

УДК 664.692.5

Поступила в редакцию 11.04.2024
Received 11.04.2024**З. В. Ловкис¹, П. В. Станкевич², А. Б. Торган³***¹РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь**²Филиал «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, д. Светлая Роща, Борисовский район, Минская область, Республика Беларусь**³УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕСТА НА ДЕФОРМАЦИЮ МАТРИЦЫ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемные вопросы из-за несовершенства конструкции матрицы прессы для формования макаронных изделий. Определена необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований по установлению закономерности влияния внутреннего давления теста и температурных напряжений на прочность, жесткость и прогиб корпуса матрицы. Получены графические зависимости прогибов матриц под воздействием давления прессования при различных геометрических параметрах для сплошных и составных матриц. Рассмотрены тепловые процессы, протекающие в матрицах при формовании макаронных изделий, получены уравнения теплоотдачи и теплопередачи от тестовой массы к корпусу матрицы и в окружающую среду. Представлены графические зависимости выделения тепла при процессе формования макаронных изделий в зависимости от температуры и геометрических параметров матрицы (диаметр и высота). Предложены новые технические решения в конструкциях матриц, которые улучшают прочностные, теплотехнические и массовые характеристики, обуславливающие повышение качества полуфабрикатов при снижении энергозатрат и увеличении производительности прессы. Данное техническое решение позволит повысить качество формования макаронных изделий, уменьшить процент отходов, что улучшит работу автоматических линий и позволит решить вопрос по снижению зависимости отрасли Республики Беларусь от импорта дорогостоящих рабочих органов макаронных прессов (матриц).

Ключевые слова: прогиб матрицы, производительность прессы, давление прессования, температура теста, составная матрица, температурные деформации, ступенчатый зазор.

Z. V. Lovkis[№], P. V. Stankevich^I, A. B. Torgani*¹RUE “Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus” for food, Minsk, Republic of Belarus**²Branch “Institute of Retraining and Advanced Training” of the University civil protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Svetlaya Roshcha village, Republic of Belarus**³EE “Belarusian State Agrarian Technical University”, Minsk, Republic of Belarus*

INFLUENCE OF INTERNAL PRESSURE AND DOUGH TEMPERATURE FOR MATRIX DEFORMATION

Abstract. The article discusses problematic issues due to imperfections in the design of the press matrix for molding pasta. The need for theoretical and experimental research has been determined to establish the pattern of the influence of internal dough pressure and temperature stresses on the strength, rigidity and deflection of the die body. Graphic dependences of matrix deflections under the influence of pressing pressure were obtained for various geometric parameters for solid and composite matrices. The thermal processes occurring in the matrices during the formation of pasta

are considered, equations for heat transfer and heat transfer from the test mass to the matrix body and into the environment are obtained. Graphic dependences of heat release during the process of molding pasta depending on temperature and geometric parameters of the matrix (diameter and height) are presented. New technical solutions have been proposed in matrix designs that improve strength, thermal and mass characteristics, which improve the quality of semi-finished products while reducing energy costs and increasing press productivity. This technical solution will improve the quality of pasta molding, reduce the percentage of waste, which will improve the operation of automatic lines and will resolve the issue of reducing the dependence of the industry of the Republic of Belarus on the import of expensive working parts of pasta presses (matrices).

Keywords: matrix deflection, press productivity, pressing pressure, dough temperature, composite matrix, temperature deformation, step gap.

Введение. Производство макаронных изделий в Республике Беларусь начало интенсивно увеличиваться с 2007 года, что можно отнести к новому этапу развития макаронной отрасли в нашей стране. За этот период на УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт», ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» и ОАО «Лидский комбинат хлебопродуктов» были установлены современные комплексные автоматические линии производства Италии и Швейцарии по изготовлению макаронных изделий. В этом году на УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт» введено в эксплуатацию турецкое оборудование для изготовления короткорезанных макаронных изделий.

Макаронные прессы импортного производства комплектуются матрицами, произведенными в Европейском Союзе, в количестве 20–40 шт. (прямоугольной и круглой формы). Данные матрицы очень дорогостоящие (цена за единицу может достигать до 14 000 евро) и весят 40–150 кг при максимальном наружном диаметре 600 мм и толщине до 140 мм. Однако, опираясь на накопленный опыт эксплуатации [1, 2] импортного оборудования, определено, что даже современное оборудование мирового уровня имеет ряд недостатков, одним из которых является несовершенство конструкции матрицы.

