

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. Г. Барсуков

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ФОРМОВАНИЯ
ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ ПИЩЕВЫХ МАСС
В УЗЛАХ ПРЕССОВАНИЯ**

Минск
БГАТУ
2021

Груданов, В. Я. Реологические и технологические основы формирования вязко-пластичных пищевых масс в узлах прессования / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. Г. Барсуков. – Минск : БГАТУ, 2021. – 180 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0129-3.

Рассмотрены актуальные проблемы в области создания высокоэффективных узлов прессования макаронных прессов на основе математических моделей, отражающих реологические и технологические закономерности течения макаронного теста в конфузорно-диффузорных каналах матриц. Представлены новые технические решения, приведена современная классификация матриц отечественного и зарубежного производства, разработана инженерная методика определения прочностных, тепловых и гидравлических характеристик составных биметаллических матриц с температурными зазорами.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей, аспирантов и магистрантов.

Табл. 17. Ил. 56. Библиогр.: 102 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 11 января 2021 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры машин и аппаратов
химических и силикатных производств

УО «Белорусский государственный
технологический университет» *П. Е. Вайтехович;*

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологий и технического обеспечения
процессов переработки сельскохозяйственной продукции

УО «Белорусский государственный
аграрный технический университет» *А. М. Мазур*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Реологические и технологические особенности производства макаронных изделий и основные закономерности процесса формования теста.....	7
1.1. Реологические особенности прессования макаронного теста	10
1.2. Технологическая линия производства макаронных изделий.....	13
1.3. Анализ современных тенденций в конструировании матриц.....	16
2. Теоретические основы процесса формования макаронных изделий в составных матрицах с улучшенными прочностными, теплотехническими и массовыми характеристиками	24
2.1. Влияние внутреннего давления теста на прочность, жесткость и прогиб матриц	24
2.1.1. Перфорированные пластины, нагруженные силами, действующими перпендикулярно их плоскости. Определение прогиба рабочей поверхности	28
2.1.2. Влияние перфорации на прочность и жесткость матрицы.....	35
2.2. Теория упругости в температурных деформациях круглых матриц.....	37
2.2.1. Влияние температуры теста на прогиб и кривизну круглой матрицы. Изгибающие моменты и напряжения	40
2.2.2. Кривизна срединной поверхности круглой пластины, изгибающие моменты и напряжения при изменении температуры по высоте (толщине) пластины и в ее радиальном направлении	43
2.3. Моделирование тепловых процессов в составных матрицах при высокотемпературных режимах замеса и формования теста	49
2.3.1. Дифференциальное уравнение теплопроводности корпуса матрицы. Основные закономерности процесса	50
2.3.2. Теплопроводность цилиндрической стенки колодца. Построение математической модели	54
3. Оптимизация конструкции матриц и узлов прессования. Новые технические решения	59
3.1. Составные матрицы с фиксированным температурным зазором.....	59
3.2. Составные матрицы с тепловыми ребрами	61
3.3. Составные матрицы с двумя температурными зазорами.....	66
3.4. Матрицы с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста	68
3.5. Узлы прессования с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста в предматричном объеме	78

3.6. Расчетное обоснование геометрических, тепловых и прочностных параметров составных матриц	85
3.6.1. Гидравлические параметры	85
3.6.2. Тепловые параметры	88
3.6.3. Прочностные параметры.....	91
4. Реологические основы прессования макаронных изделий	96
4.1. Реологический процесс формирования макаронных изделий в колodцах матрицы с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста	96
4.2. Реологическое моделирование процессов течения макаронного теста в каналах конфузорно-диффузорных вставок формирующих матриц.....	101
4.3. Управление течением макаронного теста в формирующих матрицах пресса с помощью конфузорно-диффузорных вставок.....	114
5. Экспериментальные исследования влияния внутреннего давления теста на прочность, жесткость и прогиб круглых матриц	123
5.1. Предварительные сведения. Матрицы сплошные и составные.....	123
5.2. Разработка, изготовление и наладка лабораторного экспериментального стенда. Программа и методика испытаний	124
5.3. Результаты экспериментальных исследований. Анализ, обработка и обобщение результатов экспериментальных исследований.....	128
6. Экспериментальные исследования влияния температуры теста на прогиб составных круглых матриц.....	131
6.1. Предварительные сведения. Трехмерная модель составной матрицы.....	131
6.2. Экспериментальные исследования температурных напряжений в круглых матрицах и обсуждение их результатов	133
7. Современная классификация матриц отечественного и зарубежного производства	138
8. Совершенствование конструкции режущего механизма макаронного пресса на основе закономерностей скользящего резания	141
9. Методика инженерного расчета составных матриц	148
10. Расчет экономической эффективности от внедрения составных биметаллических матриц в производство для пресса Buhler TPXO	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	166
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	172

ВВЕДЕНИЕ

Производство макаронных изделий в Республике Беларусь ежегодно увеличивается в среднем на 9 %–10 % с 2007 г. Это связано с вводом в эксплуатацию в филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» поточной автоматической линии по выпуску короткорезанных макаронных изделий фирмы FAVA S.p.A. (Италия) производительностью 1500 кг/ч. Так начался новый этап развития макаронной промышленности Республики Беларусь.

В 2009 г. в этом же филиале была установлена еще одна поточная автоматическая линия – фирмы Buhler AG (Швейцария). Это позволило выпускать на начало 2010 г. около 100 т продукции в сутки, расширить ассортимент продукции до 50 видов макаронных изделий. Аналогичные линии работают на ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» и ОАО «Лидский комбинат хлебопродуктов».

Макаронные прессы зарубежных технологических линий комплектуются матрицами в количестве 30 штук круглой и прямоугольной (тубусной) формы в основном итальянского производства. Такие матрицы имеют массу 40–150 кг при наружном диаметре 520 и 610 мм, толщине соответственно 110 и 140 мм и стоимости от 500 до 9000 евро.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, даже современное зарубежное оборудование мирового уровня имеет ряд существенных недостатков, которые, прежде всего, следует отнести к несовершенству конструкций матриц, установленных в зарубежных технологических линиях.

Несмотря на значительные габаритные размеры при диаметрах 520 и 610 мм и высоте 110 и 140 мм, 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, увеличивает процент отходов (до 15 %) в виде концов и приводит к снижению эффективности работы линии в целом.

Кроме того, в колодцах известных конструкций матриц, как отечественного, так и зарубежного производства, отсутствуют предварительное уплотнение теста и его пластификация. Колодцы глубокие и пустые, а на их дне установлены вкладыши с формующими механизмами. Это приводит к возникновению гидравлических

ударов, преждевременному износу вкладышей, ухудшению качества отформованных полуфабрикатов и снижению производительности прессы, срок службы матриц сокращается в среднем до одного года. В связи с этим особенно актуальны вопросы по импортозамещению дорогих итальянских матриц на отечественные, которые также нуждаются в значительном совершенствовании конструктивно-технологических характеристик.

Раскрытие сущности влияния внутреннего давления теста на прочность и жесткость конструкции матрицы при воздействии одновременных температурных деформаций, предварительного уплотнения и пластификации сырья с целью устранения отмеченных недостатков является основой для совершенствования конструкции матрицы – важнейшего и самого дорогостоящего рабочего органа прессы.

Необходимо создать научно-практические и методологические основы для проведения качественного процесса формования макаронных изделий, что обуславливает необходимость проведения специальных теоретических и экспериментальных исследований, базирующихся на классических работах отечественных и зарубежных ученых – Ю. А. Калошина, А. А. Сердюченко, В. И. Коломейцева, И. В. Аржановой, Г. М. Медведева, Т. Б. Цыгановой, Т. Ю. Орловой, Н. И. Назарова, И. М. Ройтера, В. П. Негруба, Г. А. Осиповой, Е. В. Литвиновой, Н. А. Березиной, В. М. Азарова, М. Е. Чернова, Д. М. Мак-Келви, Д. Х. Чанта и др.

Таким образом, успешное решение указанных проблем позволит повысить качество формования макаронных изделий, уменьшит процент отходов в виде концов, увеличит производительность прессы и поднимет работу поточных линий на новый, более современный уровень. Будут решены вопросы по снижению зависимости страны от импорта дорогостоящих рабочих органов макаронных прессов (матриц) за счет удовлетворения внутреннего спроса высококачественной продукции собственного производства, повышения эффективности использования импортируемых энергетических и материальных ресурсов в соответствии с Государственной программой импортозамещения.

1. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ТЕСТА

Качество готовых изделий оценивается в соответствии со стандартом СТБ 1963–2009 «Изделия макаронные. Общие технические условия» по следующим показателям: цвет, поверхность, форма, вкус, излом, запах, состояние после варки, влажность, кислотность, содержание деформированных изделий и крошки, металломагнитной примеси и наличие вредителей хлебных запасов [30].

Цвет должен быть однотонный, соответствующий сорту муки, без следов непромеса, с кремовым или желтоватым оттенком. Лучшими считаются золотисто-желтый, янтарный.

Поверхность макаронных изделий должна быть гладкой или рифленой, но допускается незначительная шероховатость.

Форма должна соответствовать типу макаронных изделий, деформация должна отсутствовать.

Вкус и запах должны быть свойственны данному виду изделий. При варке до готовности изделия не должны терять форму, склеиваться, образовывать комья, разваливаться по швам.

Значения влажности изделий должна находиться в пределах от 11 % до 13 %. Это основной фактор, определяющий величину выхода готовой продукции, т. е. расхода муки на выработку 1 т изделий.

Запах должен быть свойствен данным макаронным изделиям в зависимости от используемого дополнительного сырья и пищевых добавок, без постороннего запаха.

Излом обязательно должен быть стекловидный.

Кислотность – показатель качества, характеризующий вкусовые свойства и степень свежести продукции, определяется кислотностью муки (4–10 град).

Вкус должен быть свойствен данным макаронным изделиям в зависимости от используемого дополнительного сырья и пищевых добавок, без постороннего привкуса.

Крошка – обломки макарон длиной менее 5 см, или перья длиной менее 3 см, или рожки «соломка», «особые» и «обыкновенные» длиной менее 3 см, или лапша и вермишель длиной менее 1,5 см.

Содержание металломагнитной примеси в макаронных изделиях не должно превышать 3 мг на 1 кг продукта.

Наличие вредителей хлебных злаков, хруст от минеральной примеси и посторонние включения в макаронных изделиях не допускаются [10, 31, 82].

Уплотнение и формование теста. Физические свойства уплотненного теста. На современных технологических линиях зарубежного производства уплотнение макаронного теста и формование из него сырых изделий осуществляется на шнековых прессах [14].

Тесто в макаронном производстве подразделяется на два вида [79]:

– сыпучая крошковатая масса, поступающая после замеса в шнековую камеру;

– связанная масса крутого теста, уплотняемая в шнековой камере и продавливаемая сквозь отверстия матрицы.

Второй вид теста является упругопластично-вязким коллоидным телом (веществом).

Упругость теста – свойство восстанавливать первоначальную форму при мгновенном снятии приложенной нагрузки.

Пластичность теста – способность к формоизменению и течению при напряжениях выше критического, называемого пределом упругости. Пластичность имеет место при формировании теста.

Вязкость теста является мерой сопротивления его текучести и определяется величиной сил сцепления его клеток между собой, называемых силами когезии теста, т. е. чем больше величина сил сцепления клеток, тем тесто более вязкое, крутое (вязкость обратна текучести).

Вязкость – величина непостоянная, она зависит от влажности, температуры, давления прессования и других факторов [54].

Основные способы замеса и формования теста. Существует два основных способа:

– низкотемпературный режим замеса и формования теста (традиционный);

– высокотемпературный режим замеса и резания (формования) теста.

Традиционный режим замеса и резания технологического полуфабриката допускает повышение температуры теста перед матрицей до 50 °С–55 °С, т. к. при больших температурах происходит денатурация белковых веществ, потеря связующих свойств клейковины и ослабление структуры макаронных изделий [59].

Высокотемпературный режим замеса и формования теста допускает повышение его температуры до 60 °С–65 °С. Появляются следующие преимущества данного способа по сравнению с традиционным [16, 29, 49]:

- на 10 %–15 % увеличивается производительность прессы за счет повышения текучести теста при нагревании его перед прессованием;
- предотвращается выпрессовывание белесых изделий вследствие повышения пластичности теста;
- не требуется расход воды на охлаждение шнековой камеры, сокращается продолжительность сушки изделий и предотвращается их слипание;
- улучшается цвет изделий в результате частичной тепловой инактивации фермента полифенолоксидазы.

Наиболее целесообразно применять высокотемпературный режим при производстве коротких макаронных изделий. Отмечается, что при температуре матрицы до 80 °С производительность прессы увеличивается в два раза, а при температуре свыше 120 °С начинается процесс вспучивания поверхности выпрессованных сырых изделий вследствие значительного перепада температур изделий и воздуха и резкого испарения влаги из изделий – наблюдается эффект (закон) вторичного вскипания.

Оптимальная температура нагрева матрицы – до (110 ± 5) °С:

- при использовании матриц с тефлоновыми вкладышами – 75 °С–85 °С;
- при использовании металлических матриц без тефлоновых вкладышей – 110 °С–120 °С.

Вместе с тем одновременно с увеличением температуры матрицы в ее корпусе возрастают температурные напряжения, приводящие к короблению (вспучиванию, изгибу) рабочей поверхности, что, в свою очередь, обуславливает рост отходов в виде концов из-за неравномерного обрезания полуфабриката. На величину прогиба влияет и высокое внутреннее давление теста – до 12–14 МПа.

Таким образом, на прочность, жесткость и прогиб матриц влияют два основных фактора:

- давление;
- температура.

Однако только при определенных значениях давления прессования (не менее 5–6 МПа) можно получить тесто, реологические характеристики которого обеспечивают прочную структуру формируемых изделий.

В данном случае существенную роль играет влажность теста. При значении влажности теста из крупки 32 % с повышением температуры матрицы от 40 °С до 80 °С производительность прессы увеличивается почти в два раза [12, 64].

Использование теста влажностью 29 % позволяет повысить давление прессования при температуре матрицы 80 °С до значения традиционного режима.

1.1. Реологические особенности прессования макаронного теста

Предварительные сведения. Из теории упругости известно, что через элементарную площадку можно провести три взаимно перпендикулярные площадки, на которых будут отсутствовать сдвигающие напряжения. Исходя из величин и направлений главных напряжений можно представить напряженное состояние выделенного элемента в случае всестороннего сжатия в виде схемы на рис. 1.1.

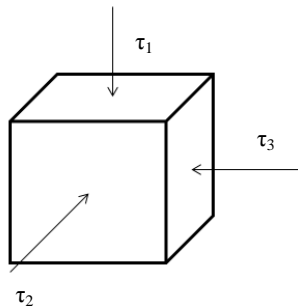


Рис. 1.1. Схема объемного напряженного состояния

Чтобы достичь предельного состояния с целью формоизменения, в единице объема веществ должно быть накоплено одно и то же количество потенциальной энергии независимо от схемы напряженного состояния.

Математически это напряжение выражается уравнением

$$(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_2 - \tau_1)^2 + (\tau_3 - \tau_2)^2 = 4\tau_{кр}^2, \quad (1.1)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – значения главного напряжения, Па.

Для случая всестороннего сжатия напряжения $\tau_1 = \tau_3$ после преобразования уравнения (1.1) получим:

$$(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_2 - \tau_1)^2 = 4\tau_{кр}^2, \quad (1.2)$$

или

$$\tau_1 = \tau_{кр} + \tau_2. \quad (1.3)$$

Формула (1.3) называется уравнением пластичности. Оно связывает главные напряжения с константой $\tau_{кр}$ вещества, которую можно определить экспериментально.

Уравнение пластичности позволяет проанализировать процесс обработки теста давлением и установить связь между внешними силами и внутренним напряжением обрабатываемого вещества.

С помощью формулы (1.3) можно оценить величину сопротивления отверстия матрицы истечению теста.

В качестве примера рассмотрим цилиндрический канал, представленный на рис. 1.2.

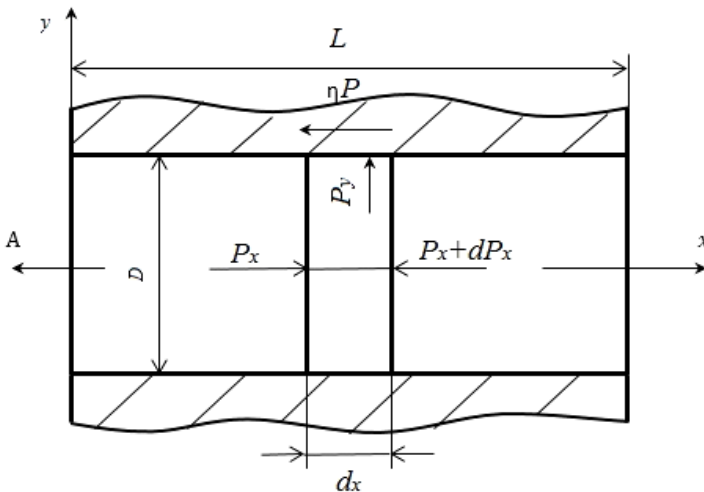


Рис. 1.2. Схема движения элементарного слоя в цилиндрическом участке:
 D – диаметр горловины; L – высота (длина) горловины;
 dx – элемент толщиной dx ; A – направление потока теста;
 P_x – аксиальная реактивная сила; P_y – радиальная сила; ηP_y – сила трения,
 равная радиальной силе, умноженной на коэффициент трения $f(\eta)$;
 $(P_x + dP_x)$ – сила давления, обуславливающая перемещение элемента теста

Исходя из условий равновесия проекция всех сил на любую ось равна нулю. Проектируя силы на ось x , получим:

$$dP_x - fP_y = 0.$$

Из рис. 1.2 находим значение этих сил:

$$dP_x = \pi \frac{Dr^2}{4} d\tau_x; \quad fP_y = \pi Drf \tau_y dx,$$

где τ_x и τ_y – главные напряжения, действующие по осям x и y .

Следовательно:

$$\pi \frac{Dr^2}{4} d\tau_x = \pi Drf \tau_y dx.$$

Используя формулу (1.3), находим:

$$\tau_y = \tau_x - \tau_{кр}.$$

Тогда

$$\frac{d\tau_x}{\tau_x - \tau_{кр}} = \frac{4f}{Dr} dx,$$

или

$$\int \frac{d\tau_x}{\tau_x - \tau_{кр}} = \int \frac{4f}{Dr} dx.$$

После интегрирования получим:

$$\ln(\tau_x - \tau_{кр}) = \frac{4f}{Dr} x + C.$$

Если $x = 0$ и $\tau_x = 0$, то $\tau_{кр} = C$.

Преобразовав логарифмическое уравнение, найдем:

$$\tau_x = \tau_{кр} \left(1 + e^{\frac{4fL}{Dr}} \right).$$

По экспериментальным данным, величина $\tau_{кр}$ при давлении 6,0–7,5 МПа в зависимости от влажности изменяется в следующих пределах (табл.).

Таблица

Зависимость напряжения $\tau_{кр}$ от влажности теста

Влажность теста, %	Напряжение, кПа
29,0	66
30,4	55
30,7	46
31,0	42
31,5	30

По данным М. Н. Караваева, величину f можно принять равной 0,29–0,30.

1.2. Технологическая линия производства макаронных изделий

Макароны – кулинарный полуфабрикат из высушенного пресного пшеничного теста, который перед употреблением в пищу подвергается варке. Макароны подразделяются на типы:

- трубчатые (длинные, короткорезаные, рожки, перья);
- нитеобразные (вермишель);
- ленточные (лапша);
- фигурные (ракушки, суповые засыпки) и др.

Основное сырье для производства макарон – пшеничная мука и питьевая вода. Для повышения пищевой ценности макарон используется дополнительное сырье: яйцопродукты, белковые смеси, добавки-обогагатели и др.

Производство макаронных изделий включает следующие основные стадии и операции:

- подготовка сырья к производству;
- хранение, смешивание, просеивание и дозирование муки;
- дозирование и смешивание рецептурных компонентов, вакуумирование крошкообразной смеси;
- замес и прессование теста: формование и резка сырых тестовых заготовок;

- сушка, стабилизация и охлаждение тестовых заготовок;
- подготовка макаронных изделий к упаковке, упаковывание изделий в потребительскую и транспортную тару.

Основной комплекс линии состоит из оборудования для дозирования, смешивания и вакуумирования рецептурных компонентов, макаронного пресса, режущего и обдувочного устройств.

На рис. 1.3 приведена машинно-аппаратурная схема линии производства короткорезанных макаронных изделий. Автомуковоз подключают к мукоприемному щитку 6, с помощью шнековых питателей 4 муку выгружают из силосов 5 в нужных пропорциях в один из силосов 5 для ее хранения и смешивают винтовым конвейером 3 [76, 93, 96].

