{D_{\text{кол}}} \right)^{K_0} - \frac{q_0}{\gamma_1}, \quad (25)$$

где $K_0 = \frac{2K\gamma_1}{\tan \alpha} = \frac{2\gamma_1}{\tan \alpha} (\sin \alpha + f_t \cos \alpha).$

Уравнение (25) позволяет определить осевые давления в любом сечении регулируемого канала. Решив это уравнение относительно $p_{\text{max}} = 0$ и приняв $x_1 = L_1$ и $p_{x_1} = p_0$ (сопротивлению на выходе), а также расписав $D_{\text{кол}}$, получим выражение максимального сопротивления канала с регулируемым сечением, которое будет иметь вид

$$p_{\text{max}} = \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}}{(D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}) - 2L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (26)$$

Максимальное сопротивление вкладышей-фильер, вычисляемое по формулам (26), представляет собой противодействие при уплотнении в канале с регулируемым сечением. Приравняв правые части уравнений (22) и (26), получим

$$\begin{aligned} \left(p + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \exp \left(-f_t \gamma_1 \frac{4}{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}} L \right) - \frac{q_0}{\gamma_1} = \\ = \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}}{(D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}) - 2L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} - \frac{q_0}{\gamma_1}, \end{aligned}$$

где L – длина прямолинейной части кольцевого канала.

Отсюда давление тестовой массы в предматричной камере p , создаваемое сопротивлением матрицы, будет равно

$$p = \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}}{(D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}) - 2L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} \exp f_{\tau} \gamma_1 \frac{4}{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}} L - \frac{q_0}{\gamma_1}. \quad (27)$$

Из выражения (29) можно выразить длину канала L_1 , необходимую для получения макаронных полуфабрикатов заданной плотности ρ , связанной с давлением p соотношением:

$$L_1 = \frac{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}}{2 \tan \alpha} \left(1 - \left[\frac{p + q_0 / \gamma_1}{p_0 + q_0 / \gamma_1} \exp \left(-f_{\tau} \gamma_1 \frac{4}{D_{\text{вн}} - d_{\text{внут}}} L \right) \right]^{-1/K_0} \right), \quad (28)$$

где $p = C \left[e^{a(\rho - \rho_0)} - 1 \right]$, $C = b/a$.

Подставив уравнения (12) и (27) в выражение (5) и выразив диаметры кольцевого канала через радиусы, получим выражение, позволяющее рассчитать производительность макаронного пресса:

$$\Pi = \frac{3600 \rho_{\tau} f_{\kappa} n}{4\mu(L + L_1)} \left(p_0 + \frac{q_0}{\gamma_1} \right) \left(\frac{r_0 - r}{(r_0 - r) - L_1 \tan \alpha} \right)^{K_0} \exp f_{\tau} \gamma_1 \frac{2L}{r_0 - r} - 1 \left(r_0^2 - r^2 \right) \left(\frac{100 - W_{\tau}}{100 - W_{\text{изд}}} \right), \quad (29)$$

где r_0 и r – внешний и внутренний радиусы начального размера кольцевого канала вкладыша-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 вкладыши-фильеры новой конструкции с оптимизированными параметрами, уменьшенным гидравлическим сопротивлением, увеличенной пропускной способностью. Опытные образцы разработанных вкладышей-фильер были изготовлены на ПРУП «Завод ЭПОС» (Минская область). Для подтверждения положительного эффекта совершенствования конструкции матрицы и вкладышей-фильер разработан и смонтирован лабораторный экспериментальный стенд, основанный на базе пресс-автомата для производства макаронных изделий МИТ-2 и контрольно-измерительной аппаратуры, соединенной с компьютерной системой контроля параметров процесса формова-

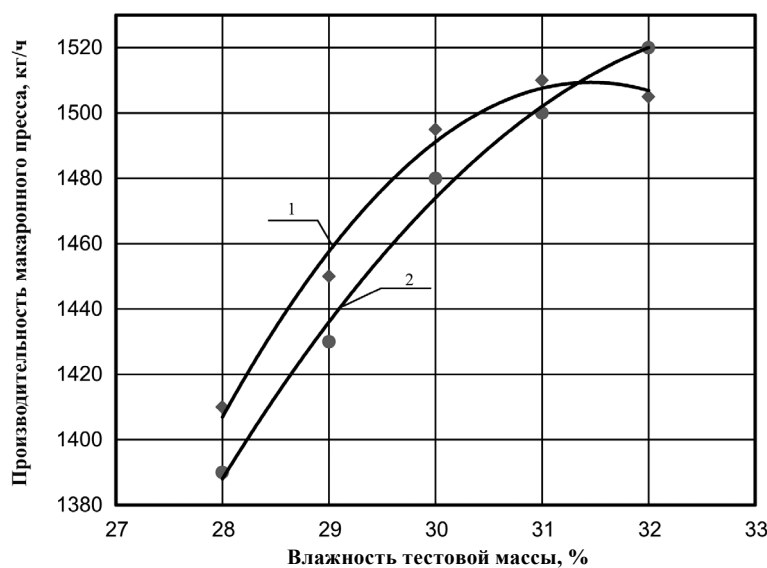


Рис. 5. Зависимость производительности макаронного пресса от влажности тестовой массы: 1 – экспериментальная производительность макаронного пресса; 2 – теоретическая производительность макаронного пресса

ния [4]. Также проведены производственные испытания на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» на итальянской линии по производству короткорезанных трубчатых макаронных изделий 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, что видно из рис. 1, а также происходило закручивание макаронных изделий. Чтобы выровнять поток тестовой массы, принято решение увеличить гидравлическое сопротивление матрицы на внешней и внутренней окружностях за счет уменьшения площади входных отверстий вкладыша-фильеры (рис. 3). Это позволило стабилизировать поток тестовой массы, выровнять скорость выпрессовывания и получить продукцию высокого качества. В результате 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 (29) проводилась дополнительная серия экспериментов по определению влияния влажности тестовой массы на производительность макаронного пресса. По полученным в ходе эксперимента данным и теоретическим расчетам построены зависимости производительности макаронного пресса от влажности тестовой массы (рис. 5).

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 формующих каналов, а качество готовых изделий зависит от характера уплотнения тестовой массы. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана новая конструкция формующих механизмов макаронных изделий, защищенная патентом РБ на изобретение № 13326 [5]. Производственные испытания опытных образцов формующих механизмов показали рост производительности на 10 – 12 % и улучшение качества готовых изделий. Новые матрицы обладают уменьшенным гидравлическим сопротивлением при увеличенном проходном сечении формующих каналов, обеспечивающих более равномерное уплотнение тестовой массы, значительно снижают энергозатраты и повышают производительность технологической линии за счет роста скорости выпрессовывания макаронных изделий, могут быть использованы вместо зарубежных аналогов.

Литература

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., 1971.
2. Назаров Н. И. Технология макаронных изделий. М., 1978.
3. Скатецкий В. Г. Математическое моделирование физико-химических процессов. Мн., 1981.
4. Груданов В. Я., Бренч А. А., Торган А. Б., Поздняков В. М. // Весці НАН Беларусі. Сер. аграрных навук. 2011. № 2. С. 103–110.
5. Груданов В. Я., Бренч А. А., Торган А. Б. Матрица для прессования вермишели. Пат. № 13326 РБ.

V. Ya. GRUDANOV, V. M. POZDNYAKOV, A. A. BRENCH, A. B. TORHAN

MATHEMATICAL MODELLING OF A PASTA MOULDING PROCESS IN A MATRIX WITH IMPROVED HYDRAULIC AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS

Summary

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