Матрицы имеют недостаточную прочность и жесткость корпуса, а высокое внутреннее давление теста и температурные напряжения приводят к явному короблению рабочей поверхности (выпучиванию), что ухудшает качество отформованных изделий (увеличение объема отходов до 15 %) в виде обрезков (концов) и приводит к снижению эффективности работы линии в целом за счет дополнительного расхода брака бракованной продукции и повторного выпуска изделий [2]. В связи с этим, актуальным вопросом является импортозамещение европейской матрицы на отечественные, изготовленные с совершенно новыми конструктивно-технологическими характеристиками.

К материалам матрицы предъявляются высокие требования в отношении прочности, жесткости и стойкости к коррозии и он должен выдерживать давление, противостоять изгибу и срезающим нагрузкам, передаваемым матрице давлением теста. Само тесто представляет собой агрессивную среду из-за содержания кислореагирующих ферментов, которые окисляют металлы матриц, что приводит к чрезмерному износу поверхностей и к истиранию полировки (влияет на появление шероховатости поверхности полуфабрикатов) [3, 4].

Результаты исследований и их обсуждение. В процессе формования короткорезанных макаронных изделий матрица подвергается воздействию значительного внутреннего давления теста, при этом одновременно имеют место существенные температурные напряжения, которые приводят к короблению наружной рабочей поверхности корпуса. Поэтому с целью достижения необходимой прочности и уменьшения прогиба матрицы ее наружный диаметр и высоту вынуждены изменять в большую сторону [5, 6].

Анализ, систематизация и обобщение литературных данных [1–7] также показывают, что практически отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования по установлению закономерности влияния внутреннего давления теста и температурных напряжений на прочность, жесткость и прогиб корпуса матрицы.

В технологических машинах и аппаратах пищевых производств находят широкое применение перфорированные барабаны и тарелки жидкостных сепараторов, сетчатые обечайки шнековых прессов для сжатия жидкой фазы из обрабатываемого сырья, штампованные решетки, перфорированные металлические ленты транспортеров, ножевые решетки режущих механизмов волчков, матрицы макаронных прессов и т. д., при этом перфорированные детали можно разделять на пластины и цилиндры. Учитывая специфику расчета, принято разделять перфорированные пластины, нагруженные силами, действующими в их плоскости, и пластины, нагруженные силами, действующими перпендикулярно к их плоскости – матрицы макаронных прессов.

Наличие у перфорированных матриц большого числа отверстий, которые могут иметь различное расположение и форму, делает затруднительным получение точных решений, так называемых периодических задач теории упругости, при этом одним из возможных примеров расчета густо перфорированных пластин является способ приведения, согласно которому имеет место замена расчета перфорированной пластины расчетом некоторой эквивалентной ей по жесткости сплошной пластины с введением в расчет приведенных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона [8, 9].

Известно много научных работ по исследованию напряженного состояния и деформации перфорированных пластин и оболочек, в которых излагаются основные методы решения периодических и двоякопериодических задач теории упругости. Наряду с точными методами получили развитие также инженерные методы расчета, основанные на применении различных упрощающих моделей и на использовании результатов экспериментов [10, 11, 12, 13].

При решении задач теории упругости пользуются теоремой о единственности решения и принципом Сен-Венана: если внешние силы, приложенные на небольшом участке упругого тела, заменить действующей на том же участке статически эквивалентной системой сил (имеющей тот же главный вектор и тот же главный момент), то в результате этой замены изменятся лишь местные деформации. Основываясь на принципе Сен-Венана принято учитывать, что любое изменение усилий на каком-либо участке поверхности тела практически отражается на направлениях в точках, которые достаточно далеко удалены на расстояние от мест приложения этих усилий.

В соответствии с теоремой о единственности решения и принципом Сен-Венана, согласно теории упругости, с целью аналитического изучения напряженно-деформированного состояния упругости тела перфорированную пластину, нагруженную силами, действующими перпендикулярно к их плоскости, при расчете ее деформаций можно заменить сплошной пластиной с приведенными значениями модуля упругости E' и коэффициента Пуассона μ' [8, 9, 14, 15]:

$$E' = \frac{2(1+k)}{3+k} \cdot \frac{c_n}{S_o} E, \tag{1}$$

где k — коэффициент перфорированности; c_n — ширина перемычек между отверстиями пластины, м; d_o — диаметр отверстий, м; s_o — шаг отверстий, м; E — модуль упругости материала пластины, МПа.

Коэффициент перфорированности определяется по формуле:

$$k = \frac{1,41}{1 + \left(\frac{h}{c_n}\right)^2}, \tag{2}$$

где h — толщина пластины, м.