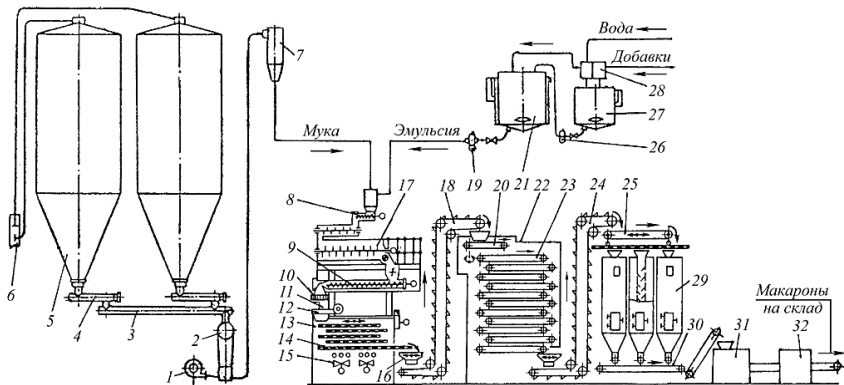


Рис. 1.3. Машинно-аппаратурная схема линии производства макаронных изделий

После контрольного просеивания в центробежном просеивателе 2 мука через роторный питатель подается воздуходувкой 1 в тестомесильное отделение. Мука отделяется от транспортирующего воздуха в циклоне 7.

Часть воды и добавки-обогащители через дозаторы 28 загружают в смеситель 27 и готовят концентрированную эмульсию. Насосом 26 ее вместе с оставшейся частью воды дозируют в расходный бак 21, снабженный терморегулирующей рубашкой. Из этого бака готовая эмульсия подается насосом 19 в тестомесильное отделение.

Муку и эмульсию дозаторами 8 непрерывно подают в тестосмеситель 17. Он имеет три отдельные камеры, через которые после-

довательно проходит обрабатываемая смесь, что позволяет увеличить продолжительность замеса до 20 мин. На завершающем этапе замеса в последней камере смесь подвергается вакуумированию с помощью вакуум-насоса. Благодаря этому получается более плотная структура макаронного теста без воздушных включений, а в дальнейшем – высушенные изделия с равнопрочной структурой без раковин.

Затем смесь поступает в шнеки макаронного пресса 9. В начальной части шнековой зоны смесь подвергается интенсивному перемешиванию, передвигаясь по шнековому каналу к формирующим отверстиям матрицы, и превращается в плотную связанную пластифицированную массу – макаронное тесто. В предматричной камере пресса создается давление 6–12 МПа, под действием которого через матрицу 10 выпрессовываются сырые пряди теста.

Ножи 11, вращаясь в плоскости выходных отверстий матриц, отрезают от тестового потока необходимые по длине тестовые заготовки, которые обдуваются воздухом из кольцевого сопла 12.

Сырые заготовки макаронных изделий направляются в секции вибрационного подсушителя 13. В секции продукт проходит сверху вниз по пяти вибрирующим ситам 14, обдувается воздухом от вентилятора 15 и подсушивается. Затем поток подсушенных заготовок из теста объединяется в вибрлотке 16 и элеватором 18 транспортируется к устройству 20, которое распределяет их равномерным по толщине слоем по всей площади верхнего яруса 23 сушилки 22. Нагретые заготовки элеватором 24 и подвижным ленточным конвейером 25 направляются в бункер 29 накопителя-стабилизатора.

Системой конвейеров 30 готовые изделия подаются в фасовочную машину 31 и упаковываются в коробки из картона. В машине 32 коробки (пакеты) упаковывают в транспортную тару и отправляют на склад.

Наряду с прессующим устройством основным рабочим органом макаронного пресса является матрица (рис. 1.3). Она обуславливает производительность пресса, вид изделий (форму и размеры поперечного сечения) и качество готовой продукции (цвет и шероховатость поверхности).

Матрицы изготавливают из металлов, не поддающихся коррозии, обладающих достаточной прочностью и износостойкостью: фосфористой бронзы, латуни, нержавеющей стали.

1.3. Анализ современных тенденций в конструировании матриц

Наиболее важной частью прессы является его матрица. Матрицы работают под значительными нагрузками – принято расчетное давление прессования 12 МПа. К материалам матрицы предъявляются повышенные требования в отношении прочности, жесткости и стойкости к коррозии. Материал матрицы должен выдерживать давление, противостоять изгибу и срезающим нагрузкам, передаваемым матрице давлением теста.

Последними витками шнека тесто подается в предматричное пространство, доводится до матрицы и выпрессовывается через ее формирующие отверстия. Как показывает анализ научно-технической информации, главный недостаток работы матриц – максимальные скорости выпрессовывания отличаются от минимальных на 70 %–80 %, что в значительной мере снижает производительность прессы и увеличивает процент отходов. Для выравнивания скорости выпрессовывания тесто подводится к прессующей матрице через различного рода сетки, решетки, накладки, устанавливаемые непосредственно на матрицу.

В каждом конструктивном решении следует стремиться к тому, чтобы тестовый поток имел в поперечном сечении равномерные скорости движения и чтобы эти скорости распределялись не по параболическому, а по линейному закону. Заслуживают внимания исследования Ю. А. Калошина. Им впервые применен метод статистического многофазного регрессивного анализа, с помощью которого находилась оптимальная конфигурация предматричной камеры.

На рис. 1.4 приведены схемы эпюр скоростей теста. В соответствии с ними для полного выравнивания скоростей прессования возможно два варианта: увеличить скорость выхода изделий из периферийных отверстий матрицы или уменьшить скорость ее центральной части. Осуществить первый вариант практически очень трудно, поэтому Ю. А. Калошин предлагает воспользоваться вторым. С этой целью в предматричное пространство вводится конусоцилиндрическое устройство (выравниватель) согласно схеме, представленной на рис. 1.5.

Выравниватель устанавливается соосно с матрицей на расстоянии H между обращенными друг к другу плоскостями и не перекрывает лишь отверстие последнего ряда на внешнем кругу матрицы.

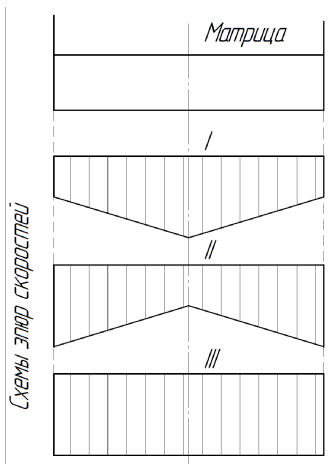


Рис. 1.4. Схемы эпюр скоростей теста:
 I – скорости увеличены к центру тестового потока;
 II – скорости увеличены в периферийной части потока;
 III – скорости выравнены

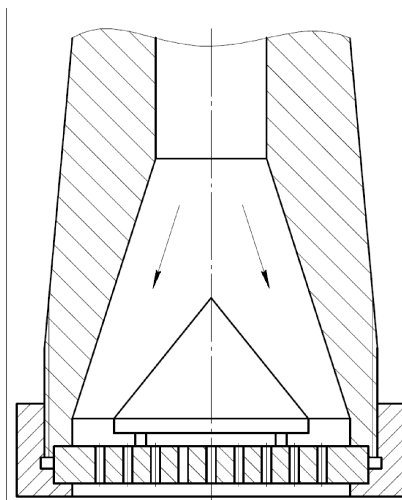


Рис. 1.5. Схема размещения выравнивателя скоростей

За параметр оптимизации γ принят процент каждой площади эпюры скоростей выпрессовывания полуфабрикатов, полученный в диаметральной плоскости матрицы. В качестве конструктивных

факторов приняты диаметр цилиндрического основания выравнивателя a и высота H установки его над матрицей. По материалам статистического регрессивного анализа предложено эмпирическое выражения критерия оптимизации

$$y = 84,76 + 0,77a - 2,91H. \quad (1.4)$$

Поиск оптимума с помощью уравнения (1.4) показал, что критерий оптимизации можно довести до 99,58 %, т. е. снизить количество отходов в виде концов до 0,42 %.

Однако данное техническое решение Ю. А. Калошина не является совершенным. Выравниватель перекрывает часть живого (проходного) сечения матрицы, способствует нежелательной турбулизации тестового потока и обуславливает увеличение гидравлического сопротивления.

Известно и много других технических устройств. Для формирования макарон применяют в основном два профиля формирующего отверстия: модель ГМ-25Д, разработанную НИЛМАП, и модель конструкции В. И. Коломейцева с двухперым вкладышем [40, 62].

Обзор научно-технической литературы и патентно-информационные исследования показывают, что до настоящего времени не решены вопросы по выравниванию скоростей выпрессовывания макаронных изделий не только в плоскости режущей поверхности матрицы, но и по ее высоте [52].

Неравномерность скоростей формирования макаронных изделий по сечению матрицы является нерешенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике [21, 65]. Известно несколько способов частичного устранения неравномерности формирования по зонам матрицы:

- применение устройств конусно-цилиндрической формы;
- использование колосников или тормозящих решеток, устанавливаемых на диск матрицы;
- выполнение формирующих отверстий разной высоты: с изменением высоты формирующих отверстий изменяется и противодавление (чем больше высота, тем выше сопротивление и меньше скорость истечения теста).

Оптимизировать конструктивные и технологические параметры матриц целесообразно по следующим направлениям:

- выравнивание давления теста в колодцах по плоскости рабочей поверхности диска матрицы;
- выравнивание гидравлического сопротивления в формирующих каналах (скорость выпрессовывания) по радиусу диска;
- выравнивание коэффициента уплотнения (сжатия) теста по высоте каналов формирующих механизмов матрицы (наибольший положительный эффект дает использование в конструкции матрицы закономерностей «золотой пропорции», основанных на предпочтительных числах [11, 71, 87]).

Ниже представлены новые технические решения с учетом оптимизации конструктивных и технологических параметров матриц.

Выравнивание давления теста по плоскости рабочей поверхности матрицы

Построение математической модели. Матрица – перфорированная перегородка, которая является главным рабочим элементом узла прессования [70, 81]. Основная характеристика матрицы – пропускная способность, которая определяется отношением площади живого (проходного) сечения всех отверстий к общей площади. Особое значение имеет характер расположения отверстий:

- по вершинам равносторонних треугольников;
- по вершинам квадратов;
- по концентрическим окружностям и др.

Принимаем концентрическое расположение отверстий (колодцев) с целью выравнивания давления тестовой массы по плоскости рабочей поверхности (скорости выпрессовывания). Сущность модели поясняется чертежом (рис. 1.6) – общим видом матрицы для производства макаронных изделий [41].

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 7 с колодцами 6. Внутри последних установлены вкладыши 5 со сквозными формирующими отверстиями 4, сгруппированными в гнезда 3.

Колодцы 6 расположены по площади матрицы в условных кольцах 2 на концентрических окружностях 1. Наружные радиусы условных колец определены по формуле

$$R_n^n = (0,786)^n R_k, \quad (1.5)$$

где n – порядковый номер условного кольца, считая от радиуса корпуса матрицы (от периферии к центру);

0,786 – коэффициент пропорциональности [23];

R_k – радиус корпуса матрицы, м.

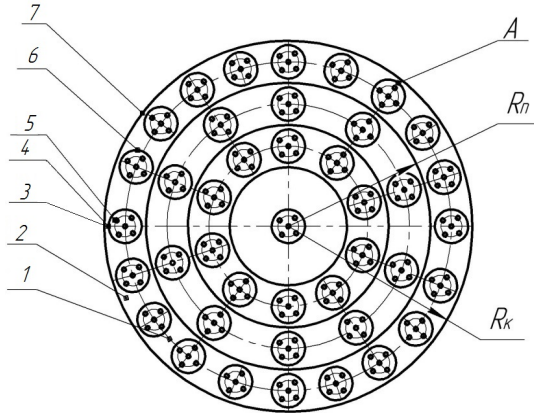


Рис. 1.6. Схема матрицы по патенту РБ № 7401 на изобретение

Количество колодцев b на каждой концентрической окружности l каждого условного кольца 2 определяется по уравнению

$$Z_{n+1} = \left[\frac{Z_n}{1,618} \right], \quad (1.6)$$

где Z_{n+1} – количество колодцев на $(n + 1)$ -м условном кольце;

Z_n – количество колодцев на n -м условном кольце;

1,618 – коэффициент пропорциональности.

Квадратные скобки обозначают целую часть числа (значение «золотого сечения»).

Площадь матрицы можно определить по формуле

$$S_m = \frac{D_m^2}{\sqrt{\Phi}}, \quad (1.7)$$

где D_m – диаметр корпуса матрицы, м;

Φ – значение «золотого сечения», равное 1,618 [66].

Устройство работает следующим образом. Уплотненное макаронное тесто, преодолевая сопротивление матрицы, с помощью шнека продавливается сквозь формирующие отверстия вкладышей, установленных в колодцах 6 корпуса 7 матрицы, посредством запрессовки. Происходит формование теста, т. е. получение сырых макаронных изделий заданной формы, которая определяется профилем формирующих отверстий.

Выполнение условия $R_n^n = (0,786)^n R_k$ обеспечивает пропорциональное увеличение площади рабочей поверхности матрицы по мере увеличения радиуса расположения колодцев 6. Выполнение условия $Z_{n+1} = \left[\frac{Z_n}{1,618} \right]$ обеспечивает пропорциональное увеличение живого сечения рабочей поверхности корпуса 7 матрицы по мере увеличения радиуса расположения колодцев 6 на концентрических окружностях 1 условных колец 2.

Таким образом, в результате соблюдения уравнений (1.5), (1.6) и (1.7) достигается одинаковое значение пропускной способности матрицы и одновременное выравнивание давления тестовой массы по всей площади рабочей поверхности матрицы. Это гарантирует более качественное формование сырья, снижение потерь клейковины, выравнивание скорости прессования по площади матрицы, увеличение производительности матрицы и макаронного прессы в целом и, следовательно, повышение эффективности работы устройства.

Выравнивание скорости выпрессовывания по высоте формирующих механизмов матрицы

Построение математической модели. Сущность модели поясняется принципиально-конструктивной схемой матрицы для прессования вермишели (рис. 1.7), содержащей вид А формирующего отверстия перфорации с высотой ступеней, уменьшающейся по ходу движения теста в сторону выходной формирующей щели.

Матрица для прессования вермишели содержит плоский перфорированный диск 1 определенной толщины, отверстия перфорации 2 выполнены ступенчато по толщине матрицы, их диаметр и высота ступеней 3 уменьшаются по ходу движения теста в сторону выходной формирующей щели. Матрица имеет четыре ступени, считая от формирующей щели.

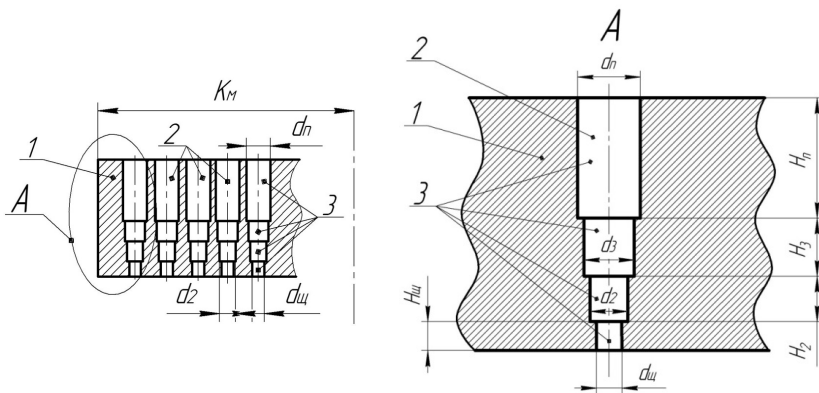


Рис. 1.7. Схема матрицы по патенту РБ № 13323 на изобретение:

$d_{щ}$ – диаметр формирующей щели; d_2 – диаметр отверстия во второй ступени;
 d_3 – диаметр отверстия в третьей ступени; d_n – диаметр отверстия в n -й ступени;
 $H_{щ}$ – высота формирующей щели (первой ступени); H_2 – высота второй ступени;
 H_3 – высота третьей ступени; H_n – высота n -й ступени (она же четвертая ступень)

Площадь матрицы в данной конструкции определяется по формуле

$$S_m = \frac{d_n^2}{\sqrt{\Phi}}, \quad (1.8)$$

где d_n – диаметр корпуса матрицы, м.

Диаметр отверстия n -й ступени определяется по формуле

$$d_n = (1,128)^{n-1} d_{щ}, \quad (1.9)$$

где n – количество ступеней, считая от формирующей щели;

1,128 – коэффициент пропорциональности;

$d_{щ}$ – диаметр формирующей щели, м.

Высота отверстия n -й ступени вычисляется по уравнению

$$H_n = (1,128)^{n-1} H_{щ}, \quad (1.10)$$

где $H_{щ}$ – высота формирующей щели, м.

Устройство работает следующим образом. Уплотненное макаронное тесто, преодолевая сопротивление матрицы, с помощью шнека (не показан) продавливается сквозь формирующие отверстия 2 корпуса 1 матрицы посредством запрессовки. Происходит формирование теста.

Использование уравнений (1.8), (1.9), (1.10) позволяет в данной конструкции матрицы получить равенство гидравлического сопротивления во всех ступенях по ходу движения теста. Это выравнивает скорость прессования теста по высоте матрицы, что дает более качественное формирование сырья и снижает потери клейковины.

Как показывает обзор научных исследований, в последние годы на практике находят применение высокотемпературный режим замеса и формирования теста, при котором температура теста перед матрицей составляет не более 65 °С, оптимальные значения температуры нагрева самих матриц при использовании вкладышей из тефлона – 75 °С–85 °С, а при использовании металлических матриц без тефлоновых вкладышей – 110 °С–120 °С [5, 94, 98]. Для достижения таких температур промышленную матрицу предварительно разогревают, используя теплоэлектронагреватель (ТЭН), уложенный в кольцевую канавку, пропиленную по периметру корпуса [50].

На основании проведенных исследований общую закономерность формирования макаронных изделий можно сформулировать следующим образом:

- давление прессования повышается с 6–7 до 12–14 МПа, особенно на зарубежных линиях;
- температурные режимы замеса и формирования возрастают с 45 °С–50 °С до 60 °С–65 °С;
- для достижения необходимой прочности и уменьшения прогиба жесткости матрицы ее наружный диаметр увеличивается с 300 до 520 и 610 мм, а высота – с 60 до 110 и 140 мм соответственно;
- корпус матрицы выполнен сплошным, несмотря на внушительные габаритные размеры, что неконструктивно.

Анализ, систематизация и обобщение литературных данных 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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В СОСТАВНЫХ МАТРИЦАХ С УЛУЧШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ, ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМИ И МАССОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

2.1. Влияние внутреннего давления теста на прочность, жесткость и прогиб матриц

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.

Перфорированные детали можно разделить на перфорированные пластины и перфорированные цилиндры. В свою очередь, учитывая специфику расчета, целесообразно разделить перфорированные пластины на пластины, нагруженные силами, действующими в их плоскости, и пластины, нагруженные силами, действующими перпендикулярно их плоскости, – матрицы макаронных прессов.

Наличие у перфорированных матриц большого числа отверстий, которые могут иметь различное расположение и форму, делает затруднительным получение точных решений периодических задач теории упругости. Одним из возможных примеров расчета густо перфорированных пластин является способ приведения, согласно которому расчет перфорированной пластины заменен расчетом некоторой эквивалентной ей в смысле жесткости сплошной пластины с введением в расчет приведенных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона [22, 25].

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 нашли развитие инженерные методы расчета, основанные на применении различных упрощающих моделей и на использовании результатов экспериментов [2, 27, 37, 38, 63, 69, 78].

Предварительные сведения. Основными рабочими органами шнекового макаронного прессы являются:

- тестосмеситель с дозаторами сырья;
- шнековая камера с прессующим шнеком, системой охлаждения и вакуумной установкой;
- предматричный тубус;
- матрица с формующими отверстиями, через которые прессуются изделия.

В странах СНГ наибольшее распространение получили прессы ЛМБ и ЛПЛ-2М производства Ростовского машиностроительного завода производительностью соответственно 500 и 400 кг/ч.

С 2001 г. в Республике Беларусь налажено серийное производство пресс-автоматов для изготовления макаронных изделий МИТ-2 производительностью 75 кг/ч (по вермишели при 36 % влажности) с двумя сменными матрицами диаметром 128 мм и двумя видами сменных ножей (ОАО «Тормаш», Барановичи).

Пресс-автомат предназначен для эксплуатации на предприятиях общественного питания, а также на специализированных производствах малой мощности при изготовлении макаронных изделий. Однако в настоящее время в Республике Беларусь в основном эксплуатируются линии по производству макаронных изделий зарубежного производства.

Так, на Минском комбинате хлебопродуктов с 2011 г. эксплуатируется линия по производству макаронных изделий, изготовленная и установленная фирмой Buhler AG (Швейцария).

Линия предназначена для выпуска короткорезанных макаронных изделий номинальной производительностью 2000 кг/ч при толщине стенки изделий 1,0–1,1 мм и насыпной плотности 0,4 кг/дм³. Ассортимент: «Ракушки», «Спиральки», «Рожки особые», «Рожки обыкновенные рифленые», «Рожки витые особые», «Рожки любительские», «Рожки особые “трубочки”», «Вермишель обыкновенная столовая», «Лапша волнистая», «Перья обыкновенные», «Перья обыкновенные рифленые», «Гребешки», «Улитки» и «Смесь фигурная».

В состав линии входят: система подготовки и подачи сырья, экструзионный макаронный пресс ТРХО-510/600, предварительная вибросушилка TRVD-1x³/₄, основная ленточная сушилка ТТНД-11/12, ленточный охладитель TRBK-1/4-2000, загрузочные элеваторы С-Elevator, система кондиционирования воздуха TWAD-TWHD-

60539, секция бункеров готовой продукции С1Х5, фасовочное оборудование.

Экструзионный макаронный пресс ТРХО-510/600 состоит из бункера прессы, системы дозирования муки MSDA, системы подготовки воды WD-2000, смесителя или месильной машины, линии прессования, линии вакуумирования, вентилятора обдува матрицы, прессующей головки, резального механизма PressTrapen C10349, гидравлической системы, поворотной лебедки и комплекта матриц.

В комплект формирующих устройств входят 15 матриц производства фирмы Niccolai Trafile S.r.l. (Италия). Матрицы имеют диаметр 600 мм, высоту 140 мм, количество рядов колодцев – от 5 до 11, размеры изделий – от 1,5 до 24,0 мм, количество вкладышей – от 123 до 570 шт. В таблице приведены геометрические параметры основных зарубежных матриц.

Таблица

Геометрические параметры основных матриц

Вид продукции	Диаметр матрицы, мм	Высота матрицы, мм	Количество вкладышей, шт.
ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» (матрицы производства фирмы Niccolai Trafile S.r.l.)			
Спиральки	600	140	186
Рожки обыкновенные рифленные	600	140	123
Лапша волнистая	600	140	465
Вермишель оригинальная столовая	600	140	306
Рожки витые особые	600	140	609
Смесь фигурная	600	140	358
Ракушки	600	140	126
Рожки особые	600	140	159
Рожки любительские	600	140	530
Гребешки	600	140	415
Рожки особые «трубочки»	600	140	264
Перья обыкновенные	600	140	570
Перья обыкновенные рифленные	600	140	570
Пружинки	600	140	334
Улитки	600	140	244

Вид продукции	Диаметр матрицы, мм	Высота матрицы, мм	Количество вкладышей, шт.
Филиал «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт» (матрицы производства фирмы Landucci S.r.l.)			
Лапша	520	110	324
Улитка	520	110	73
Загадка	520	110	40
Витушка	520	110	427
Спиралька	520	110	239
Рожки любительские	520	110	287
Рожки обыкновенные	520	110	58
Звездная сказка	520	110	188
Вермишель «паутинка»	520	110	116
Перья	520	110	336

Матрица является основным рабочим органом прессы, она предназначена для придания тесту требуемой формы. Ее конструкция должна обеспечивать получение изделий определенной формы, устойчивость этой формы в процессе дальнейшей обработки, высокую производительность прессы и надлежащее качество продукции. Наибольшее распространение получили круглые матрицы со сквозными отверстиями различного профиля, представляющие собой плоский металлический диск. Матрицы работают под значительным внутренним давлением прессования:

- 6–7 МПа для прессов ЛПЛ-2М;
- 9–12 МПа для прессов Б6-ЛПШ и МИТ-2;
- 10–15 МПа для зарубежных прессов.

Кроме того, при непрерывной многочасовой работе корпус матрицы нагревается до 120 °С–140 °С и, как показывает опыт эксплуатации технологической линии, существенным недостатком прессования является значительный прогиб рабочей поверхности матрицы, что приводит к увеличению количества отходов в виде обрезков до 10 % на прессах ЛПЛ-2М. Не решена эта проблема и в прессах зарубежных фирм: чем больше наружный диаметр матрицы, тем больше величина прогиба. Таким образом, на величину прогиба корпуса матрицы влияет два главных фактора:

- внутреннее давление теста;
- температурные деформации.

Для придания прочности и жесткости макаронной матрице в отечественной практике применяют специальные устройства – колосники; в зарубежной практике увеличивают высоту корпуса матрицы до 110 и 140 мм. Однако в полной мере это проблему не решает. Одно из перспективных направлений состоит в коренном изменении конструкции корпуса матрицы. Корпус матрицы предлагается выполнить составным из двух неравных частей, установленных между собой через ступенчатый сквозной зазор.

Необходимо рассмотреть влияние внутреннего давления теста на величину прогиба корпуса матрицы и на максимальные моменты и напряжения для матриц со сплошным корпусом (серийный вариант) и матриц, имеющих составной корпус с температурными ступенчатыми зазорами.

2.1.1. Перфорированные пластины, нагруженные силами, действующими перпендикулярно их плоскости. Определение прогиба рабочей поверхности

Перфорированную пластину при расчете ее деформаций целесообразно заменить сплошной пластиной с приведенными значениями модуля упругости E' и коэффициента Пуассона μ' , воспользовавшись теоремой о единственности решения и принципом Сен-Венана согласно теории упругости с целью аналитического изучения напряженно-деформированного состояния упругости тела [22, 25, 72, 74]:

$$E' = \frac{2(1+k)}{3+k} \frac{c_n}{S_0} E; \quad (2.1)$$

$$\mu' = \frac{1-k}{3+k}, \quad (2.2)$$

где $k = \frac{1,41}{1 + \left(\frac{2h}{c_n}\right)^2}$ – коэффициент снижения жесткости пластины

($2h$ – толщина пластины, м);

$c_{\text{п}} \approx S_0 - d_0$ – ширина перемычек между отверстиями пластины, м
 (d_0 – диаметр отверстий, м);

S_0 – шаг отверстий, м;

E – модуль упругости материала пластины, Н/м².

Определим цилиндрическую жесткость сплошной D и перфорированной пластин D' по формуле

$$D = \frac{2}{3} \frac{Eh^3}{1 - \mu^2}; \quad (2.3)$$

$$D' = \frac{2}{3} \frac{Eh^3}{1 - (\mu')^2}. \quad (2.4)$$

Подставив в уравнение (2.4) значения E' и μ' , получим:

$$D' = \frac{2h^3}{3 \left[1 - \left(\frac{1-k}{3+k} \right)^2 \right]} \frac{2(1+k) c_{\text{п}}}{3+k S_0} = \frac{3+k}{4} (1 - \mu^2) \frac{2 c_{\text{п}}}{3 S_0} \frac{Eh^3}{(1 - \mu^2)}. \quad (2.5)$$

Сопоставив уравнения (2.3) и (2.5), найдем:

$$D' = \gamma D, \quad (2.6)$$

где $\gamma = \frac{3+k}{4} (1 - \mu^2) \frac{c_{\text{п}}}{S_0}$ – коэффициент, учитывающий снижение жесткости перфорированной пластины вследствие перфорации.

Уточненное значение коэффициента приведения жесткости γ при $0,5 \leq \frac{d_0}{S_0} \leq 0,9$ составляет для разбивки отверстий

$$\gamma = \frac{3+k}{4} (1 - \mu^2) \left[1 - 0,906 \left(\frac{d_0}{S_0} \right)^2 \right]. \quad (2.7)$$

Значение коэффициента γ , полученное методом приведения, позволяет проводить расчет перфорированных пластин с использованием действительных (не приведенных) значений величин E и μ .

Напряжения в перфорированных пластинах определяются по приведенной толщине (высоте) $2h_p$, которая вычисляется из уравнения (2.6):

$$h_p = h\sqrt[3]{\gamma}.$$

Значения напряжения без учета концентраций у отверстий находятся по формулам:

$$\sigma_r = \frac{3 M_r}{2 h_p^2}; \quad \sigma_l = \frac{3 M_l}{2 h_p^2}; \quad \sigma_x = \frac{3 M_x}{2 h_p^2}; \quad \sigma_y = \frac{3 M_y}{2 h_p^2}. \quad (2.8)$$

Напряжения, вычисленные по формулам (2.8), являются средними и не учитывают концентрации напряжений около отверстий.

Экспериментальные исследования Н. П. Мельникова [53] позволили установить границы для коэффициента концентрации напряжений K_σ в пределах от 1,6 до 2,3. Меньшее значение коэффициента K_σ относится к перфорированным пластинам, у которых ширина перемычек составляет доли диаметра отверстий. При ширине перемычек, превышающей диаметр отверстий, коэффициент концентрации K_σ принимается более 2. Эти же эксперименты показали, что при статическом нагружении концентрация напряжений не снижает несущей способности перфорированных пластин.

Значения коэффициента ослабления φ_n для изгиба перфорированных круглых пластин экспериментально определены А. Я. Гоголевым [19]:

$$\varphi_n = \frac{P_{отв}}{P_n},$$

где $P_{отв}$ – предельная нагрузка по критерию текучести для перфорированных пластин, Н/м^2 ;

P_n – предельная нагрузка по критерию текучести для сплошных пластин, Н/м^2 .

Были исследованы пластины с соотношением диаметров отверстий к их шагу $\frac{d_o}{S_o}$ в интервале 0,48–0,83, получена эмпирическая формула

$$\varphi_{и} = 0,925 - 0,65 \frac{d_o}{S_o}.$$

Максимальный прогиб пластины, опертой по внешнему краю и нагруженной давлением P , определяется по формуле

$$f_m = \frac{Pr^4}{64D\gamma} \frac{(5 + \mu)}{(1 + \mu)}. \quad (2.9)$$

Максимальные изгибающие моменты будут иметь место в центре пластины:

$$M_r = \frac{Pr^2}{16} (3 + \mu). \quad (2.10)$$

Изложенные теоретические предпосылки используем в дальнейшем для определения прогиба матриц в двух вариантах: сплошных и составных.

Определение прогиба матрицы

Пример 1. Матрицы (пластины) круглые сплошные. Макаронная матрица представляет собой статически неопределенную систему – матрицу в виде перфорированной круглой пластины, опертой по контуру. Сверху на матрицу действует давление теста (рис. 2.1). Наружный диаметр матрицы $2r = 298$ мм, толщина (высота) матрицы $2h = 28$ мм, диаметр вкладыша $d_o = 8$ мм. Матрица перфорирована отверстиями с шагом $S_o = 9,6$ мм. Максимальное давление, действующее на матрицу, $P = 15$ МН/м². Модуль упругости материала матрицы $E = 2,1 \cdot 10^5$ МН/м².

Решение. Ширина перемычек между отверстиями

$$c_{и} = S_o - d_o = 9,6 - 8 = 1,6 \text{ мм.}$$

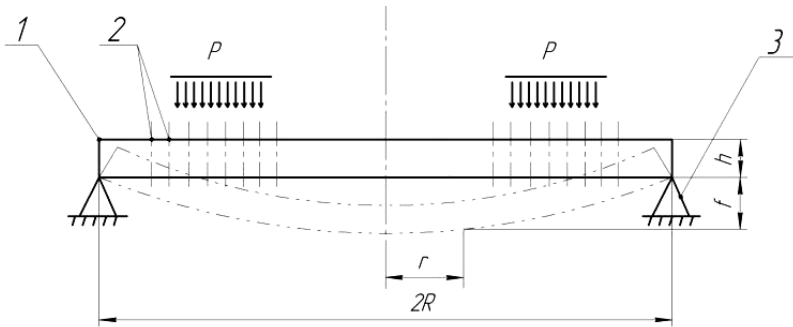


Рис. 2.1. Схема деформаций корпуса сплошной матрицы с шарнирным закреплением по наружному контуру:
 1 – корпус матрицы; 2 – отверстия формирующие; 3 – опоры;
 f – прогиб центра матрицы; h – высота (толщина) корпуса матрицы; P – давление

Коэффициент

$$k = \frac{1,41}{1 + \left(\frac{28}{1,6}\right)^2} = 0,0046.$$

По формуле (2.7) найдем коэффициент приведения жесткости:

$$\gamma = \frac{3 + 0,0046}{4} (1 - 0,3^2) \left[1 - 0,906 \left(\frac{8}{9,6}\right)^2 \right] = 0,252.$$

Цилиндрическую жесткость пластины найдем по формуле (2.3):

$$D = \frac{2}{3} \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,014^3}{1 - 0,3^2} = 4,23 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Максимальные моменты будут иметь место в центре корпуса матрицы. Рассчитаем их по формуле (2.10):

$$M_{\text{то}} = \frac{PR^2}{16} (3 + \mu) = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 0,149^2 (3 + 0,3) = 68\ 680 \text{ Н}\cdot\text{м/м}.$$

Максимальный прогиб пластины, опертой по внешнему краю и нагруженной давлением P , определим по формуле (2.9):

$$f_m = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 0,149^4}{64 \cdot 4,23 \cdot 10^5 \cdot 0,252} \frac{5 + 0,3}{1 + 0,3} = 0,0044 \text{ м} = 4,4 \text{ мм.}$$

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.

Пример 2. Матрицы (пластины) круглые составные. Макаронная матрица представляет собой статически неопределенную систему – матрицу в виде составной перфорированной круглой пластины, опертой по контуру. Сверху на матрицу действует давление теста (рис. 2.2).

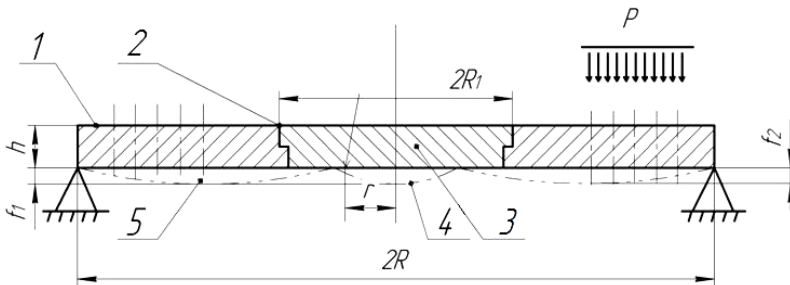


Рис. 2.2. Схема деформаций корпуса составной матрицы с шарнирным закреплением по наружному контуру:

1 – большая часть корпуса матрицы; 2 – зазор сквозной ступенчатый;

3 – меньшая (центральная) часть корпуса матрицы;

4 – центр матрицы; 5 – отверстия формирующие;

r – текущее значение радиуса; R – радиус корпуса матрицы;

R_1 – радиус центральной части корпуса матрицы; f_1 – величина прогиба центральной части матрицы; f_2 – величина прогиба большей (кольцевой) части матрицы; h – высота (толщина) корпуса матрицы; P – давление

Корпус матрицы равномерно нагружен по всей площади давлением $P = 15 \text{ МН/м}^2$. Наружный диаметр матрицы $2R = 298 \text{ мм}$, радиус центрального вкладыша (основания) $R_1 = 130 \text{ мм}$, толщина (высота) матрицы $2h = 28 \text{ мм}$, диаметр вкладыша $d_0 = 8 \text{ мм}$. Матрица перфорирована отверстиями с шагом $S_0 = 9,6 \text{ мм}$. Корпус выполнен

из стали 20 ($\mu = 0,3$, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МН/м²). Температура нагрева корпуса матрицы не превышает 120 °С. Корпус свободно опирается по контуру (большая кольцевая часть). Центральная (меньшая) часть корпуса установлена внутри большей кольцевой части со сквозным ступенчатым зазором.

Определяем максимальное значение прогиба центра корпуса матрицы.

Решение. Для определения прогиба матрицы f_m используем метод наложений.

Ширина перемычек между отверстиями

$$c_{II} = S_o - d_o = 9,6 - 8,0 = 1,6 \text{ мм.}$$

Коэффициент

$$k = \frac{1,41}{1 + \left(\frac{28}{1,6}\right)^2} = 0,0046.$$

По формуле (2.7) найдем коэффициент приведения жесткости:

$$\gamma = \frac{3 + 0,0046}{4} (1 - 0,3^2) \left[1 - 0,906 \left(\frac{8}{9,6}\right)^2 \right] = 0,252.$$

Цилиндрическую жесткость пластины найдем по формуле (2.3):

$$D = \frac{2}{3} \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,014^3}{1 - 0,3^2} = 4,23 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Максимальные моменты будут иметь место в центре корпуса матрицы. Рассчитаем их по формуле (2.10):

$$M_{\infty} = \frac{PR^2}{16} (3 + \mu) = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 0,130^2 (3 + 0,3) = 52\,280 \text{ Н}\cdot\text{м/м.}$$

Максимальный прогиб пластины, опертой по внешнему краю и нагруженной давлением P , определим по формуле (2.9):

$$f_M = \frac{PR_1^4 (5 + \mu)}{64D\gamma (1 + \mu)} = \frac{15 \cdot 10^6 \cdot 0,130^4}{64 \cdot 4,23 \cdot 10^5 \cdot 0,252 (1 + 0,3)} = 0,00256 \text{ м} = 2,56 \text{ мм}.$$

Согласно расчетам прогиб корпуса составной матрицы – примерно 2,56 мм, что почти вдвое меньше прогиба корпуса сплошной матрицы. При этом максимальные моменты в составных матрицах снижены, однако жесткость не изменилась, т. к. зависит от толщины корпуса h (в обоих вариантах одинакова).

2.1.2. Влияние перфорации на прочность и жесткость матрицы

При расчете на прочность матрицы диаметром D_M ее целесообразно рассматривать как перфорированную пластину, нагруженную равномерно распределенным давлением, действующим перпендикулярно к ее плоскости (рис. 2.3).

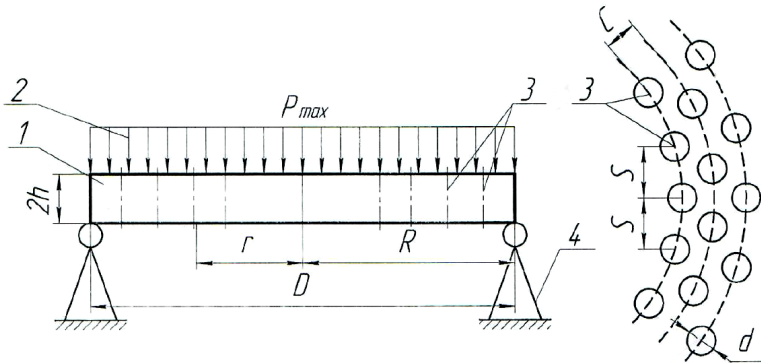


Рис. 2.3. Схема пластины, нагруженной равномерно распределенным давлением:

- 1 – пластина перфорированная (матрица);
- 2 – нагрузка (давление теста); 3 – отверстия формующие; 4 – опора;
- r – текущее значение радиуса; R – радиус пластины; P_{max} – давление теста;
- $2h$ – высота (толщина) пластины; S – шаг между отверстиями;
- d – диаметр отверстия; C – расстояние между рядами отверстий

Принимаем концентрическую форму расположения формующих отверстий (колодцев) и определяем коэффициент снижения жесткости перфорированной пластины вследствие перфорации [50].

$$\gamma = \frac{3+k}{4} (1 + \mu^2) \frac{C}{S}.$$

Определение значений напряжения в перфорированных пластинах производится по приведенной толщине $2h$ [26]:

$$h = \sqrt[3]{\gamma}.$$

Радиальное и тангенциальное значения напряжения без учета концентрации у отверстий определяется по формулам [27]:

$$\sigma_r = \frac{3 M_r}{2 h^2}; \quad \sigma_T = \frac{3 M_T}{2 h^2}.$$

Для матриц, нагруженных равномерно распределенным давлением P_{\max} , радиальный изгибающий момент M_r , приходящийся на единицу длины цилиндрического сечения пластины, и окружной изгибающий момент M_T , приходящийся на единицу длины меридионального сечения пластины, рассчитываются по формулам:

$$M_r = \frac{P_{\max} R^2}{16} (3 + \mu)(1 - \rho^2);$$

$$M_T = \frac{P_{\max} R^2}{16} [3 + \mu - (1 + 3\mu)\rho^2],$$

где $\rho = \frac{r}{R}$.

Изгибающие моменты M_r и M_T достигают наибольших значений в центре матрицы при $r = 0$:

$$M_{r \max} = M_{T \max} = \frac{P_{\max} R^2}{16} (3 + \mu).$$

Соответствующее максимальное напряжение

$$\sigma_{r \max} = \sigma_{T \max} = \frac{3}{32h^2} (3 + \mu) R^2.$$

В составных конструкциях жесткость будет выше, изгибающие моменты меньше – за счет того, что $R_c < R$ (R_c – радиус составной матрицы).