Ширина перемычек между отверстиями пластины равна:

$$c_n \approx s_o - d_o, \tag{3}$$

где d_o — диаметр отверстий, м.

Определим цилиндрическую жесткость сплошной D и перфорированной D' пластин по формулам:

$$D = \frac{2}{3} \cdot \frac{Eh^3}{1-\mu^2}. \tag{4}$$

$$D' = \frac{2}{3} \cdot \frac{E'h^3}{1-(\mu')^2}. \tag{5}$$

Подставив в уравнение (5) значения E' и μ' , получим:

$$D' = \frac{2h^3}{3 \left[1 - \left(\frac{1-k}{3+k} \right)^2 \right]} \cdot \frac{2(1+k)}{3+k} \cdot \frac{c_n}{S_o} = \frac{3+k}{4} (1-\mu^2) \frac{2}{3} \cdot \frac{c_n}{S_o} \cdot \frac{Eh^3}{(1-\mu^2)}. \tag{6}$$

Решая уравнения (4) и (6) и преобразовав получим:

$$D' = \gamma D, \quad (7)$$

где γ — коэффициент приведения жесткости, который учитывает снижение жесткости перфорированной пластины вследствие перфорации.

Значение коэффициента приведения жесткости γ , полученного данным методом, позволяет проводить расчет перфорированных пластин с использованием действительных (не приведенных) значений величины E и μ , и при значениях $0,5 \leq \frac{d_o}{S_o} \leq 0,9$ по формуле:

$$\gamma = \frac{3+k}{4} (1-\mu^2) \left[1 - 0,906 \left(\frac{d_o}{S_o} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Максимальный прогиб пластины, закрепленной по внешнему диаметру и нагруженной давлением P , определяется по формуле

$$f_m = \frac{P \cdot r^4}{64D\gamma} \cdot \frac{(5+\mu)}{(1+\mu)}. \quad (9)$$

При проведении расчетов принимаем, что корпус матрицы выполнен из стали 20 ($\mu = 0,3$; $E = 4,23 \cdot 10^5$ МПа), а температура нагрева корпуса матрицы не превышает 120 °С. В соответствии с формулой (9) приведены результаты расчета зависимости максимального прогиба f_m от высоты матрицы и давления прессования в тубусе пресса (рис. 1).

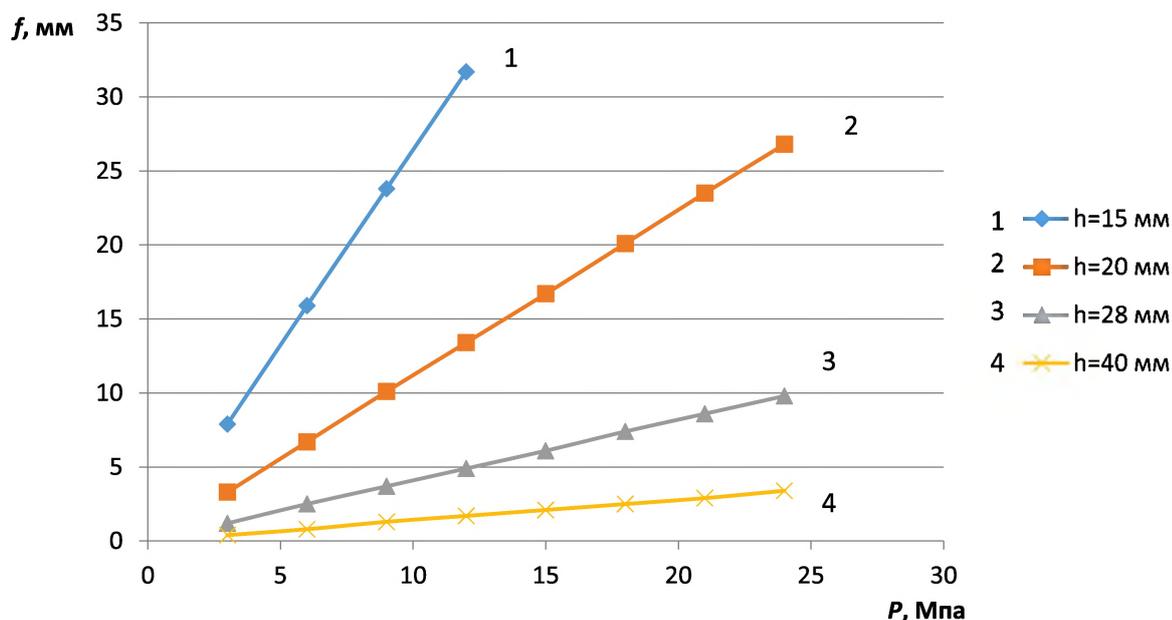


Рис. 1. Зависимость прогиба f_m от давления прессования и высоты сплошной матрицы
Fig. 1. Dependence of deflection f_m on compaction pressure and height of solid matrix