2.2. Теория упругости в температурных деформациях круглых матриц

Предварительные сведения. Теория упругости применяется с целью аналитического изучения напряженно-деформированного состояния упругости тела. Теория упругости помогает проверить решения, полученные с использованием допущений сопротивления материалов, и установить границы применимости этих решений. Некоторые разделы теории упругости при расчете, например, пластин, оболочек, массивов относят к прикладной теории упругости, предполагающей существование линейной зависимости между составляющими напряжениями из следующих допущений [4, 7, 15, 17, 58, 88, 102]:

- о непрерывности (сплошности) среды;
- о естественном состоянии, предполагающем, что в момент нагружения тела деформации и напряжения в любой его точке равны нулю;
- об однородности: состав тела одинаков во всех точках;
- о шаровой изотропности: механические свойства материала одинаковы по всем направлениям;
- об идеальной упругости: полное исчезновение деформации после снятия нагрузки;
- о линейной зависимости между составляющими деформациями и напряжениями;
- о малости деформации: относительные линейные и угловые деформации малы по сравнению с единицей (для таких материалов, как резина или спиральные пружины, создана теория больших упругих деформаций).

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 эта замена вызовет лишь изменение местных деформаций. На основании принципа Сен-Венана можно считать, что изменение усилий на участке поверхности тела почти отражается на направлениях в точках, удаленных на достаточно большое расстояние от места приложения этих усилий (по сравнению с линейными размерами нагруженного участка).

В процессе формирования макаронных изделий матрица подвергается значительному внутреннему давлению теста, одновременно

имеют место существенные температурные напряжения, обуславливающие коробление наружной рабочей поверхности корпуса.

В предматричное пространство шнеком подается винтообразно закрученный поток тестовой массы. Вращающийся шнек своим последним витком создает пульсирующее давление на массу, находящуюся в предматричной камере прессы, откуда она под воздействием этого давления выпрессовывается через формирующие каналы матрицы. Именно наличие пульсации давления в предматричной камере приводит к неравномерному выпрессовыванию полуфабриката, что не только уменьшает производительность действующего оборудования, но и затрудняет механизацию и автоматизацию последующих технологических операций. Поэтому необходимо устранять и это отрицательное явление, присущее шнековому нагнетателю.

Также существенным недостатком прессования на шнековых макаронных прессах является неравномерность выпрессовывания макаронных изделий по плоскости матрицы. Неравномерная скорость прессования приводит к увеличению количества отходов в виде обрезков и в конечном счете – к снижению производительности прессы. Количество отходов по указанной причине, например, на макаронных прессах ЛПЛ-2М достигало 20 %.

На рис. 2.4 представлена эпюра скоростей и давления прессования макаронных изделий через круглую матрицу, полученная Ю. А. Калошиным, где выделены несколько кольцевых зон по диску матрицы с примерно одинаковой скоростью [97].

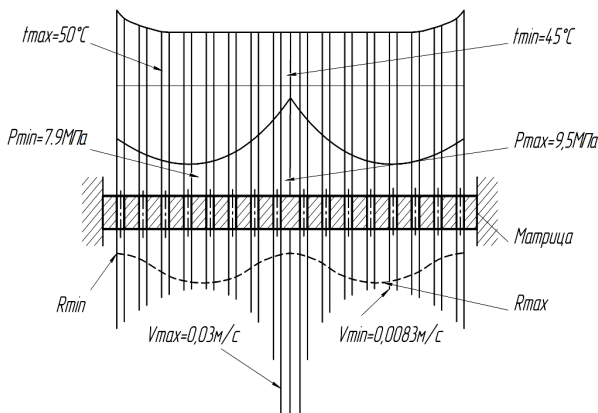


Рис. 2.4. Эпюра скоростей, температуры и давления прессования макаронных изделий через круглую матрицу

В точках, расположенных по наружному радиусу, скорости пресования выше, чем в точках, расположенных ближе к центру матрицы. Наибольшая скорость истечения теста наблюдается в центральной части матрицы.

Исследования Ю. А. Калошина показали, что эпюра скоростей выпрессовываемых полуфабрикатов является прямым отражением характера распределения давления по полю матрицы. Выявлено, что температура в центральной части матрицы примерно одинакова, а ближе к периферии начинает возрастать, достигая максимального значения в зоне предматричной камеры. Повышение температуры в периферийных слоях тестовой массы приводит к уменьшению вязкости формуемой массы и, как следствие, к увеличению скорости выпрессовывания в периферийных зонах матрицы. Высокая скорость формования изделий в центральной зоне матрицы объясняется максимальным давлением тестового потока.

В настоящее время неравномерность скоростей формования макаронных изделий по сечению матрицы является нерешенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике. Известно несколько способов частичного устранения неравномерности формования по зонам матрицы: применение устройств конусно-цилиндрической формы, колосников, тормозящих решеток, устанавливаемых на диск матрицы.

Решающее значение имеет расчет оптимальной длины предматричной камеры прессы: камера должна сглаживать пульсацию давления в потоке входа его в формующее отверстие матрицы. Основными факторами, сглаживающими пульсацию, являются внутреннее вязкостное и внешнее трение на ограничивающей поверхности.

Существенное влияние на эпюру скоростей оказывают кинематические и геометрические характеристики нагнетателя теста, конструктивные изменения предматричной камеры и другие факторы.

Из рис. 2.3 следует, что температура теста имеет максимальное значение (50 °С) на периферийных участках рабочей поверхности матрицы, а минимальное (45 °С) – в центре, т. е. температура корпуса матрицы увеличивается в радиальном направлении.

Кроме того, температура корпуса матрицы изменяется и по высоте (толщине): на входе теста она минимальная, а на выходе – максимальная. Принимаем, что с учетом изложенных допущений круглая матрица является плоской круглой пластиной.

2.2.1. Влияние температуры теста на прогиб и кривизну круглой матрицы. Изгибающие моменты и напряжения

Температура в какой-либо точке круглой пластины является функцией двух переменных (рис. 2.5): радиуса x и расстояния z от точки до срединной плоскости.

В силу линейности основных уравнений для температурных деформаций напряжения, вызванные радиальным изменением температуры ($t_{x2} - t_{x1}$) и изменением температуры по толщине ($t_2 - t_1$) можно вычислить отдельно, а затем алгебраически суммировать [80].

Рассмотрим два случая изменения температуры:

1. Температура одинакова для всех точек, расположенных на одинаковом расстоянии z от срединной плоскости, но меняется по толщине пластины по прямолинейному закону.

2. Температура постоянна по толщине, не зависит от полярного угла Θ , но меняется в зависимости от расстояния x между точкой и центром пластины.

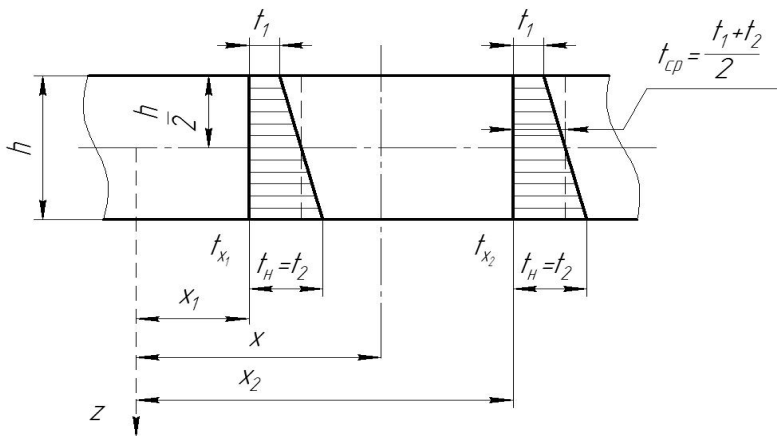


Рис. 2.5. Схема изменения температуры корпуса матрицы по толщине

Рассмотрим случай, когда температура одинакова для всех точек, расположенных на одинаковом расстоянии b от срединной плоскости, но меняется по толщине пластины по прямолинейному закону. При одинаковом во всех точках одной окружности изменении температуры по толщине пластины $\Delta t = t_2 - t_1$, которое подчиняется прямо-

линейному закону, перемещение этих точек пластины, связанное с ее расширением или сжатием, происходит также одинаково по всем направлениям в плане.

В случае повышения температуры нижняя поверхность пластины получает большее расширение, чем верхняя, и пластина изгибается по шаровой поверхности радиусом ρ выпуклостью вниз.

На основании допущения о прямых нормалях можно считать, что относительная деформация ε (по отношению к срединному слою) происходит по наружной поверхности в любом направлении:

$$\varepsilon = \left[\frac{z}{\rho} \right] = \frac{h}{2\rho}, \quad (2.11)$$

где ρ – кривизна изогнутой поверхности, м^{-1} ;

h – толщина матрицы (пластины), м.

С другой стороны, относительная температурная деформация ε отрезка длиной l на наружной поверхности по отношению к срединному слою

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\alpha l_{\text{н}} - \alpha l_{\text{сп}}}{l} = \alpha(t_{\text{н}} - t_{\text{сп}}) - \alpha \left(t_2 - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = \\ &= \alpha \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) = \alpha \left(\frac{\Delta t}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала пластины;

$l_{\text{н}}$ – длина пластины, м;

$l_{\text{сп}}$ – длина среднего слоя, м;

l – длина отрезка пластины, м;

$t_{\text{н}}$ – температура пластины, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{сп}}$ – средняя температура матрицы, $^{\circ}\text{C}$;

$t_2 = t_{\text{н}}$ – температура наружной поверхности матрицы, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 – температура поверхности матрицы со стороны подачи теста, $^{\circ}\text{C}$;

Δt – разность температур ($t_2 - t_1$), $^{\circ}\text{C}$.

Приравняв выражения (2.11) и (2.12), получим формулу для определения кривизны шаровой изогнутой поверхности:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha \Delta t}{h}. \quad (2.13)$$

Если пластина закреплена, на контуре возникнут погонные изгибающие моменты M_r , уничтожающие кривизну, вызванную неравномерным нагревом.

При сферическом изгибе моментами M_r кривизна

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_r}{D(1+\mu)}, \quad (2.14)$$

где M_r – погонный изгибающий момент, Н/м;

D – цилиндрическая жесткость матрицы, м;

μ – коэффициент Пуассона для материала матрицы.

Приравняв выражения (2.13) и (2.14), получим формулу для определения погонного изгибающего момента:

$$M_r = \frac{D(1+\mu)\alpha\Delta t}{h}. \quad (2.15)$$

Разделив выражение (2.15) на момент сопротивления (для круглой пластины $W = \frac{\pi d^3}{32}$) и подставив значение цилиндрической жесткости $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$, определим наибольшее напряжение:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{M_r}{W} = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{(1+\mu)\alpha\Delta t}{h} \frac{32}{\pi d^3} = \\ &= \frac{8Eh^2(1+\mu)\alpha\Delta t}{3(1-\mu^2)\pi d^3} = \frac{E\alpha\Delta t}{2(1-\mu)}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где W – момент сопротивления матрицы.

2.2.2. Кривизна срединной поверхности круглой пластины, изгибающие моменты и напряжения при изменении температуры по высоте (толщине) пластины и в ее радиальном направлении

Пример 1. Определить радиус кривизны ρ изогнутой срединной поверхности круглой пластины толщиной $h = 20$ мм (рис. 2.6), если температура t_2 на ее нижней поверхности изменяется от 0°C до 100°C , а температура t_1 на верхней поверхности – от 0°C до 20°C . Определить наибольшие значения изгибающего момента и напряжения, которые возникнут в пластине. Коэффициент линейного расширения $\alpha = 0,000012$, $E = 2 \cdot 10^5$ МН/м², $\mu = 0,28$.

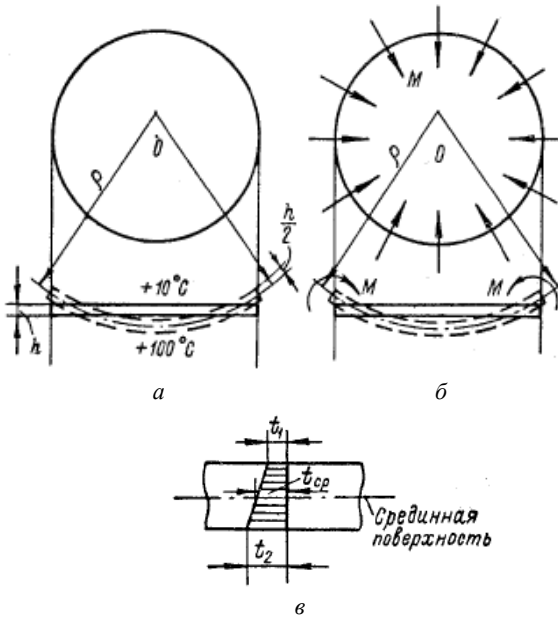


Рис. 2.6. Схема круглой пластины с изменением температуры по толщине: а – изогнутая срединная поверхность круглой пластины толщиной h при изменении температуры поверхностей; б – напряжения, возникающие в пластине при изменении температуры; в – изменение температуры по толщине пластины

Решение. Изменение температуры по толщине пластины

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 100 - 20 = 80^\circ\text{C}.$$

Относительная температурная деформация нижнего слоя

$$\varepsilon = \alpha \left(\frac{\Delta t}{2} \right) = 0,000012 \cdot \frac{80}{2} = 0,0054.$$

Кривизна изогнутой срединной поверхности

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0,000012 \cdot 80}{0,02} = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}.$$

Радиус кривизны

$$\rho = \frac{10^3}{5,4 \cdot 10^{-2}} = 18,52 \text{ м}.$$

Напряжения, возникающие при воздействии температуры, равны напряжениям, которые возникнут, если приложить по контуру пластины радиальные изгибающие моменты (рис. 2.5), вычисленные по формуле (2.15):

$$M_r = \frac{D(1+\mu)}{\rho} = \frac{Eh^3}{12(1+\mu)\rho} = \frac{2 \cdot 10^5}{12(1+0,28) \cdot 18,52} = 0,0101 \text{ МН} \cdot \text{м/м}.$$

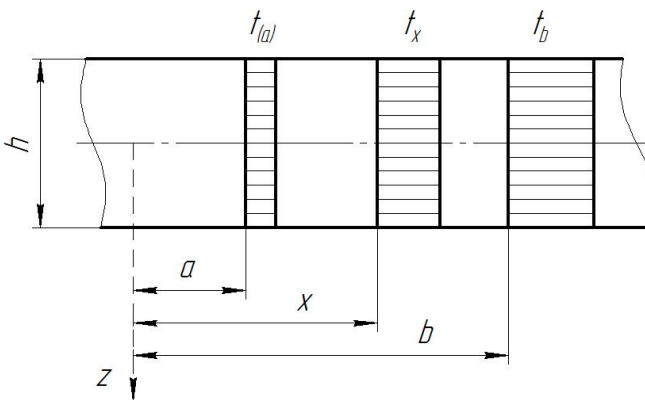


Рис. 2.7. Схема круглой пластины с радиальным изменением температуры

Напряжение на поверхности

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{M_r}{W} = \pm \frac{M_r \cdot 6}{h^2} = \pm \frac{0,0101 \cdot 6}{0,02^2} = \pm 151,5 \text{ МН/м}^2.$$

Рассмотрим случай, когда температура постоянна по толщине, не зависит от полярного угла Θ , но меняется в зависимости от расстояния x между точкой и центром пластины. Круглая пластина подвергается действию температуры, имеющей радиальный перепад (рис. 2.7) на большей части пластины.

Для краткости обозначим $t_{(x)}$ как t .

Напряженное состояние пластины считаем плоским, т. е. полагаем, что $\sigma_x = 0$. В силу симметрии условий и расчетной схемы перемещения u зависят только от радиуса x , а перемещения v равны нулю. Поэтому относительные деформации

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dx} = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_T) + \alpha t; \\ \varepsilon_T &= \frac{u}{x} = \frac{1}{E}(\sigma_T - \mu\sigma_r) + \alpha t. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Решив уравнения (2.17) относительно σ_r и σ_T , получим:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{du}{dx} + \mu \frac{u}{x} - (1+\mu)\alpha t \right]; \\ \sigma_T &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{u}{x} + \mu \frac{du}{dx} - (1+\mu)\alpha t \right]; \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

$$\tau_{rT} = 0.$$

Подставим значения уравнений (2.18) в уравнение равновесия $\Sigma_r = 0$ плоской задачи в полярных координатах, принимающее в данном случае ($\rho = x$) вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dx} - \frac{\sigma_r - \sigma_T}{x} = 0.$$

Получим дифференциальное уравнение для радиального перемещения

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{du}{dx} - \frac{u}{x^2} = (1 + \mu) \alpha \frac{dt}{dx}.$$

Для интегрирования этого уравнения запишем левую его часть следующим образом:

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{x} \frac{d}{dx} (xu) \right] = (1 + \mu) \alpha \frac{dt}{dx}. \quad (2.19)$$

Результат первого и второго интегрирования уравнения (2.19):

$$u = \frac{(1 + \mu) \alpha}{x} \int_a^x t(x_1) x_1 dx_1 + \frac{1}{2} C_1 x + \frac{C_2}{x}. \quad (2.20)$$

В выражении (2.20) через x_1 обозначен переменный радиус, определяющий точки, расположенные между a и x . Если подставить это выражение в формулы (2.18), то получатся следующие выражения для температурных напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E\alpha}{x^2} \int_a^x t(x_1) x_1 dx_1 + \frac{EC_1}{2(1-\mu)} + \frac{EC_2}{(1+\mu)x^2}; \\ \sigma_T &= \frac{E\alpha}{x^2} \int_a^x t(x_1) x_1 dx_1 - Eat(x) + \frac{EC_1}{2(1-\mu)} + \frac{EC_2}{(1+\mu)x^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

$$\tau_{rT} = 0.$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий на контурах пластины. Если отверстия радиусом a в пластине нет, то интегрирование в формулах (2.21) выполняется в пределах от нуля до x .

Пример 2. Определить радиальный и окружной изгибающий моменты и, пользуясь третьей теорией прочности, расчетные напряжения на нижней поверхности в центре круглой стальной крышки,

опертой по контуру и нагруженной равномерно распределенной внешней нагрузкой (рис. 2.8).

Определить величину прогиба в центре крышки. Наружный радиус пластины $r = 200$ мм, толщина $h = 10$ мм, интенсивность равномерно распределенной нагрузки $q = 12$ Н/см², $E = 2 \cdot 10^7$ Н/см², $\mu = 0,3$.

Решение. По формулам уравнений углов, составляемых касательной к изогнутой срединной поверхности с осью x , полагая в них $P = 0$, находим уравнения углов φ и прогибов w :

$$\begin{aligned} \varphi &= -\frac{q}{16D}x^3 + \frac{C_1}{4}x^2 - C_2\frac{1}{x}; \\ f &= \frac{q}{64D}x^4 - \frac{C_1}{4}x^2 - C_2\ln x + C_3. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Граничные условия для пластины с опертыми краями:

- 1) $x = 0, \varphi = 0$;
- 2) $x = r, w = 0$;
- 3) $x = r, M_r = 0$.

Из первого условия находим $\frac{C_2}{x} = 0$, или $C_2 = 0$. Из второго условия получаем уравнение с двумя неизвестными – C_1 и C_3 :

$$\frac{qr^4}{64D} - C_1\frac{r^2}{4} + C_3 = 0. \quad (2.23)$$

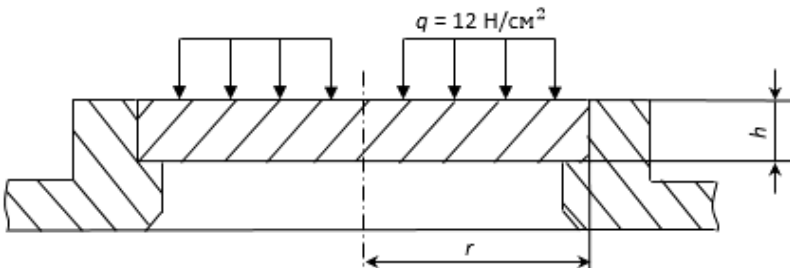


Рис. 2.8. Схема круглой стальной пластины, опертой по контуру и нагруженной равномерно распределенной внешней нагрузкой с радиальным изменением температуры

Для использования третьего условия составим выражение радиального изгибающего момента:

$$M_r = D \left(\frac{d\varphi}{dx} + \mu \frac{\varphi}{x} \right). \quad (2.24)$$

Дифференцируя (2.22) и учитывая, что $C_2 = 0$, найдем:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{3}{16} \frac{q}{D} x^3 + \frac{C_1}{2}.$$

Подставив это выражение и выражение (2.22) в формулу (2.24), получим:

$$M_r = D \left(-\frac{qx^2}{16D} (3 + \mu) + \frac{C_1}{2} (1 + \mu) \right).$$

На основании третьего условия:

$$-\frac{qr^2}{16D} (3 + \mu) + \frac{C_1}{2} (1 + \mu) = 0.$$

Отсюда произвольная постоянная

$$C_1 = -\frac{qr^2 (3 + \mu)}{8D (1 + \mu)}.$$

Подставив это значение C_1 в уравнение (2.23), получим произвольную постоянную:

$$C_3 = C_1 \frac{r^2}{4} - \frac{qr^4}{64D} = \frac{qr^4 (5 + \mu)}{64D (1 + \mu)}.$$

При найденных произвольных постоянных выражение для радиального изгибающего момента примет вид:

$$M_r = \frac{q(3 + \mu)}{16} (r^2 - x^2). \quad (2.25)$$

Окружной изгибающий момент

$$M_T = D \left(\frac{\varphi}{x} + \mu \frac{d\varphi}{dx} \right) = D \left[-\frac{q}{16D} x^2 + \frac{C_1}{2} - \frac{3}{16} \mu \frac{q}{D} x^2 + \mu \frac{C_1}{2} \right] = \quad (2.26)$$

$$= -\frac{qx^2}{16D} (3\mu + 1) + \frac{qr^2}{16} (3 + \mu).$$

Из выражений (2.25) и (2.26) видно, что наибольшие значения радиального и окружного изгибающих моментов M_r и M_T получаются при $x = 0$, т. е. в центре пластины:

$$M_{\max} = M_r = M_T = \frac{qr^2}{16} (3 + \mu) = \frac{12 \cdot 20^2}{16} (3 + 0,3) = 990 \text{ Н} \cdot \text{см/см}.$$

Соответствующие напряжения на нижней поверхности пластины растягивающие:

$$\sigma_{r \max} = \sigma_{T \max} = \frac{M_{\max} \cdot 6}{h^2} = \frac{990 \cdot 6}{1^2} = 5940 \text{ Н/см}^2.$$

Главные напряжения $\sigma_1 = \sigma_2 = 5940 \text{ Н/см}^2$, $\sigma_3 = 0$, поэтому на основании третьей теории прочности расчетное напряжение

$$\sigma_{\text{расч}} = \sigma_1 - \sigma_3 = 5940 - 0 = 5940 \text{ Н/см}^2.$$

2.3. Моделирование тепловых процессов в составных матрицах при высокотемпературных режимах замеса и формования теста

Предварительные сведения. При высокотемпературных режимах замеса и формования теста существенно повышается температура в корпусе матрицы – до 120 °С, а это приводит к возрастанию температурных напряжений, отрицательно влияющих на прочность, жесткость и прогиб срединной рабочей поверхности матрицы (выпучивание). В связи с этим рассмотрение закономерностей тепловых процессов и их математическое описание представляется актуальной задачей.

На пищевых предприятиях Республики Беларусь для изготовления макаронных изделий применяются комплексные автоматизированные

линии зарубежного производства, в состав которых входят: установка подготовки, смешения и подачи сырья, пресс, сушилка, охладитель и бункеры промежуточного хранения готового продукта.

Современный пресс для изготовления изделий состоит из смесителя с системами дозирования муки и воды, прессующего устройства (шнека), матрицы и режущего механизма для резки выпрессованного полуфабриката. Используется высокотемпературный замес и формование теста.

Конструкция матрицы является одним из определяющих факторов, влияющим на технико-экономические показатели работы прессы. Матрица включает в себя цилиндрический корпус с колодцами, расположенными на концентрических окружностях, и установленные внутри колодцев вкладыши со сквозными формующими отверстиями, сгруппированными в гнезда.

Однако в данной конструкции матрицы не решены вопросы, связанные с компенсацией температурных деформаций ее рабочей поверхности: в процессе работы корпус матрицы нагревается, а при нагревании большинство веществ расширяется. Это можно объяснить с позиции механической теории теплоты, поскольку при нагревании молекулы или атомы вещества начинают двигаться быстрее. В твердых телах атомы начинают с большей амплитудой колебаться вокруг своего среднего положения в кристаллической решетке, им требуется больше свободного пространства. В результате тело (в данном случае матрица) расширяется и деформируется, что приводит к короблению рабочей поверхности матрицы, зазор между корпусом матрицы и вращающимся ножом становится неодинаковым по всей площади рабочей поверхности матрицы. Это обуславливает неравномерное обрезание вращающимся ножом отформованных макаронных изделий (различная длина, превышающая нормы по СТБ 1963–2009), выходящих из формующих отверстий, и ухудшение качества готовой продукции, а следовательно, и снижение производительности прессы за счет отходов, причем увеличиваются удельные затраты энергии.

2.3.1. Дифференциальное уравнение теплопроводности корпуса матрицы. Основные закономерности процесса

Для улучшения конструкции матрицы необходимо рассмотреть основные закономерности тепловых процессов и проанализировать дифференциальное уравнение теплопроводности, используя метод А. Г. Касаткина [34].

Выделим в матрице элементарный параллелепипед объемом dV с ребрами dx , dy и dz . Плотность ρ , теплоемкость c и теплопроводность λ считаем одинаковыми во всех точках параллелепипеда и не изменяемыми во времени. Принимаем, что температура на левой грани $dydz$ равна t , на противоположной грани $t + \frac{dt}{dx} dx$ (рис. 2.9).

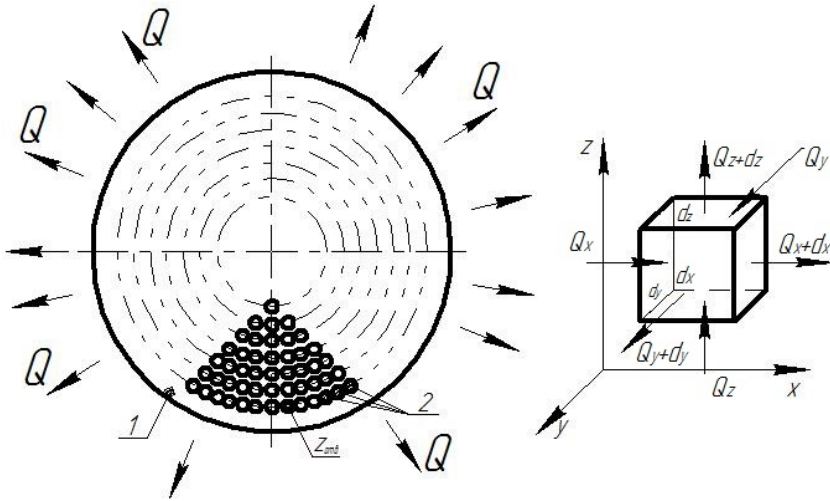


Рис. 2.9. Схемы для вывода основных закономерностей процесса теплопроводности (стрелками показано направление тепловых потоков):

1 – корпус матрицы; 2 – отверстия формирующие;

$Z_{отв}$ – количество формирующих отверстий;

S_m – рабочая поверхность матрицы; Q – количество теплоты

Количество теплоты, входящее через соответствующую грань параллелепипеда, не равно количеству теплоты, выходящему через противоположную грань, т. к. часть теплоты задействуется на повышение температуры в объеме параллелепипеда (в данном случае колодцы).

Количество теплоты, входящее в параллелепипед через его грани за промежуток времени dt по оси x через грань $dydz$, по оси y через грань $dxdz$ и по оси z через грань $dxdy$:

$$Q_x = -\lambda \frac{dt}{dx} dydzd\tau; \quad Q_y = -\lambda \frac{dt}{dy} dxdzd\tau; \quad Q_z = -\lambda \frac{dt}{dz} dxdy d\tau.$$

Количество теплоты, выходящее из параллелепипеда через противоположные грани за тот же промежуток времени по осям x , y , z :

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{dt}{dx} dydzd\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dx} \left(\frac{dt}{dx} \right) dx dy dz d\tau \right];$$

$$Q_{y+dy} = -\lambda \frac{dt}{dy} dx dz d\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dy} \left(\frac{dt}{dy} \right) dy dx dz d\tau \right];$$

$$Q_{z+dz} = -\lambda \frac{dt}{dz} dx dy d\tau + \left[-\lambda \frac{d}{dz} \left(\frac{dt}{dz} \right) dz dx dy d\tau \right].$$

Определим разность между значениями количества теплоты, вошедшей в параллелепипед и вышедшей из него за промежуток времени dt соответственно, по осям x , y , z :

$$dQ_x = Q_x - Q_{x+dx} = \lambda \frac{d^2 t}{dx^2} dx dy dz d\tau;$$

$$dQ_y = Q_y - Q_{y+dy} = \lambda \frac{d^2 t}{dy^2} dy dx dz d\tau;$$

$$dQ_z = Q_z - Q_{z+dz} = \lambda \frac{d^2 t}{dz^2} dz dx dy d\tau.$$

Общее приращение теплоты в параллелепипеде за время dt

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dx dy dz d\tau.$$

Так как $dx dy dz = dV$, получим:

$$dQ = \lambda \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} \right) dV d\tau.$$

Выражение в скобках является оператором Лапласа $\Delta^2 t$:

$$dQ = \lambda \Delta^2 t dV d\tau. \quad (2.27)$$

По закону сохранения энергии, приращение количества теплоты в объеме параллелепипеда равно количеству теплоты, расходуемому на изменение энтальпии этого объема:

$$dQ = c\rho dV \frac{dt}{d\tau} d\tau, \quad (2.28)$$

где $\frac{dt}{d\tau} d\tau$ – изменение температуры объема за время $d\tau$.

Приравняв уравнения (2.27) и (2.28), получим:

$$c\rho dV \frac{dt}{d\tau} d\tau = \lambda \Delta^2 t dV d\tau.$$

Примем $\frac{dt}{d\tau} = \alpha$ и, произведя сокращения, получим:

$$\frac{dt}{d\tau} = \alpha \Delta^2 t. \quad (2.29)$$

Уравнение (2.29) показывает распределение температуры в любой точке матрицы, благодаря которому теплота передается от колодцев. Уравнение (2.29) является дифференциальным уравнением теплопроводности в неподвижной матрице (уравнением Фурье), в котором α – коэффициент температуропроводности, характеризующий теплотехнические свойства матрицы.

Уравнения (2.27–2.29) описывают распределение температур при передаче теплоты теплопроводностью в самом общем виде, без учета, в частности, формы тела, через которое проводится теплота. Для конкретных условий данные уравнения должны быть дополнены граничными условиями, характеризующими геометрические факторы. В дальнейшем необходимо рассмотреть процесс теплопроводности стенки колодца.

2.3.2. Теплопроводность цилиндрической стенки колодца. Построение математической модели

Рассмотрим однородную цилиндрическую стенку колодца длиной (высотой) h с внутренним r_1 и внешним r_2 радиусами. Коэффициент теплопроводности материала колодца λ постоянный. Внутренняя и внешняя поверхности имеют определенные температуры t_1 и t_2 , причем $t_1 > t_2$ и температура изменяется только в радиальном направлении r (рис. 2.10) [84]. Температурное поле в данном случае будет одномерным, а изотермические поверхности – цилиндрическими, имеющими с колодцами общую ось.

Выделим внутри стенки кольцевой слой радиусом r и толщиной dr , ограниченный изотермическими поверхностями. Тогда, согласно закону Фурье, количество теплоты, проходящее в единицу времени через этот слой:

$$Q = -\lambda S \frac{dt}{dr} = -2\lambda\pi r h \frac{dt}{dr}, \quad \text{или} \quad dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda h} \frac{dr}{r}. \quad (2.30)$$

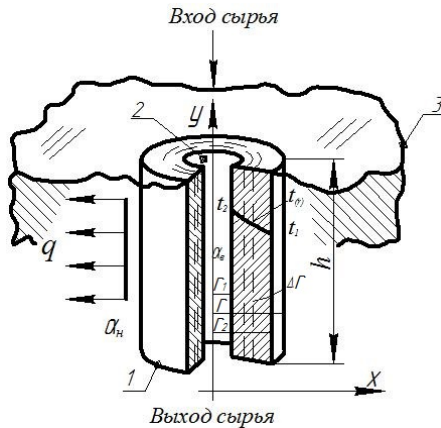


Рис. 2.10. Схема одномерного процесса

теплопроводности цилиндрической стенки колодца:

- 1 – стенка колодца; 2 – отверстие формующее; 3 – матрица;
- t_1 – температура на наружной поверхности колодца; t_2 – температура на внутренней поверхности колодца; r – радиус слоя стенки; r_1 – радиус внутренней стенки;
- r_2 – радиус наружной стенки; h – высота (длина) колодца; q – направление теплового потока; Δr – толщина слоя стенки; α_n – коэффициент теплоотдачи от тестовой массы к стенке; α_{ni} – коэффициент теплоотдачи от стенки колодца к корпусу

После интегрирования уравнения (2.30) получим:

$$t = -\frac{Q}{2\pi\lambda h} \ln r + C. \quad (2.31)$$

При $r = r_1, t = t_1, r = r_2, t = t_2$, исключив постоянную C , найдем расчетную формулу:

$$Q = \frac{2\pi\lambda h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2\pi\lambda h}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) = \frac{\pi h (t_1 - t_2)}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (2.32)$$

Разделим значение количества теплоты Q , проходящей через стенку колодца, на единицу длины (высоты). Тогда уравнение (2.32) примет вид:

$$q_h = \frac{Q}{h} = \frac{\pi \Delta t}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где q_h – плотность теплового потока, Вт/м².

Поскольку внутренняя и внешняя поверхности колодца имеют различные площади, различными будут и значения плотности тепловых потоков q_1 и q_2 :

$$q_1 = \pi d_1 q_2, \quad \text{или} \quad d_1 q_1 = d_2 q_2.$$

Уравнение температурной кривой внутри однородной цилиндрической стенки можно получить из уравнения (2.31). Подставим значения Q и C :

$$t_r = t_1 - \frac{Q}{2\pi\lambda h} \ln \frac{d_2}{d_1} = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d_x}{d_1}.$$

Таким образом, при $\lambda = \text{const}$ температура изменяется по логарифмическому закону.

Построение математической модели. Для получения уравнения, описывающего распространение теплового потока, определим количество теплоты Δq , Вт, проходящее через слой стенки толщиной Δr (рис. 2.11) [83]. Согласно закону Фурье:

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

где S – площадь сечения, м^2 , перпендикулярного к тепловому потоку, т. е. $S = 2\pi R h$ (h – высота колодца, м).

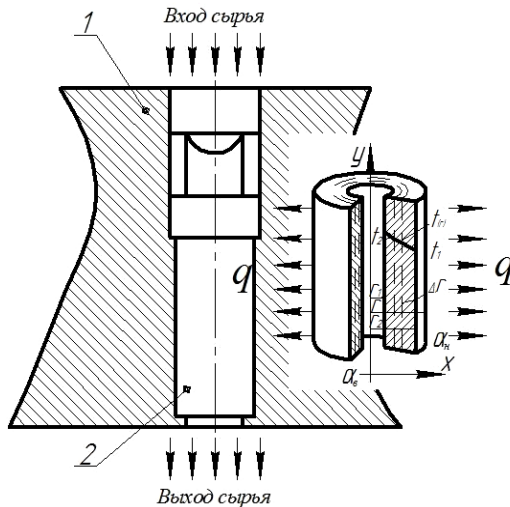


Рис. 2.11. Схема одномерного процесса теплопроводности цилиндрической стенки колодца (для вывода уравнения теплопередачи цилиндрической стенки колодца):

1 – корпус матрицы; 2 – вкладыш формирующий;

q – тепловой поток; α_n – коэффициент теплоотдачи от теста к стенке колодца; α_k – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки колодца в окружающую среду; S – поверхность теплопередачи (теплоотдачи)

Количество теплоты, которое идет на нагревание колодца до температуры t , можно определить по формулам:

$$\Delta q = c\rho\Delta V(t - t_1);$$

$$\Delta q = c\rho \cdot 2\pi r h \Delta r (t - t_1),$$

где c – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 V – объем, м³;
 t_1 – температура окружающей среды, °С.

Согласно закону Фурье:

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

Приравняв первые части выражений для Δq и сократив их на $2\pi\lambda h \Delta r$, получим:

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

где $\frac{c\rho}{\lambda} > 0$, или

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

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

Получено аналитическое выражение для нахождения температуры на разных по глубине участках цилиндрической стенки колодца, если известна температура на внутренней стенке, т. е. $t(r_0) = t_0$. Использован метод В. Г. Скатецкого [75].

Внутри колодца находится теплоноситель (тестовая масса) с высокой температурой t_1 и коэффициентом теплоотдачи от него к внутренней поверхности стенки колодца α_v . Снаружи колодца (матрицы) – более холодный теплоноситель, имеющий температуру t_2 . Коэффициент теплоотдачи от наружной стенки колодца к более холодному теплоносителю (окружающей среде) – α_n .

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

$$Q = \alpha_b S \tau (t_1 - t_{ct_1}) = \alpha_b \cdot 2\pi r h (t_1 - t_{ct_1}). \quad (2.33)$$

Количество теплоты, проходящее сквозь стенку колодца путем теплопроводности, находим в соответствии с уравнением (2.32):

$$Q = \frac{2\lambda\pi h}{2,31 \lg \frac{r_H}{r_B}} (t_{ct_1} - t_{ct_2}). \quad (2.34)$$

Количество теплоты, передаваемое от стенки колодца в окружающую среду:

$$Q = \alpha_n S_n (t_{ct_2} - t_2) = \alpha_n \cdot 2\pi h r_n \tau (t_{ct_2} - t_2). \quad (2.35)$$

Преобразовав уравнения (2.33–2.35), получим:

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

или

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

При $h = 1$ определим:

$$Q = K_R \cdot 2\pi \tau (t_1 - t_2), \quad (2.36)$$

где K_R – коэффициент теплопередачи, отнесенный к единице длины.

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

3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАТРИЦ И УЗЛОВ ПРЕССОВАНИЯ. НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

3.1. Составные матрицы с фиксированным температурным зазором

На рис. 3.1 представлена принципиально-конструктивная схема кольцевой матрицы с улучшенными теплотехническими и технологическими характеристиками [42].

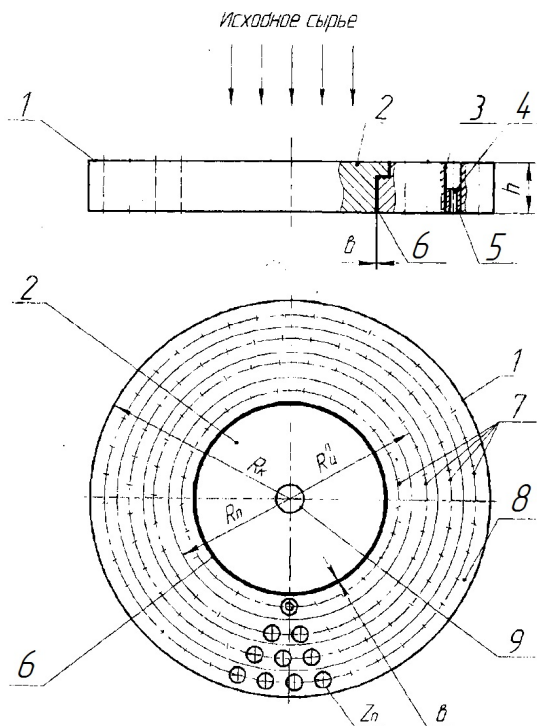


Рис. 3.1. Принципиально-конструктивная схема составной матрицы для производства макаронных изделий (патент РФ № 17855)

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, основание 2, колодцы 3 и расположенные внутри колодцев вкладыши 5 со сквозными формирующими отверстиями 4.

Рабочая поверхность корпуса разделена на ряд условных колец 8. Колодцы 3 расположены в условных кольцах 8 на концентрических окружностях 7. Основание 2 установлено относительно корпуса 1 матрицы с зазором 6 и имеет центральное отверстие 9.

Таким образом, корпус матрицы выполнен составным, разделенным на две неравные части по внутреннему радиусу R_b^n последнего условного кольца, считая от радиуса корпуса матрицы. Центральное отверстие 9 обеспечивает соосность при установке матрицы и рабочего вала шнека (не показан).

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто преодолевает сопротивление матрицы с помощью шнека и продавливается сквозь формирующие отверстия 4 вкладышей 5, установленных в колодцах 3 корпуса 1.

В процессе формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается, в результате согласно теории линейного расширения металлов возникают температурные деформации (максимальные – в центральной части матрицы на осях симметрии круглого основания 2). 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 6. Снятию максимальных температурных деформаций будет способствовать и центральное отверстие 9. Одновременно температурным деформациям подвергается и большая периферийная часть матрицы – кольцеобразная рабочая поверхность, которая также имеет возможность линейного расширения благодаря зазору 6.