Однако прогиб рабочей поверхности матрицы может быть значительно уменьшен при условии, что ее корпус выполнен составным — из двух частей: большей, сделанной в виде кольца, и меньшей, изготовленной в виде центрального диска-вкладыша, установленного внутри кольца со сквозным ступенчатым зазором. Корпус свободно опирается по контуру (большая периферийная часть матрицы), а меньшая (центральная часть матрицы) часть расположена внутри большей посредством сквозным ступенчатым зазором, который играет роль теплового зазора и также предотвращает истечение теста через матрицу [16].

На рис. 2 построены графические зависимости прогиба f_m матрицы под воздействием давления прессования на матрицу от геометрических параметров матрицы (высоты h).

При подстановке данных и анализа расчетов видно, что прогиб корпуса составной матрицы диаметром 300 мм составляет примерно 3,5 мм, что значительно меньше прогиба корпуса сплошной матрицы 5,6 мм, при этом максимальные моменты в составных матрицах снижены. Однако жесткость составной матрицы не изменилась, так как эта величина зависит от толщины корпуса h , а она в обоих вариантах одинаковая.

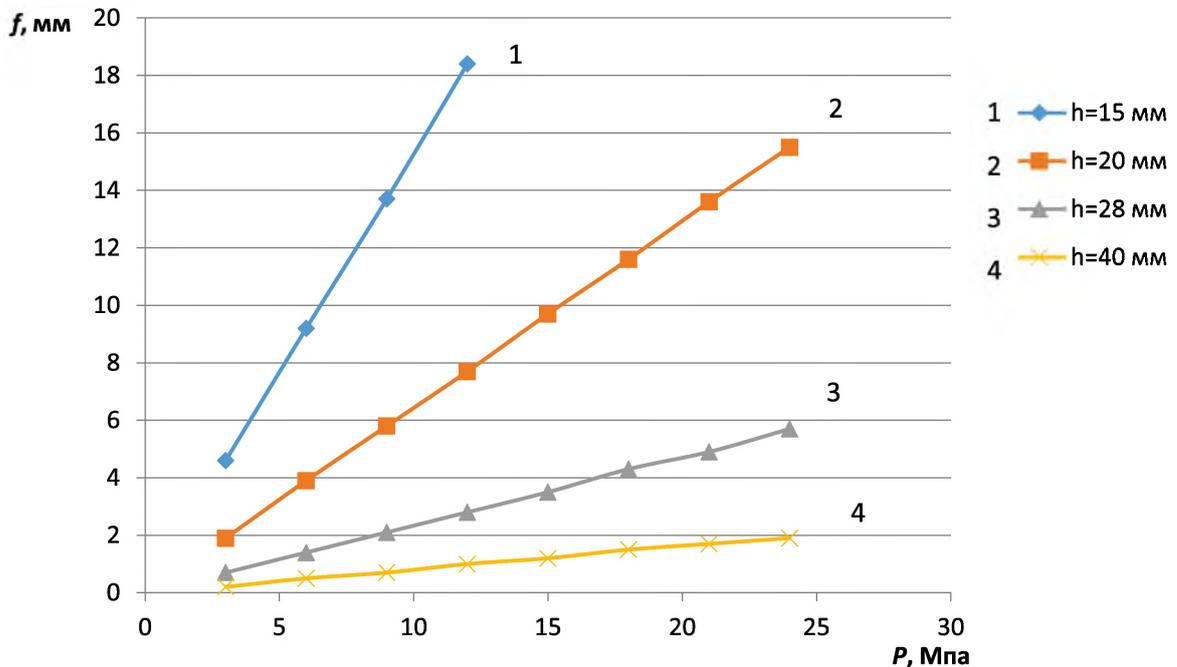


Рис. 2. Зависимость прогиба f_m от давления прессования и высоты составной матрицы
Fig. 2. Dependence of deflection on f_m compaction pressure and height of the composite matrix

Для улучшения условий работы матрицы, необходимо рассмотреть основные закономерности тепловых процессов и определить количество тепла, передаваемого в зависимости от температуры теплоносителя и геометрических параметров матрицы (диаметр и толщина).

Количество теплоты Δq (Вт), проходящее через слой стенки толщиной Δr (рис. 3) получим из уравнения, описывающего распространение теплового потока [18, 19]. Согласно закону Фурье:

$$q = -\lambda S \frac{dt}{dr} \tag{10}$$

где S — площадь сечения, m^2 , перпендикулярного тепловому потоку, то есть $S = 2\pi Rh$; h — высота колодца, м.

Согласно теории В. Г. Скатецкого, количество теплоты, которое идет на нагревание колодца до температуры t , можно определить по формуле [20]:

$$\Delta q = c\rho\Delta V (t - t_1), \tag{11}$$

где c — удельная теплоемкость, $kJ/(kg \cdot K)$; ρ — плотность, kg/m^3 ; ΔV — объем, m^3 ; t_1 — температура окружающей среды, $^{\circ}C$.

При $\Delta V=2\pi rh\Delta r$ формула (11) примет вид:

$$\Delta q = c\rho 2\pi rh\Delta r (t - t_1). \tag{12}$$

Согласно закону Фурье:

$$\begin{aligned} \Delta q &= -\lambda S \frac{dt(r)}{dr} + \lambda S (r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} = 2\pi\lambda h \left[(r + \Delta r) \frac{dt(r + \Delta r)}{dr} - r \frac{dt(r)}{dr} \right] = \\ &= 2\pi\lambda h \left(r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right) \Delta r. \end{aligned} \tag{13}$$

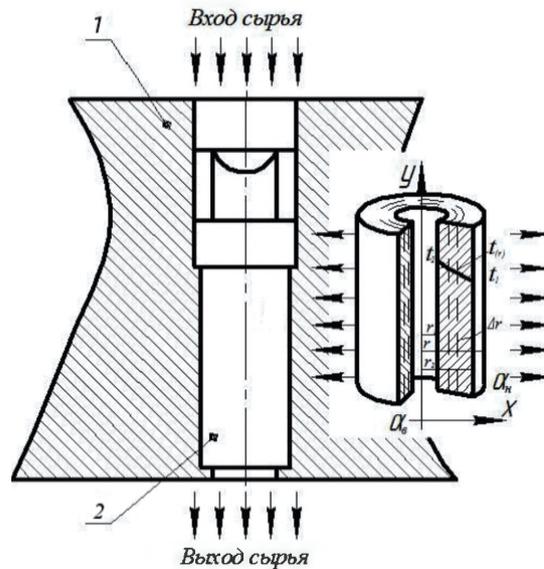


Рис. 3. Схема одномерного процесса теплопроводности цилиндрической стенки колодца: 1 — корпус матрицы; 2 — вкладыш формирующий; q — поток тепловой; α_b — коэффициент теплоотдачи от теста к стенке колодца макаронной матрицы; α_n — коэффициент теплоотдачи от наружной стенки колодца матрицы в окружающую среду

Fig. 3. Scheme of one-dimensional thermal conduction process of a cylindrical well wall: 1 — matrix body; 2 — forming insert; q — heat flow; α_b — heat transfer coefficient from the dough to the wall of the pasta matrix well; α_n — heat transfer coefficient from the outer wall of the matrix well into the environment

Приравнивая первые части выражений для Δq и сокращая их на $2\pi rh\Delta r$, получаем:

$$r \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} - \frac{cp}{\lambda} r(t - t_1) = 0, \tag{14}$$

где $cp / \lambda > 0$,

$$\text{или } \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} - \omega^2 y = 0,$$

где $\omega^2 :: \frac{cp}{\lambda} > 0$; $y :: = t - t_1$.

Таким образом, получено аналитическое выражение для нахождения температуры на разных по глубине участках цилиндрической стенки колодца, если известна температура на внутренней стенке, то есть $t(r_0) = t_0$.

Внутри колодца находится теплоноситель с высокой температурой t_1 (тестовая масса) и коэффициентом теплоотдачи от него внутренней поверхности стенки колодца α_b . Снаружи колодца (матрицы) — более холодный теплоноситель, имеющий температуру t_2 . При этом коэффициент теплоотдачи от наружной стенки колодца более холодному теплоносителю (окружающей среде) α_n .