В результате взаимного перемещения двух составных частей корпуса рабочая поверхность матрицы будет иметь минимальное коробление торцевой (рабочей) поверхности, что и обуславливает равномерное отрезание отформованных изделий вращающимся (подрезным) ножом.

Таким образом, зазор 6 позволяет компенсировать температурные деформации и получить минимальное коробление рабочей поверхности матрицы. В этом случае вращающийся подрезной нож (на рис. 3.1 не показан) будет отрезать отформованные изделия одинаковой длины.

3.2. Составные матрицы с тепловыми ребрами

Как показывает обзор соответствующей литературы, до настоящего времени не решены вопросы, связанные с компенсацией температурных деформаций рабочей поверхности матрицы: в процессе работы ее корпус нагревается и деформируется. Это приводит к короблению нижней поверхности матрицы и обуславливает неравномерное обрезание вращающимся ножом отформованных макаронных изделий, выходящих из формирующих отверстий. Как следствие, ухудшается качество готовой продукции и снижается производительность прессы за счет увеличения отходов.

Кроме того, серийные конструкции матриц имеют толщину (высоту) и массу с запасом, что приводит к значительному гидравлическому сопротивлению, снижению производительности и увеличению удельных энергозатрат.

На рис. 3.2 представлена принципиально-конструктивная схема составной матрицы, снабженной тепловыми ребрами [44].

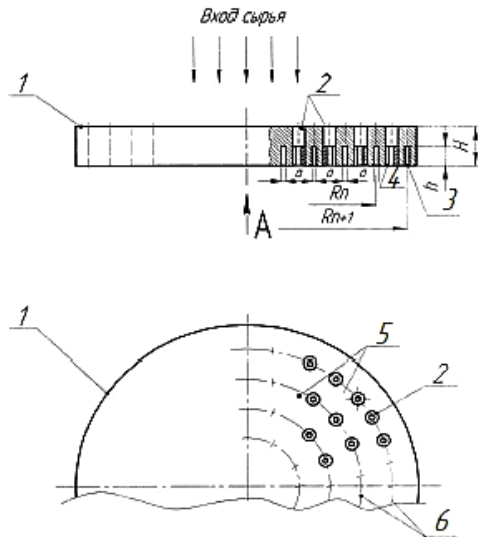


Рис. 3.2. Схема составной матрицы с тепловыми ребрами (патент РБ № 19138 на изобретение):

R_n – радиус расположения n -го канала (зазора);

R_{n+1} – радиус расположения $(n + 1)$ -го канала (зазора); a – ширина канала (зазора);

h – глубина канала (зазора); H – толщина (высота) корпуса матрицы

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, колодцы 2 и расположенные внутри колодцев вкладыши 4 со сквозными формующими отверстиями.

Рабочая поверхность корпуса разделена на ряд условных колец 5. Колодцы 2 расположены рядами в условных кольцах 5 на концентрических окружностях 6.

На нижней стороне корпуса 1 выполнены глухие щелевидные каналы (зазоры) 3, расположенные по концентрическим окружностям между рядами колодцев 2.

Толщина H корпуса 1 матрицы равна глубине колодцев 2, высота вкладышей 4 меньше глубины колодцев 2.

В данном устройстве глубина h каналов 3 равна высоте (длине) вкладышей 4, т. е. высота (длина) вкладышей 4 равна h (рис. 3.2).

Вкладыши 4 установлены методом запрессовки в нижней части сквозных колодцев 2 на одном уровне с нижней стенкой корпуса 1 (заподлицо).

Рабочее положение матрицы – горизонтальное, вход сырья – сверху, выход – снизу. Под матрицей устанавливается вращающийся нож, с помощью которого осуществляется резка сырых изделий, с одновременной обдувкой холодным воздухом.

Устройство работает следующим образом (рис. 3.3). В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто с помощью шнека, преодолевая сопротивление матрицы, продавливается сквозь формующие отверстия вкладышей 4, установленных в сквозных колодцах 2 корпуса 1. При этом осуществляется резка на весу отформованных сырых изделий вращающимся ножом (не показан) по заданной длине и одновременная обдувка их воздухом с последующей раскладкой на устройстве для сушки.

В процессе формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается. В результате согласно теории линейного расширения металлов возникают температурные деформации, при этом вкладыши 4 с формующими отверстиями являются центрами максимальных концентраций давления и температуры. Именно в этих местах имеет место превращение механической энергии движения теста в тепловую – процесс теплопроводности в твердом теле с внутренними источниками теплоты.

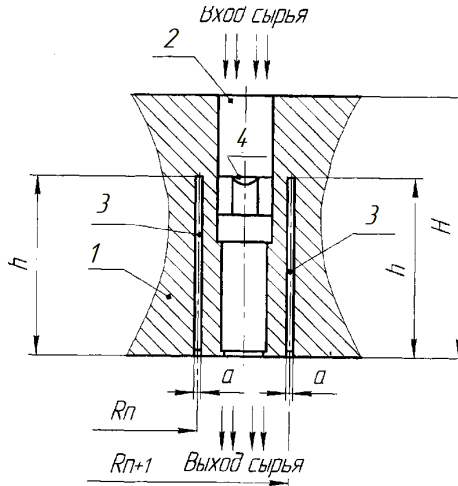


Рис. 3.3. Схема установки вкладыша в корпусе матрицы, снабженной тепловыми ребрами

Благодаря наличию каналов (зазоров) 3 осуществляется интенсивный отвод теплоты от вкладышей 4 в окружающую среду за счет развитой поверхности теплоотдачи и принудительной циркуляции воздушных потоков. Одновременно происходит компенсация температурных деформаций корпуса матрицы и снижение коробления ее нижней поверхности: нож плотно скользит по поверхности и равномерно отрезает отформованные сырые изделия одинаковой длины. Ширина кольцевых каналов (зазоров) 3 может изменяться от 0,5 до 2,0 мм в зависимости от расстояния между рядами колодцев 2 (рис. 3.4).

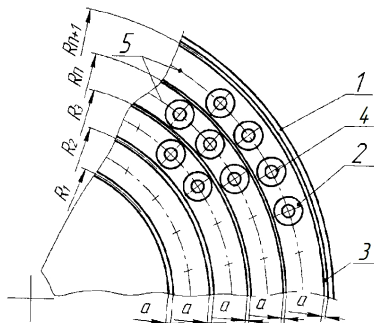


Рис. 3.4. Схема нижней стороны матрицы, снабженной тепловыми ребрами

Глубина h каналов (зазоров) 3 может быть больше или меньше высоты (длины) вкладышей 4 , однако оптимально принять их равными. Каналы 3 расположены на нижней стороне матрицы между рядами формирующих отверстий (колодцев) и на прочностные характеристики корпуса отрицательного влияния не оказывают.

Каналы (зазоры) 3 выполняют две основные функции:

- способствуют отводу теплоты от формирующих отверстий;
- снижают температурные деформации корпуса матрицы и уменьшают коробление ее нижней поверхности (каналы 3 при нагревании колодцев с вкладышами работают как температурные зазоры – дают возможность компенсировать увеличение длины (ширины) кольца, на котором расположены колодцы с вкладышами).

В результате предлагаемого технического решения получена матрица, снабженная тепловыми ребрами, которые значительно увеличивают теплоотдающую поверхность и тем самым интенсифицируют теплообмен между матрицей и окружающей средой.

Эффективность тепловых ребер существенно возрастает при увеличении скорости воздушных потоков, что имеет место в процессе обдувки сырых отформованных изделий.

Потери теплоты наружной поверхности матрицы в окружающую среду определяются по формуле

$$Q = \alpha F (t_1 - t_2) \tau, \quad (3.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду от нижней стороны матрицы, Вт/(м²·°С);

F – нижняя поверхность матрицы (поверхность теплоотдачи), м²;

t_1 – температура нижней поверхности матрицы, °С;

t_2 – температура окружающей среды, °С;

τ – время работы матрицы, с.

Из уравнения (3.1) следует, что при наличии глубоких шелевидных кольцеобразных каналов на нижней поверхности матрицы ее поверхность теплоотдачи F значительно возрастает по сравнению с обычной конструкцией, значит потери теплоты Q существенно увеличиваются, что и требуется для решения поставленной технической задачи.

Толщина корпуса матрицы может изменяться от 50 до 140 мм, а высота (длина) вкладышей – от 10 до 20 мм соответственно. Так,

в итальянских матрицах фирмы Niccolai матрица имеет следующие параметры:

- наружный диаметр – 600 мм;
- толщина (высота) корпуса – 140 мм;
- высота (длина) вкладышей – 22 мм;
- диаметр вкладышей – 18 мм;
- количество рядов формирующих отверстий (колодцев), расположенных по концентрическим окружностям – 7 шт.;
- шаг рядов (колодцев) – 24 мм.

Применительно к итальянским матрицам глубина каналов (зазоров) может быть равна 22–25 мм при их ширине от 1,0 до 2,0 мм, а их общее количество – 9, что существенно увеличит поверхность теплоотдачи корпуса в целом (до 25 %–30 %).

Снижение температуры корпуса матрицы будет также способствовать увеличению пластичности теста, уменьшению шероховатости и улучшению внешнего вида изделий. С помощью таких щелевидных каналов можно существенно, на 5 °С–6 °С, понизить температуру сырых изделий.

Наличие глухих и глубоких щелевидных каналов, выполненных по концентрическим окружностям в нижней части корпуса с его наружной стороны между рядами колодцев с вкладышами, значительно увеличивает поверхность теплоотдачи корпуса матрицы. Это обеспечивает интенсивный отвод теплоты от мест расположения вкладышей в окружающую среду при обдувке сырых изделий, снижает температурные деформации корпуса матрицы и повышает эффективность работы режущего механизма. Как следствие, нижняя поверхность матрицы коробится несущественно, зазор между матрицей и подрезным вращающимся ножом остается постоянным по всей нижней поверхности матрицы, а длина макаронных изделий в этом случае становится одинаковой и не зависит от расположения формирующих отверстий матрицы на ее рабочей поверхности. Благодаря этому повышается качество отрезания сырых макаронных изделий, увеличивается производительность матрицы за счет снижения количества бракованных изделий и, соответственно, снижаются удельные энергозатраты на производство макаронных изделий.

При отсутствии каналов на нижней стороне корпуса интенсивность охлаждения матрицы снижается, наблюдается коробление ее нижней поверхности и неравномерно осуществляется отрезание сырых изделий. Эффективность работы устройства падает.

3.3. Составные матрицы с двумя температурными зазорами

Матрица для производства макаронных изделий представляет собой цилиндрический корпус *1*, выполненный составным из трех частей – центральной *2*, средней *5* и периферийной *3*, при этом средняя часть *5* установлена относительно центральной части *2* с зазором *б*, а относительно периферийной части *3* установлена с зазором *4* (рис. 3.5) [46].

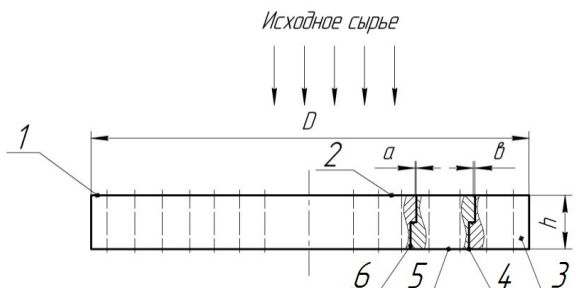


Рис. 3.5. Схема составной матрицы для производства макаронных изделий по патенту РБ № 22246 на изобретение (вид сбоку):
D – диаметр корпуса; *h* – высота корпуса матрицы

Когда корпус матрицы выполнен сплошным, имеет место коробление рабочей поверхности из-за отсутствия компенсации температурных деформаций и, соответственно, снижение качества отформованных полуфабрикатов.

Когда зазоры между частями корпуса сквозные, а не ступенчатые, через них протекает тесто, что тоже недопустимо.

Таким образом, только строгое соблюдение всех отличительных признаков позволяет улучшить качество формования макаронных изделий и уменьшить отходы.

Все части корпуса *1* снабжены формующими отверстиями *7*, расположенными рядами по концентрическим окружностям, а зазоры *4* и *б* проходят между рядами формующих отверстий и делят корпус на три части. В центральной части *2* выполнено отверстие *8* для обеспечения соосности при установке матрицы и рабочего вала шнека. Зазоры *4* и *б* выполнены ступенчатыми и имеют ширину соответственно *a* и *b*, причем $a < b$ (рис. 3.6).

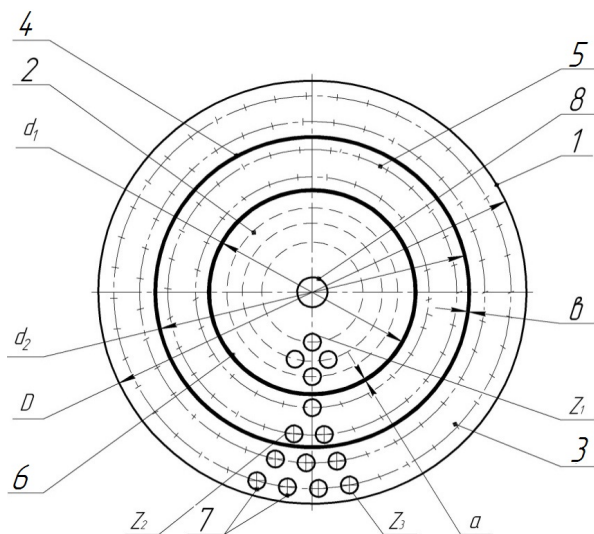


Рис. 3.6. Схема составной матрицы для производства макаронных изделий по патенту РБ № 22246 на изобретение (вид сверху):

D – диаметр корпуса; d_1 – диаметр центральной части; d_2 – диаметр средней части;

Z_1 – количество формирующих отверстий в центральной части;

Z_2 – количество формирующих отверстий в средней части;

Z_3 – количество формирующих отверстий в периферийной части

Количество формирующих отверстий 7 в каждой части корпуса разное. Кроме того, формирующие отверстия 7 в каждой части корпуса имеют разную высоту формирующей щели. Это способствует выравниванию скорости выпрессовывания по всем трем частям корпуса 1 .

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто, преодолевая сопротивление матрицы, с помощью шнека продавливается через формирующие отверстия 7 одновременно по всем трем частям цилиндрического корпуса 1 .

В процессе формования макаронных изделий цилиндрический корпус 1 матрицы интенсивно нагревается, механическая энергия движения теста превращается в теплоту трения, в результате чего согласно теории расширения металлов возникают температурные

деформации и коробление корпуса. Их компенсация осуществляется зазорами 4 и 6. Экспериментально установлено, что благодаря ступенчатым формам зазоров тесто через них не протекает.

В результате взаимного перемещения трех составных частей цилиндрического корпуса 1 рабочая поверхность матрицы будет иметь минимальное коробление, что обеспечивает равномерное отрезание отформованных изделий вращающимся (подрезным) ножом (не показан).

Согласно теории линейного расширения металлов увеличение длины металлического стержня при нагревании зависит от общей длины стержня и температуры нагрева, а также от материала (сталь, латунь, бронза и т. п.).

При непрерывной многочасовой работе поточной линии матрицы могут нагреваться до $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C} - 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наибольшее распространение получили матрицы итальянской фирмы Landucci с наружным диаметром корпуса $D = 520\text{ мм}$ и $D = 600\text{ мм}$. Данное техническое решение наиболее эффективно можно использовать на круглых матрицах большого диаметра, начиная с $D = 300\text{ мм}$.

Так как $D > d_2 > d_1$ (рис. 3.6), ширина (величина) зазора 6 должна быть больше ширины зазора 5, т. е. $b > a$.

Для практических расчетов рекомендуются значения $a = 0,4\text{ мм}$, $b = 0,6\text{ мм}$ при $D = (300 - 600)\text{ мм}$ и $t = 120\text{ }^{\circ}\text{C} - 140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выступы в зазорах 4 и 6 необходимы также для соосной фиксации и закрепления в корпусе 1 средней части 5 относительно центральной части 2 и периферийной части 3.

3.4. Матрицы с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста

Матрица для производства макаронных изделий в соответствии с патентом РБ № 23081 [47] (рис. 3.7) содержит цилиндрический корпус, выполненный составным из двух неравных частей, установленных с зазором между собой (большая часть выполнена в виде кольца, а меньшая – в виде диска), колодцы, расположенные на рабочей поверхности корпуса по концентрическим окружностям (в нижнюю часть каждого колодца запрессован вкладыш с формирующими отверстиями), и вставки, установленные в колодцах перед вкладышами и выполненные в виде трубы Вентури. Диффузной частью труба обращена в сторону вкладыша, а площадь поперечного сечения

горловины трубы равна суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий вкладыша.

Если площадь поперечного сечения горловины больше суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий вкладыша, ухудшается эффект предварительного уплотнения теста, что и обуславливает ухудшение работы устройства в целом.

Если площадь поперечного сечения горловины меньше суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий, возникают дополнительные местные гидравлические сопротивления в трубе Вентури, что отрицательно сказывается на процессе формирования макаронных изделий.

Равенство проходных (живых) сечений горловины и формирующих отверстий обеспечивает минимальное гидравлическое сопротивление процесса формирования макаронных изделий.

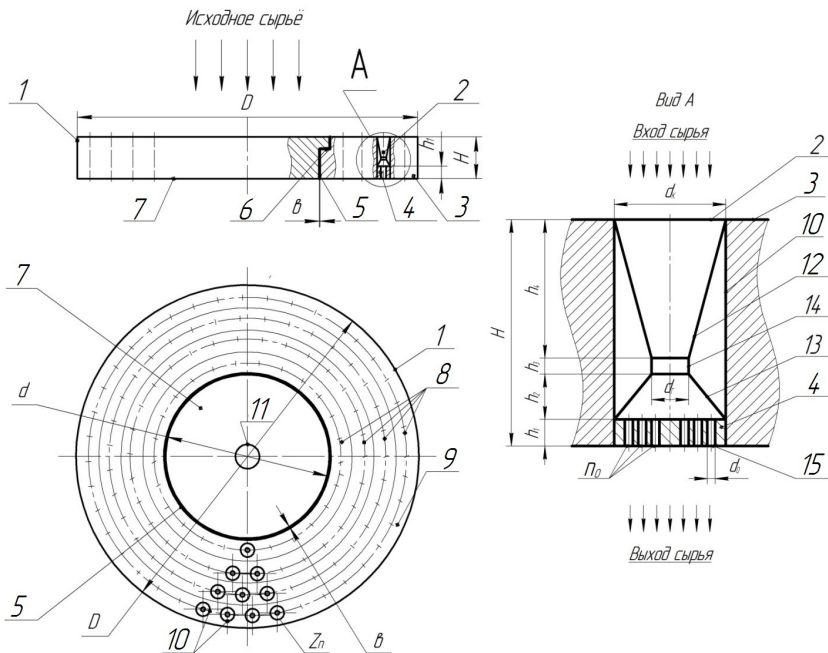


Рис. 3.7. Матрица для производства макаронных изделий

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, разделенный на две неравные части, большую 3

и меньшую 7, установленные с зазором 5 между собой. Большая часть 3 имеет вид кольца, на поверхности которого выполнены сквозные колодцы 10, расположенные на рабочей поверхности корпуса по концентрическим окружностям 8 на условных кольцах 9. Меньшая часть 7 имеет вид диска диаметром d , в центре которого выполнено посадочное центральное отверстие 11. Меньшая часть 7 установлена относительно большей части 3 цилиндрического корпуса 1 со ступенчатым сквозным зазором 5 шириной b и с кольцевым выступом 6. Цилиндрический корпус 1 имеет диаметр D и высоту (толщину) H . Общее количество колодцев – Z_n . На дне колодцев 10 методом запрессовки установлены вкладыши 4 высотой h_1 с формующими отверстиями 15 диаметром d_0 . Внутри колодцев 10 диаметром d_k установлены неподвижно вставки 2, выполненные в виде трубы Вентури, состоящей из диффузора 13, цилиндрической горловины 14 и конфузора 12: d_r – диаметр горловины, h_2 – высота диффузора, h_3 – высота (длина) цилиндрической горловины и h_4 – высота конфузора.

В качестве основного образца формы вставки принята труба Вентури, обеспечивающая минимальные гидравлические потери.

Вставка состоит из двух усеченных конусов различной длины – конфузора 12 и диффузора 13 с небольшой цилиндрической горловиной 14 между ними.

Конфузор 12, обращенный большим основанием в сторону шнека, служит для плавного входа потока теста и постепенного его уплотнения. Предназначение горловины 14 (средней, самой узкой, цилиндрической части вставки) – стабилизировать поток теста и направить его в диффузор.