Тогда количество теплоты, передаваемой от макаронного теста к внутренней стенке колодца, составляет:

$$Q = \alpha_b S \tau (t_1 - t_{cm1}) = \alpha_b 2\pi rh (t_1 - t_{cm1}). \tag{15}$$

Количество теплоты, проходящее сквозь стенку колодца путем теплопроводности:

$$Q = \frac{2\lambda\pi h}{2,3 \lg \frac{r_n}{r_b}} (t_{cr1} - t_{cr2}). \tag{16}$$

Количество теплоты, передаваемое от стенки колодца в окружающую среду:

$$Q = \alpha_n S_n (t_{ст2} - t_2) = \alpha_n 2\pi h r_n \tau (t_{ст2} - t_2). \tag{17}$$

Преобразовав уравнения (15)–(17), получим:

$$Q \left(\frac{1}{\alpha_b r_b} + \frac{1}{\lambda} 2,3 \lg \frac{r_n}{r_b} + \frac{1}{\alpha_n r_n} \right) = 2\pi h \tau (t_1 - t_2) \tag{18}$$

или

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b r_b} + \frac{1}{\lambda} 2,3 \lg \frac{r_n}{r_b} + \frac{1}{\alpha_n r_n}} 2\pi h \tau (t_1 - t_2).$$

При $h = 1$ определим:

$$Q = K_R 2\pi \tau (t_1 - t_2), \tag{19}$$

где K_R — коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице длины.

Таким образом, получено уравнение (19), характеризующее процесс теплопередачи от тестовой массы корпусу матрицы и учитывающее геометрические особенности колодцев.

На рис. 4 представлены расчетные графические зависимости выделения тепла при осуществлении процесса формования макаронных изделий в зависимости от температуры и геометрических параметров матрицы (диаметра и высоты матрицы).

Используя полученные данные, можно определить корреляцию геометрических параметров матрицы при использовании высокотемпературных процессов формования макаронных изделий.

На рис. 5 представлена трехмерная модель составной кольцевой матрицы с улучшенными теплотехническими и технологическими характеристиками (в разобранном виде) [16, 17].

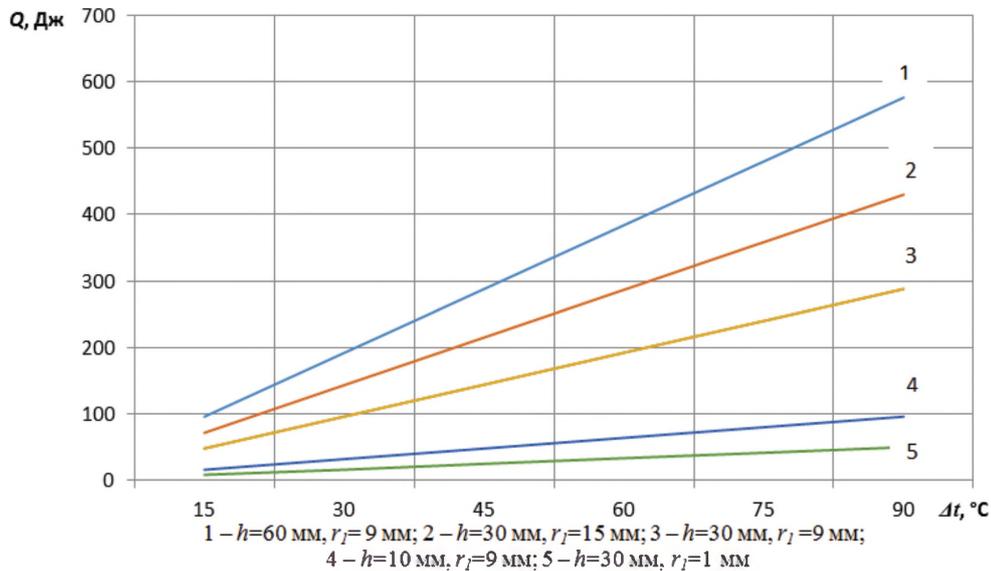


Рис. 4. Количество тепла, передаваемого в зависимости от температуры теплоносителя и параметров r_0 и h

Fig. 4. The amount of heat transferred depending on the coolant temperature and parameters r_0 and h

Как видно из рисунка 5, матрица состоит из двух частей: периферийной 1, имеющей вид кольца, и центральной 3, выполненной в виде круглого основания, при этом центральная часть устанавливается внутри периферийной со сквозным ступенчатым зазором. Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус (периферийная часть матрицы), основание (центральная часть матрицы), колодцы 4, расположенные внутри колодцев формирующие вкладыши со сквозными формирующими отверстиями.

Рабочая поверхность корпуса разделена на ряд условных колец. Колодцы расположены в условных кольцах на концентрических окружностях. Центральная часть 3 установлена относительно периферийной части 1 матрицы с зазором и имеет центральное отверстие 2.