В диффузоре – конической части вставки, примыкающей расширенной частью к вкладышу 4 с формующими отверстиями, – происходит преобразование части скоростного напора потока теста в статический, используемый для преодоления последующих гидравлических сопротивлений формующих отверстий вкладыша 4.

В диффузоре постепенно снижается скорость теста, и кинетическая энергия тестового потока переходит в энергию давления с минимальными потерями.

В диффузоре происходит выравнивание плотности теста по объему. В конфузоре, горловине и диффузоре вставки имеет место не только постепенное уплотнение тестового потока, но и предварительный его разогрев.

Таким образом, тесто подходит к вкладышу 4 предварительно уплотненным и разогретым и затем плавно входит в формирующие отверстия 15 (без гидравлического удара).

Вставка 2 установлена в колодце 10 на вкладыше 4 плотно (с натягом) без возможности проворачивания. Диаметр диффузора 13 равен диаметру вкладыша 4, что обеспечивает свободный проход теста из диффузора 13 в формирующие отверстия 15.

На рис. 3.7 показан вариант установки вставки 2 внутри колодца 10 на вкладыше 4 (вплотную без зазора). Вставка 2 установлена неподвижно (с натягом) диффузором 13 вниз, конфузором 12 вверх – навстречу движению теста, заподлицо с рабочей поверхностью корпуса матрицы. Формирующие отверстия 15 остаются открытыми для прохода теста.

Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Стрелками указано направление движения исходного сырья. Посадочное центральное отверстие 11 обеспечивает соосность при установке матрицы и рабочего вала шнека (не показан).

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере прессы тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто, преодолевая сопротивление матрицы, с помощью шнека продавливается сквозь колодцы 10 и вкладыши 4, установленные в большей части 3 цилиндрического корпуса 1. Использование в конструкции концентрического расположения колодцев позволяет получить одинаковую пропускную способность матрицы по всей ее рабочей поверхности (по всем условным кольцам 9). Попадая в колодцы 10, тесто предварительно и постепенно уплотняется неподвижными вставками 2.

При наличии неподвижной вставки внутри колодцев тесто попадает в систему Вентури, в которой происходит предварительное и постепенное уплотнение с одновременным подогревом, а окончательное сжатие теста осуществляется в формирующих отверстиях (щелях) вкладышей.

В процессе формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается, в результате чего согласно теории линейного расширения металлов возникают температурные деформации

(максимальные – на осях симметрии цилиндрического корпуса 1). Так как цилиндрический корпус 1 выполнен составным, то при нагреве меньшая его часть 7 будет равномерно расширяться во все стороны благодаря наличию зазора 5.

Одновременно температурным деформациям подвергается и большая часть 3 цилиндрического корпуса 1 – периферийная кольцеобразная рабочая поверхность, которая также имеет возможность линейного расширения благодаря зазору 5.

Разогрев теста осуществляется по всей конструкции матрицы, а не только в зоне установки вкладышей 4. Следовательно, корпус матрицы в случае применения новой конструкции вставки 2 будет более равномерно прогреваться по всей высоте (толщине), что обусловит снижение резких температурных деформаций устройства в целом.

Наибольшее распространение в макаронной промышленности получили матрицы толщиной (высотой) от 60 до 110 и даже 140 мм, при этом толщина (высота) вкладышей с формующими отверстиями составляет всего 10–21 мм. Так, в филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируются автоматические линии по производству коротких макаронных изделий фирмы FAVA S.p.A. (Италия), оснащенные матрицами фирмы Landucci толщиной (высотой) $H = 110$ мм, в колодцах которых установлены вкладыши высотой (толщиной) $h = 21$ мм. На ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируется линия фирмы Buhler AG (Швейцария): матрицы при наружном диаметре $D = 610$ мм имеют толщину $H = 140$ мм при толщине (высоте) вкладышей 21 мм. Поперечное сечение колодцев значительно больше суммарной площади формующих отверстий вкладышей, что обуславливает гидравлический удар при движении теста из колодцев в формующие отверстия, при этом в «пустотелых» колодцах практически не происходит предварительного уплотнения теста по высоте. Чем глубже колодец, тем эффективнее работает вставка – труба Вентури.

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и сама матрица, иначе при контакте с тестом может возникнуть гальваническая пара и возникающие в ее системе слабые токи приведут к коррозии металла. Матрицы изготавливают из антикоррозийных и прочных материалов, таких как бронза БрАЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Внутренние поверхности вставки (конфузор, горловина и диффузор) желательно полировать

или хромировать, но лучшим покрытием является тефлон (фторопласт). Толщина стенки вставки (трубы Вентури) должна быть минимальной, но обеспечивающей жесткость и прочность конструкции ($\approx 1,0-1,5$ мм). Приведем пример расчета геометрических параметров вставки.

Пример. Стандартная матрица для производства вермишели обыкновенной изготовлена из латуни ЛС59-1, имеет диаметр $D_m = 298$ мм и толщину $H = 60$ мм. В матрице высверлены 102 колодца диаметром $d_k = 20$ мм, внутри которых установлены вкладыши с формирующими отверстиями. Толщина вкладыша $h_1 = 9$ мм. В каждом вкладыше просверлены 19 отверстий ($n_o = 19$) диаметром $d_o = 2,3$ мм. В каждом колодце плотно и неподвижно установлены тонкостенные латунные вставки в виде трубы Вентури, диффузором опирающиеся на вкладыши. Площадь круга S определяем по формуле

$$S = \frac{d^2}{\sqrt{\Phi}}, \quad (3.2)$$

где d – диаметр круга, м.

Определить диаметр цилиндрической горловины вставки d_r .

Решение

1. Определяем площадь поперечного сечения одного отверстия вкладыша:

$$f_o = \frac{2,3^2}{1,272} = 4,16 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем суммарную площадь поперечного сечения всех отверстий вкладыша:

$$F_o = f_o n_o = 4,16 \cdot 19 = 79,02 \text{ мм}^2.$$

3. Определяем диаметр цилиндрической горловины d_r вставки из условия

$$S_r = F_o = 79,02 \text{ мм}^2,$$

где S_r – площадь поперечного сечения цилиндрической горловины вставки:

$$S_r = \frac{d_r^2}{\sqrt{\Phi}} = 79,02 \text{ мм}^2.$$

Отсюда

$$d_r^2 = 79,02\sqrt{\Phi} = 79,02 \cdot 1,272 = 100,5 \text{ мм}^2.$$

Тогда $d_r = 10,02$ мм. Принимаем, что $d_r = 10$ мм.

Исходя из общей толщины матрицы $H = 60$ мм и толщины вкладыша $h_1 = 9$ мм можно принять: $h_2 = 13$ мм, $h_3 = 8$ мм, $h_4 = 30$ мм, а диаметр диффузора равен диаметру конфузора. Размеры вставок Вентури будут определяться видом макаронных изделий (вкладышей): ракушки, лапша узкая, рожки рифленые, спираль, лапша широкая, рожки витые, рожки гладкие, рожки рифленые, перья и т. п.

Выполнение вставок 2, установленных в колодцах 10, в виде системы Вентури обуславливает следующий положительный результат:

- движение теста проходит при минимальных гидравлических потерях в сравнении с винтообразной вставкой (прототип);
- осуществляется предварительное постепенное уплотнение теста;
- имеет место предварительный разогрев теста, вязкость его уменьшается, что обеспечивает более плавный проход через формующие отверстия вкладышей;
- за счет предварительного уплотнения, подогрева теста и снижения гидравлических потерь скорость выпрессовывания увеличивается, а следовательно, повышается производительность устройства;
- при наличии вставок в колодцах корпус матрицы равномерно прогревается по всей его толщине (высоте), а не только в зоне установки вкладышей, что снижает температурные деформации, уменьшает коробление (выпучивание) рабочей поверхности со стороны вращающегося ножа и, как следствие, уменьшает отходы при отрезании полуфабриката.

Матрица для производства макаронных изделий в соответствии с патентом РБ № 21610 [45] (рис. 3.8) содержит цилиндрический корпус, разделенный на две неравные части, установленные с зазором между собой (большая часть выполнена в виде кольца, а меньшая – в виде центрального основания), и колодцы, расположенные на большей части корпуса по концентрическим окружностям, в нижней части которых запрессованы вкладыши с формующими

отверстиями. Дополнительно снабжена спиралеобразными вставками, установленными внутри колодцев перед вкладышами и выполненными в виде шнека нагнетающего типа (ширина винтовых канавок вставки уменьшается по ходу движения сырья).

Установка спиралеобразных вставок нагнетающего типа в колодцах перед вкладышами позволяет предварительно и постепенно уплотнить тесто, что существенно уменьшает гидравлическое сопротивление вкладышей, устраняет гидравлический удар при входе теста из колодца в отверстия вкладыша и тем самым повышает качество отформованных полуфабрикатов при снижении удельных энергозатрат.

Если вставка будет выполнена с равномерным шагом винтовых канавок, то не произойдет уплотнения теста, что отрицательно скажется на работе устройства.

Таким образом, только строгое соблюдение всех отличительных признаков позволит получить предварительное и постепенное уплотнение теста и тем самым повысит качество отформованного полуфабриката.

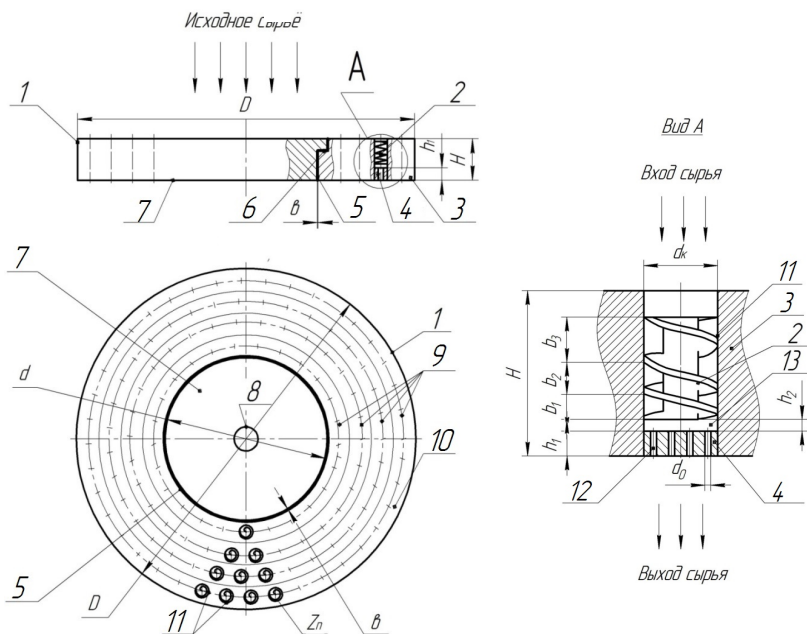


Рис. 3.8. Схема матрицы для производства макаронных изделий

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, разделенный на две неравные части, большую 3 и меньшую 7, установленные с зазором 5 между собой. Большая часть 3 имеет вид кольца, в котором выполнены сквозные колодцы 11 по концентрическим окружностям 9 на условных кольцах 10. Меньшая часть 7 имеет вид диска диаметром d , в центре которого выполнено посадочное центральное отверстие 8. Меньшая часть 7 установлена относительно большей части 3 корпуса 1 со ступенчатым сквозным зазором 5 шириной b и с кольцевым выступом 6. Цилиндрический корпус 1 имеет диаметр D и высоту (толщину) H . Общее количество колодцев – Z_n . На дне колодцев 11 методом запрессовки установлены вкладыши 4 с формующими отверстиями 12 высотой h_1 и диаметром d_0 . Внутри колодцев 11 диаметром d_k неподвижно установлены спиралеобразные вставки 2, выполненные в виде шнека нагнетающего типа.

Вставки 2 устанавливаются перед вкладышами 4 высотой h_2 с зазором 13. Спиралеобразные вставки 2 имеют ширину винтовых канавок b_1, b_2, b_3 , которые уменьшаются по ходу движения сырья, т. е. $b_1 < b_2 < b_3$.

Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Стрелками указано направление движения исходного сырья. Центральное отверстие 8 обеспечивает соосность при установке матрицы и рабочего вала шнека (не показан).

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, постепенно освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто, преодолевая сопротивление матрицы, с помощью шнека продавливается сквозь колодцы 11 и вкладыши 4, установленные в большей части 3 корпуса 1. Использование в конструкции концентрического расположения колодцев позволяет получить одинаковую пропускную способность матрицы по всей ее рабочей поверхности (по всем условным кольцам 10). Попадая в колодцы 11, тесто предварительно и постепенно уплотняется неподвижными спиралеобразными вставками нагнетающего типа 2 и подходит через зазор 13 к отверстиям 12 вкладыша 4 уже спрессованным, что позволяет предотвратить гидрав-

лический удар и тем самым снизить гидравлическое сопротивление вкладышей.

В процессе формования макаронных изделий корпус матрицы интенсивно нагревается, в результате чего согласно теории линейного расширения металлов возникают температурные деформации (максимальные – на осях симметрии корпуса 1). Так как корпус 1 выполнен составным, при нагреве его меньшая часть 7 будет равномерно расширяться во все стороны благодаря наличию зазора 5 .

Температурным деформациям одновременно подвергается и большая часть 3 корпуса 1 – периферийная кольцеобразная рабочая поверхность, которая также имеет возможность линейного расширения благодаря зазору 5 .

Важное значение для эффективной работы матрицы имеет наличие неподвижных спиралеобразных вставок, выполненных в виде шнека нагнетающего типа так, что ширина винтовых канавок уменьшается по ходу движения сырья: $b_1 < b_2 < b_3$. Если ширина винтовых канавок спиралеобразной вставки будет одинаковой ($b_1 = b_2 = b_3$) или значения будут увеличиваться ($b_1 > b_2 > b_3$), то не будет происходить предварительного и постепенного уплотнения теста внутри колодцев, что приведет к снижению качества полуфабриката при увеличении удельных энергозатрат.

Высота колодцев в матрицах значительно превышает толщину (высоту) вкладышей ($H > h$), а сами колодцы глубокие. Их поперечное сечение значительно больше суммарной площади формирующих отверстий вкладышей, что и обуславливает гидравлический удар при движении теста из колодцев в формирующие отверстия, при этом в «пустотелых» колодцах практически не происходит предварительного уплотнения теста по высоте.

При наличии неподвижной вставки внутри колодцев тесто падает в спиралеобразный винтовой канал, в котором происходит предварительное и постепенное уплотнение, а окончательное сжатие теста осуществляется в формирующих отверстиях (щелях) вкладышей. Количество винтовых канавок в спиралеобразной вставке в зависимости от глубины колодца – от 3 до 5 шт.

На рис. 3.8 показан вариант установки вставки 2 внутри колодца 11 перед вкладышем 4 при сохранении зазора 13 высотой h_2 .

Если вставку 2 установить вплотную перед вкладышем 4 , то будет перекрываться часть формирующих отверстий 12 вкладыша 4 , что отрицательно скажется на работе устройства.

Можно принять высоту зазора 13 $h_2 = \frac{h_1}{2}$, при этом вставки 2 неподвижно устанавливаются внутри колодцев 11 методом, например, запрессовки, а вход теста в колодец 11 остается свободным.

3.5. Узлы прессования с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста в предматричном объеме

Узел прессования макаронного пресса в соответствии с патентом РБ № 23082 [90] (рис. 3.9) содержит шнековую камеру, внутри которой установлены шнек нагнетающего типа и перфорированная направляющая решетка для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста, расположенная перпендикулярно оси шнека за его последним витком, прессовую головку, состоящую из цилиндрического патрубка, в нижней части которой размещена перфорированная матрица с формующими отверстиями, дополнительно снабжен вставкой, выполненной в виде трубы Вентури и установленной в цилиндрическом патрубке конфузором в сторону шнека, а диффузором опирающаяся на матрицу (диаметр диффузора равен диаметру матрицы, а площадь поперечного сечения горловины равна суммарной площади поперечного сечения формующих отверстий).

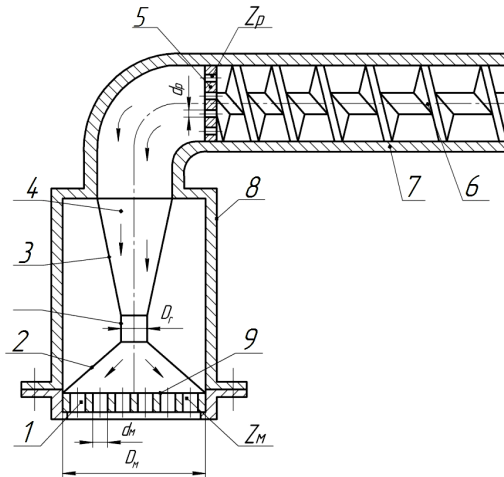


Рис. 3.9. Принципиально-конструктивная схема узла прессования макаронного пресса

Данная вставка обеспечивает равномерную подачу теста в формирующие отверстия матрицы при его одновременном предварительном уплотнении в конфузоре и пластификации теста в горловине трубы Вентури. Труба Вентури обеспечивает минимальное возможное гидравлическое сопротивление, снижая тем самым энергоёмкость процесса прессования и улучшая качество получаемой продукции. Если диаметр диффузора меньше диаметра матрицы, то часть ее периферийных формирующих отверстий будет выведена из процесса формования, что отрицательно скажется на производительности узла прессования.

Если площадь поперечного сечения горловины меньше суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий, то появляется дополнительное гидравлическое сопротивление, что нежелательно.

Если площадь поперечного сечения горловины больше суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий, то ухудшится положительный эффект от предварительного уплотнения теста и его пластификации.

Только равенство диаметров конфузора и матрицы обеспечивает 100%-е использование формирующих отверстий, а равенство проходных (живых) сечений горловины и формирующих отверстий обеспечивает оптимальные условия для процесса формования макаронных изделий.

Узел прессования макаронного пресса содержит шнековую камеру 8, шнек 7 нагнетающего типа, перфорированную решетку 6 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста с диаметром отверстий d_p и количеством отверстий Z_p , прессовую головку 4, выполненную с внутренней камерой в виде цилиндрического патрубка, в нижней части которого расположена матрица 10 с формирующими отверстиями 1 диаметром d_m в количестве Z_m .

Внутри прессовой головки 9 на матрице 10 установлена вставка 5, состоящая из конфузора 4, горловины 3 и диффузора 2, при этом диаметр диффузора равен диаметру матрицы D_m . Конфузором вставка направлена в сторону шнека, а диффузором опирается на матрицу 10, т. е. вставка 5 выполнена в виде трубы Вентури. Горловина 3 имеет диаметр D_r . Поперечное сечение горловины 3 равно суммарной площади поперечных сечений формирующих отверстий 1 – формирующих механизмов. Стрелками показано направление движения теста.

Устройство работает следующим образом. Макароны тесто с помощью шнека 7, расположенного в шнековой камере 8, предо-

левая сопротивление решетки 6 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста, поступает в прессовую головку 9, где попадает в конфузур 4. В конфузуре 4 тесто постепенно и равномерно уплотняется и входит в горловину 3, в которой происходит стабилизация потока теста и его пластификация. Из горловины 3 тесто направляется в диффузор 2, в котором имеет место расширение потока, снижение скорости движения теста. Часть кинетической энергии потока переходит в потенциальную, необходимую для преодоления гидравлического сопротивления последующих отверстий 1, а теплота трения из механической энергии движения повышает температуру теста и уменьшает его динамическую вязкость.

Так как тесто предварительно уплотнено, дополнительно пластифицировано и частично подогрето, оно плавно проходит через формирующие отверстия 1 при минимальном возможном гидравлическом сопротивлении (без гидравлического удара).

Вставка, выполненная в виде трубы Вентури, играет основную роль в подготовке тестовой массы. Благодаря ей обеспечивается полнота процесса формования макаронных изделий в формирующих механизмах:

- осуществляется предварительное и равномерное уплотнение теста в конфузуре и горловине вставки при одновременной его пластификации;

- имеет место предварительный подогрев (разогрев) теста за счет теплоты трения при его движении через конфузур и горловину вставки, вязкость его уменьшается, что обеспечивает более плавный проход теста через формирующие отверстия;

- форма вставки (труба Вентури) имеет минимальное гидравлическое сопротивление, что позволяет не только поддерживать необходимую величину давления, но и не снижать его уровень;

- за счет предварительного уплотнения, дополнительной пластификации и стабилизации потока теста, предварительного подогрева тестовой массы и снижения гидравлических потерь в формирующих механизмах скорость выпрессовывания увеличивается, а следовательно, повышается производительность устройства при явном улучшении качества полуфабрикатов.

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и матрицу – бронза БрАЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь ТХ18Н9Т и др. Лучшим покрытием для внутренних поверхностей вставки является тефлон. Конструкция вставки должна быть прочной

и жесткой, т. к. работает под высоким избыточным давлением. Главный геометрический параметр вставки – диаметр цилиндрической горловины D_r . Приведем пример определения этого параметра.