Таким образом, корпус матрицы выполнен составным и разделенным на две неравные части по внутреннему радиусу последнего условного кольца, считая от радиуса корпуса матрицы. Центральное отверстие 2 обеспечивает соосность при установке матрицы и рабочего вала шнека.

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тестовая масса подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно уплотняется, освобождается от включений воздуха, становится плотной, упруго-пластичной и вязкой массой. Уплотненное макаронное тесто преодолевает сопротивление матрицы с помощью шнека и продавливается сквозь формирующие колодцы 4 для вкладышей, установленных в колодцах 4 периферийной части 1 макаронной матрицы пресса.

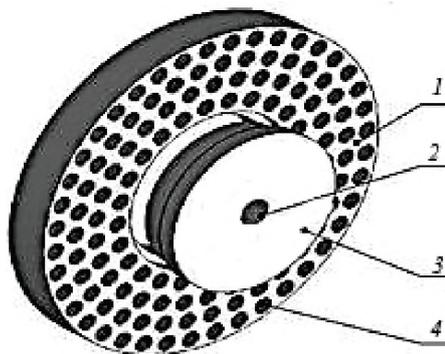


Рис. 5. Трехмерная модель составной матрицы:

1 — периферийная часть матрицы; 2 — отверстие центральное; 3 — центральная часть матрицы;
4 — колодец для установки формирующего вкладыша

Fig. 5. Three-dimensional model of a composite matrix:

1 — peripheral part of the matrix; 2 — central hole; 3 — central part of the matrix;
4 — well for installing the forming insert

Расположение колодцев 4 для установки формирующих вкладышей предусмотрены только на периферийной части матрицы по ее концентрическим окружностям. При осуществлении процесса формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается, в результате, согласно теории линейного расширения металлов, возникают температурные деформации, причем максимальные деформации — в центральной части матрицы на осях симметрии круглого основания 2. Именно в этих местах имеет место превращение механической энергии движения теста в тепловую — процесс теплопроводности в твердом теле с внутренними источниками теплоты. Поскольку основание 2 выполнено в виде круга и установлено в центре матрицы, то при нагреве оно будет равномерно удлиняться (расширяться) во все стороны благодаря наличию зазора. Снятию максимальных температурных деформаций будет способствовать и центральное отверстие 2.

Одновременно температурным деформациям подвергается и большая периферийная часть матрицы — кольцеобразная рабочая поверхность, которая также имеет возможность линейного расширения благодаря зазору. Благодаря наличию зазора осуществляется интенсивный отвод теплоты от колодцев 4 с формирующими вкладышами в окружающую среду за счет расширения поверхности теплоотдачи и принудительной циркуляции воздушных потоков. В результате такого взаимного перемещения двух составных частей корпуса рабочая поверхность матрицы будет иметь минимальное коробление торцевой (рабочей) поверхности, что и обусловит равномерное отрезание отформованных изделий вращающимся (подрезным) ножом.

Таким образом, зазор позволит компенсировать температурные деформации и получить минимальное коробление рабочей поверхности матрицы; и в этом случае вращающийся подрезной нож (на рисунке 5 не показан) будет отрезать отформованные изделия одинаковой длины.

Заключение. Раскрытие сущности влияния внутреннего давления теста на прочность и жесткость конструкции матрицы при воздействии одновременных температурных дефор-

маций, предварительного уплотнения и пластификации сырья с целью устранения уже отмеченных недостатков является основой для совершенствования конструкции матрицы.

Разработаны новые технические решения в конструкциях матриц, которые существенно улучшают прочностные, теплотехнические и массовые характеристики, обуславливающие повышение качества полуфабрикатов при снижении энергозатрат и увеличении производительности прессы, дано их теоретическое обоснование. Для подтверждения приведенных теоретических результатов необходимо дальнейшее проведение экспериментальных исследований по установлению положительного эффекта температурных зазоров на прочность, жесткость и прогиб матриц.

Рассмотрены тепловые процессы, протекающие в матрицах при формировании макаронных изделий, изучена теплопроводность стенки формующего колодца, получены уравнения теплоотдачи и теплопередачи от тестовой массы к корпусу матрицы и в окружающую среду.

Успешное решение указанных проблем позволит повысить качество формирования макаронных изделий, уменьшить процент отходов в виде концов, увеличить производительность прессы, улучшить работу поточных линий и позволит решить вопрос по снижению зависимости отрасли Республики Беларусь от импорта дорогостоящих рабочих органов макаронных прессы (матриц). Следовательно, будет удовлетворен внутренний спрос на высококачественную продукцию собственного производства, повышена эффективность использования импортируемых энергетических и материальных ресурсов.

Список использованных источников

1. Назаров, Н. И. Технология макаронного производства / Н. И. Назаров. — М. : Легкая и пищевая промышленность, 1969. — 288 с.
2. Хромеевков, В. М. Технологическое оборудование хлебозаводов и макаронных фабрик / В. М. Хромеевков. — СПб. : ГИОРД, 2002. — 496 с.
3. Медведев, Г. М. Технология макаронных изделий : учебник для вузов / Г. М. Медведев. — СПб. : ГИОРД, 2006. — 312 с.
4. Вандакурова, Н. И. Технология, организация и оборудование макаронного производства : учебное пособие / Н. И. Вандакурова, В. Ю. Богер. — Кемерово : РИО КемТИПП, 2007. — 121 с.
5. Чернов, М. Е. Практикум по расчетам оборудования хлебопекарных и макаронных предприятий / М. Е. Чернов [и др.]; под ред. Ю. А. Калошина. — М. : Агропромиздат, 1991. — 159 с.
6. Шнейдер, Т. И. Научное обеспечение макаронной промышленности // Хлебопечение России. — 2002. — №3. — С. 32–35.
7. Совершенствование технологии макаронного производства / Н. И. Березина [и др.]. — Киев : Урожай, 1991. — 104 с.
8. Григолюк, Э. И. Перфорированные пластины и оболочки и связанные с ними проблемы / Э. И. Григолюк, Л. А. Фильштинский // Упругость и пластичность. — 1967. — №2. — С. 7–163.
9. Гуськов, К. П. Перфорированные пластины в макаронном производстве / К. П. Гуськов, Б. М. Азаров. — М. : ЦНИИТЭИпищепром, 1965. — 48 с.
10. Алфутов, Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. — М. : Машиностроение, 1978. — 312 с.
11. Додзина, Р. Н. Исследование устойчивости упруго-пластических оболочек переменной толщины при комбинированном нагружении / Р. Н. Додзина. — Куйбышев : КПТИ, 1984, — 20 с.
12. Петров, В. В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек / В. В. Петров. — Саратов : Саратов. ун-т, 1975. — 173 с.
13. Смоленцев, Ю. А. Экспериментальное определение коэффициента ослабления растягиваемых перфорированных пластин / Ю. А. Смоленцев // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1966. — №6. — С. 12–13.
14. Пономарев, С. Д. Расчет на прочность в машиностроении. В 3 т. / С. Д. Пономарев. — М. : Машгиз. — Т. 1. — 1956. — 884 с.
15. Сергеев, Б. М. Расчеты на прочность деталей машин пищевых производств / Б. М. Сергеев. — М. : Машиностроение, 1969. — 143 с.
16. Матрица для производства макаронных изделий: пат. ВУ 17855 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич. — Опубл. 30.12.2013.
17. Матрица для производства макаронных изделий: пат. ВУ 18195 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич. — Опубл. 30.04.2014.
18. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. — М. : Химия, 1971. — 784 с.

19. *Кавецкий, Г. Д.* Процессы и аппараты пищевой технологии / Г. Д. Кавецкий, Б. В. Васильев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Колос, 2000. — 551 с.
20. *Скатецкий, В. Г.* Математическое моделирование физико-химических процессов / В. Г. Скатецкий. — Минск : Высшая школа, 1981. — 144 с.

Информация об авторах

Ловкис Зенон Валентинович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель Республики Беларусь, главный научный сотрудник РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь).

E-mail: Lovkis_zv@mail.ru

Станкевич Павел Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры специальной подготовки филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (д. Светлая Роща, 1, 202135, Минская область, Борисовский район, Республика Беларусь).

E-mail: pavelstankevichy@gmail.com

Торган Анна Борисовна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой 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

Information about authors

Lovkis Zenon Valentinovich, Honored Science Worker of the Republic of Belarus, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Engineering sciences, Professor, Chief Researcher of the Republican Unitary Enterprise «Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: Lovkis_zv@mail.ru

Stankevich Pavel Vitalevich, PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Special Training of the Institute of Retraining and Advanced Training branch of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (1, village Svetlaya Roshcha, 202135, Minsk region, Borisov district, Republic of Belarus).

E-mail: pavelstankevichy@gmail.com

Torhan Anna Borisovna, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technologies and Technical Support of Agricultural Products Processing Processes Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti, 220124, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: anechkat@tut.by