Пример. В нижней части цилиндрического патрубка установлена стандартная матрица для производства вермишели обыкновенной. Матрица изготовлена из латуни ЛС59-1, имеет наружный диаметр $D_m = 298$ мм. В корпусе матрицы высверлены 102 колодца, внутри которых установлены вкладыши с формующими отверстиями. В каждом вкладыше просверлены 19 отверстий ($n_o = 19$) диаметром $d_m = 2,3$ мм. Перед матрицей плотно и неподвижно установлена вставка в виде трубы Вентури, диффузором опирающаяся на матрицу, при этом диаметр диффузора равен диаметру корпуса матрицы D_m .

Определить диаметр цилиндрической горловины вставки D_r .

Решение

1. Определяем площадь поперечного сечения одного формующего отверстия:

$$f_o = \frac{d_m^2}{\sqrt{\Phi}} = \frac{2,3^2}{1,272} = 4,16 \text{ мм}^2.$$

2. Определяем суммарную площадь поперечного сечения формующих отверстий одного вкладыша:

$$F_o = f_o n_o = 4,16 \cdot 19 = 79,02 \text{ мм}^2.$$

3. Определяем суммарную площадь поперечного сечения формующих отверстий всех вкладышей:

$$F_B = F_o = 79,02 \cdot 102 = 8060,04 \text{ мм}^2.$$

4. Определяем диаметр цилиндрической горловины вставки D_r . По условию площадь поперечного сечения горловины S_r равна суммарной площади поперечного сечения формующих отверстий всех вкладышей F_B :

$$S_r = F_B \cdot 102 = 8060,04 \text{ мм}^2$$

или

$$S_r = \frac{D_r^2}{\sqrt{\Phi}} = \frac{D_r^2}{1,272}.$$

Тогда

$$D_r^2 = 1,272S_r = 1,272 \cdot 8060,04 = 10\,252,37 \text{ мм}^2;$$

$$D_r = \sqrt{10\,252,37} = 101,25 \text{ мм.}$$

Принимаем $D_r = 101$ мм, а диаметр диффузора равен 298 мм.

Таким образом, при $D_r = 101$ мм обеспечивается равенство основных проходных поперечных сечений в процессе движения тестовой массы – горловины и формирующих отверстий, – что обеспечивает более качественное формование сырья, увеличивает производительность узла прессования и, следовательно, повышает эффективность работы устройства.

Узел прессования макаронного пресса в соответствии с патентом РБ № 23162 [91] (рис. 3.10) содержит прессовую головку, состоящую из конусного патрубков, в нижней части которого размещена круглая матрица с формирующими отверстиями, а в предматричной камере расположено соосно с матрицей конусно-цилиндрическое устройство. Прессовая головка в верхней части соединена с трубопроводом для подачи теста, конусно-цилиндрическое устройство установлено непосредственно на матрице, а формирующие отверстия выполнены рядами по концентрическим окружностям соосно с основанием конусно-цилиндрического устройства.

Установка конусно-цилиндрического устройства непосредственно на матрице при расположении формирующих отверстий рядами по концентрическим окружностям соосно с основанием конусно-цилиндрического устройства позволяет стабилизировать поток теста и равномерно подводить его к рядам формирующих отверстий, что и делает скорость выпрессовывания более равномерной в поперечном сечении матрицы. В данном случае конусно-цилиндрическое устройство выполняет роль выравнивателя скоростей прессования макаронных изделий через отверстия круглых матриц, но по сравнению с прототипом работает более эффективно, т. к. расположение выравнивателя над матрицей (прототип) с зазором дестабилизирует поток теста, создавая ненужную его турбулентность.

Если формирующие отверстия расположены не по концентрическим окружностям, а, например, по шестигранникам, то имеет место дополнительная дестабилизация тестового потока и возрастание гидравлического сопротивления. Конусная поверхность выравнивателя формирует кольцевой тестовый поток, значит и отверстия

надо располагать рядами по кольцам соосно с основанием цилиндрической части конусно-цилиндрического устройства.

Только установка конусно-цилиндрического устройства непосредственно на саму матрицу (без зазора) при расположении формирующих отверстий рядами по концентрическим окружностям соосно основанию конуса обеспечивает оптимальные условия для выравнивания скоростей выпрессовывания макаронных изделий через отверстия круглых матриц, что приводит к увеличению производительности прессы и снижению количества отходов в виде концов.

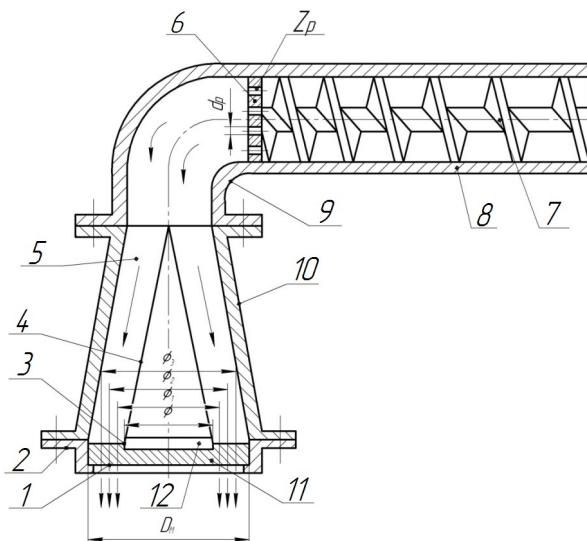


Рис. 3.10. Принципиально-конструктивная схема узла прессования макаронного прессы

Узел прессования макаронного прессы содержит шнековую камеру 8, шнек 7 нагнетающего типа, перфорированную решетку 6 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста с диаметром отверстий d_p в количестве Z_p , прессовую головку 10, выполненную с внутренней камерой в виде конического патрубка, в нижней части которого расположена матрица 11 с формирующими отверстиями 1 (колонцы).

Прессовая головка 10 трубопроводом 9 подсоединена через решетку 6 к шнековой камере 8.

Внутри прессовой головки 10 расположено конусно-цилиндрическое устройство 4, установленное непосредственно на матрице 11.

Устройство 4 цилиндрическим основанием 3 с диаметром \varnothing закреплено неподвижно (жестко) в специальном гнезде 12 конусом навстречу тестовому потоку.

Формующие отверстия 1 (колодцы) расположены в матрице 11 рядами по концентрическим окружностям соосно цилиндрическому основанию 3: \varnothing_1 , \varnothing_2 , \varnothing_3 – диаметры расположения первого, второго, третьего рядов формующих отверстий.

В данном случае на фигуре показаны три ряда формующих отверстий, но их может быть больше в зависимости от наружного диаметра матрицы D_m и диаметра основания \varnothing .

Матрица 11 неподвижно установлена в матрицедержателе 2, который с помощью болтового соединения прикреплен к прессовой головке 10.

Конусно-цилиндрическое устройство 4 в сочетании с коническим патрубком образует кольцевой канал 5, по которому тестовый поток направляется к формующим отверстиям 1 (колодцам).

По ходу движения теста поперечное сечение кольцевого канала 5 увеличивается, скорость потока теста уменьшается. В конце канала (перед колодцами) тесто плавно, без гидравлического удара входит в формующие отверстия 1.

Устройство работает следующим образом. Макаронное тесто с помощью шнека 7, расположенного в шнековой камере 8, преодолевая сопротивление решетки 6 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста, поступает в прессовую головку 10 по трубопроводу 9.

В прессовой головке 10 с помощью конусно-цилиндрического устройства 4 тесто направляется в формующие отверстия 1. Так как они расположены рядами по концентрическим окружностям соосно с цилиндрическим основанием 3, кольцевой поток теста плавно входит в формующие отверстия 1 при минимальном возможном гидравлическом сопротивлении (без гидравлического удара). Таким образом, конусно-цилиндрическое устройство стабилизирует поток и выравнивает скорости выпрессовывания теста.

Устройство 4 целесообразно изготавливать из того же материала, что и матрицу, – из бронзы БрАЖ9-4, латуни ЛС59-1, нержавеющей стали ТХ18Н9Т и др. В качестве покрытия наружных поверхностей

конуса предпочтительно использовать тефлон. Конструкция устройства должна быть прочной и жесткой, т. к. оно работает под высоким избыточным давлением.

С помощью основания 3 устройство 4 неподвижно установлено в гнезде 12 (плотно, с натягом).

Только строгое соблюдение всех отличительных признаков позволяет получить равномерную скорость выпрессовывания теста, тем самым уменьшив процент отходов в виде концов и увеличив производительность узла прессования.

3.6. Расчетное обоснование геометрических, тепловых и прочностных параметров составных матриц

3.6.1. Гидравлические параметры

Существенным недостатком прессования на шнековых макаронных прессах является то, что рабочая (перфорированная) поверхность матрицы не обеспечивает одинаковую пропускную способность тестовой массы. В результате скорость выпрессовывания макаронных изделий по плоскости матрицы получается разной и, как следствие, ухудшается качество готовой продукции за счет неравномерного отрезания полуфабрикатов. Неравномерная скорость прессования приводит к увеличению количества отходов в виде обрезков и, в конечном счете, к снижению производительности прессы. Так, количество отходов по указанной причине на макаронных прессах ЛПЛ-2М достигает 20 %. Этот процент может быть увеличен за счет изгиба центра матрицы из-за высокого внутреннего давления теста и температурных деформаций.

В настоящее время неравномерность скоростей формования макаронных изделий по сечению матрицы является нерешенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике. Известно несколько способов частичного устранения неравномерности формования по зонам матрицы: применение специальных устройств конусно-цилиндрической формы, колосников, тормозящих решеток, устанавливаемых на дне матрицы, и др.

Для достижения одинаковой пропускной способности геометрические параметры перфорации, количество колодцев и размеры корпуса матрицы должны быть взаимосвязаны между собой.

Наибольший положительный эффект дает расположение формирующих отверстий по концентрическим окружностям с использованием закономерностей «золотого сечения» – принципа «золотой» перфорированной перегородки.

Пример 1. Диаметр корпуса матрицы $D_k = 350$ мм ($R_k = 175$ мм), диаметр колодцев $d_0 = 18$ мм, количество колодцев на первом от оси корпуса матрицы условном кольце $Z_1 = 34$.

Решение. Рабочую поверхность матрицы условно делим на четыре кольца, т. е. $n = 4$. Определяем наружные радиусы условных колец:

$$R_1 = 0,786R_k = 0,786 \cdot 175 = 137,55 \text{ мм};$$

$$R_2 = 0,786^2 R_k = 108,114 \text{ мм};$$

$$R_3 = 0,786^3 R_k = 84,978 \text{ мм};$$

$$R_4 = 0,786^4 R_k = 66,793 \text{ мм}.$$

Определяем количество колодцев на каждой концентрической окружности каждого условного кольца:

$$Z_1 = 34; \quad Z_2 = \left[\frac{Z_1}{1,618} \right] = 21; \quad Z_3 = \left[\frac{Z_2}{1,618} \right] = 13; \quad Z_4 = \left[\frac{Z_3}{1,618} \right] = 8.$$

Определяем пропускную способность каждого условного кольца:

$$K_n = \frac{f_0 Z_n}{\pi(R_k^2 - R_n^2)} = \frac{\pi r_0^2 Z_n}{\pi(R_k^2 - R_n^2)},$$

где f_0 – площадь колодца матрицы, мм²;

r_0 – радиус колодца, мм;

$$K_1 = \frac{3,14 \cdot 81 \cdot 34}{175^2 - 137,55^2} = 0,7387; \quad K_2 = \frac{3,14 \cdot 81 \cdot 21}{137,55^2 - 108,12^2} = 0,7386;$$

$$K_3 = \frac{3,14 \cdot 81 \cdot 13}{108,12^2 - 84,97^2} = 0,7397; \quad K_4 = \frac{3,14 \cdot 81 \cdot 8}{84,97^2 - 66,79^2} = 0,7375.$$

Из расчетов следует, что $K_1 = K_2 = K_3 = K_4$. Пропускная способность всех условных колец одинакова, т. е. происходит увеличение площади живого сечения условных колец пропорционально увеличению общей площади рабочей поверхности матрицы. Значит, и скорости движения отдельных слоев теста через матрицу одинаковые. Движение потока теста стабилизируется по всей площади матрицы, и, как следствие, имеет место увеличение производительности матрицы и улучшение качества формования. Таким образом, эффективность работы такого устройства в целом повышается.

Пример 2. Принимаем $Z_1 = 55$ при неизменных остальных исходных данных. Тогда

$$\begin{array}{ll} Z_1 = 55; & K_1 = 1,1951; \\ Z_2 = \left[\frac{Z_1}{1,618} \right] = 34; & K_2 = 1,1961; \\ Z_3 = \left[\frac{Z_2}{1,618} \right] = 21; & K_3 = 1,1949; \\ Z_4 = \left[\frac{Z_3}{1,618} \right] = 13; & K_4 = 1,1984, \end{array}$$

т. е. $K_1 \approx K_2 \approx K_3 \approx K_4$, что и требовалось доказать.

Если будет нарушено хотя бы одно из принятых условий, пропускная способность условных колец будет разной и эффективность работы матрицы резко ухудшится. Покажем это на примере.

Пример 3. Принимаем, что $Z_1 = 34$, но $Z_{n+1} \neq \left[\frac{Z_n}{1,618} \right]$ при соблюдении остальных условий. Принимаем $Z_{n+1} = \left[\frac{Z_n}{1,5} \right]$. Тогда

$$\begin{array}{ll} Z_1 = 34; & K_1 = 0,7387; \\ Z_2 = 22; & K_2 = 0,774; \\ Z_3 = 15; & K_3 = 0,8535; \\ Z_4 = 10; & K_4 = 0,9218. \end{array}$$

Из расчетов следует, что $K_1 \neq K_2 \neq K_3 \neq K_4$, т. е. пропускная способность условных колец неодинакова по мере увеличения радиуса расположения колодцев. Это дестабилизирует движение потока теста и тем самым снижает эффективность работы устройства. Аналогичная картина наблюдается при $R_n \neq 0,786^n R_k$.

Пример 4. Принимаем, что $R_n \neq 0,786^n R_k$ при соблюдении остальных условий. Принимаем $R_n = 0,9^n R_k$. Тогда

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,9 R_k = 0,9 \cdot 175 = 157,5 \text{ мм}; & K_1 &= 1,4861; \\ R_2 &= 0,9^2 R_k = 141,75 \text{ мм}; & K_2 &= 1,1332; \\ R_3 &= 0,9^3 R_k = 127,575 \text{ мм}; & K_3 &= 0,8661; \\ R_4 &= 0,9^4 R_k = 114,82 \text{ мм}; & K_4 &= 0,6581, \end{aligned}$$

т. е. $K_1 \neq K_2 \neq K_3 \neq K_4$, что и требовалось доказать.

3.6.2. Тепловые параметры

Наибольшее распространение в промышленности получили матрицы для формования макарон и вермишели, выполненные в виде диска диаметром от 298 до 600 мм, толщиной (высотой) $h = 50\text{--}140$ мм, изготовленные из нержавеющей стали 1Х18Н9Т, латуни ЛС59-1 или бронзы БрАЖ9-4 и установленные в поточных линиях (в прессах). В процессе работы поточной линии матрицы создают значительное гидравлическое сопротивление, на преодоление которого затрачивается огромная механическая энергия, переходящая в теплоту трения и обуславливающая значительный нагрев конструкции (до 120°C).

Согласно теории линейного расширения металлов увеличение длины металлического стержня при нагревании Δl , м, определяется по формуле [32]

$$\Delta l = \alpha' l (t_1 - t_0), \quad (3.3)$$

где α' – относительное удлинение (коэффициент линейного теплового расширения) стального стержня (прутка) длиной 1 м (для стали $\alpha' = 1,2 \cdot 10^{-5}$), м/(м·°C);

l – исходная длина стержня, м;

t_1 – температура нагрева металлического стержня, °С;
 t_0 – начальная температура металлического стержня, при нормальных условиях $t_0 = 20$ °С.

В процессе работы корпус матрицы может нагреваться до температуры 80 °С–120 °С. С другой стороны, Δl – это ширина зазора b . Для определения оптимальной величины (ширины) зазора приведем пример 1.

Пример 1. Диаметр матрицы $l = 500$ мм, температура нагрева корпуса $t = 105$ °С, для стали $\alpha' = 1,2 \cdot 10^{-5}$ (среднее значение). Тогда ширина зазора

$$b = \Delta l = \alpha' l (t_1 - t_0) = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5 (105 - 20) = 0,51 \text{ мм.}$$

Величина коробления рабочей поверхности матрицы (зона расположения колодцев) обусловлена, прежде всего, материалом корпуса в зависимости от коэффициентов линейного теплового расширения и теплопроводности:

- для нержавеющей стали $\lambda = 46$ Вт/(мК); $\alpha' = (1,4-1,7) \cdot 10^{-5}$ м/(м·°С);
- для бронзы $\lambda = 83$ Вт/(мК); $\alpha' = 1,8 \cdot 10^{-5}$ м/(м·°С);
- для латуни $\lambda = 110,7$ Вт/(мК); $\alpha' = 1,9 \cdot 10^{-5}$ м/(м·°С).

Следовательно, меньшее значение коэффициента теплопроводности приводит к максимальному короблению, а большее – к минимальному. Это означает, что для стальных матриц зазор b должен быть больше, чем для бронзовых и латунных.

При минимальном короблении рабочей поверхности матрицы нож скользит равномерно по всей плоскости корпуса. Это возможно благодаря тому, что меньшая часть корпуса выполнена в виде диска диаметром d , размер которого определяется из выражения [43]

$$d = \frac{D}{2}, \quad (3.4)$$

где D – диаметр корпуса, м.

Использование выражения позволяет получить одинаковое относительное изменение длины ΔL в направлении диаметра как большей части корпуса, так и меньшей при их нагревании на температуру ΔT в соответствии с основным законом теплового расширения тел по формуле

$$\Delta L = \alpha L \Delta t, \quad (3.5)$$

где ΔL – относительное изменение длины, м;

α – коэффициент линейного теплового расширения, м/(м·°С);

L – первоначальная длина тела, м;

ΔT – изменение температуры при нагревании, °С.

Обозначим:

$\Delta L_{\text{б}}$ – относительное изменение длины большей части корпуса (в направлении диаметра матрицы), м;

$\Delta L_{\text{м}}$ – относительное изменение длины меньшей части корпуса (в направлении диаметра диска), м.

Примем: для обеих частей корпуса $\Delta L = \text{const}$, т. е. $\Delta L_{\text{б}} = \Delta L_{\text{м}}$; $\alpha = \text{const}$ (материал составных частей корпуса одинаковый); $L_{\text{б}}$ и $L_{\text{м}}$ – длина большей и меньшей частей корпуса в направлении диаметра, м.

Тогда

$$\Delta L_{\text{б}} = \alpha L_{\text{б}} \Delta T_{\text{б}};$$

$$\Delta L_{\text{м}} = \alpha L_{\text{м}} \Delta T_{\text{м}}.$$

Так как $d = \frac{D}{2}$, то $L_{\text{б}} = L_{\text{м}}$ при $\Delta L_{\text{б}} = \Delta L_{\text{м}}$, что означает в реальных условиях одинаковое и минимальное возможное коробление обеих частей корпуса и, как результат, качественную работу вращающегося ножа и равномерное отрезание отформованных макаронных изделий – длина полуфабрикатов одинакова, что и соответствует требованиям стандарта. Покажем это на примере.

Пример 2. Диаметр матрицы $D = 500$ мм (длина стержня); температура нагрева корпуса $\Delta T = 100$ °С, для стали $\alpha' = 1,2 \cdot 10^{-5}$ (среднее значение).

Для меньшей части согласно уравнению (3.4)

$$d = \frac{D}{2} = L_{\text{м}} = \frac{500}{2} = 250 \text{ мм};$$

$$\Delta L_{\text{м}} = \alpha L_{\text{м}} \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 100 = 0,3 \text{ мм}.$$

Для большей части

$$L_{\text{б}} = 500 - 250 = 250 \text{ мм};$$

$$\Delta L_{\text{б}} = \alpha L_{\text{б}} \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 250 \cdot 100 = 0,3 \text{ мм}.$$

Из расчетов следует, что $\Delta L_6 = \Delta L_m$, а общая величина зазора $b = 0,6$ мм. Обе части корпуса расширяются на одну и ту же величину – 0,3 мм, что и необходимо для качественной работы вращающегося ножа.

На основании расчетных и справочных данных можно принять, что ширина зазора b может приниматься в диапазоне 0,3–0,6 мм.

Данное техническое решение может иметь конкретное практическое применение. Так, в настоящее время в филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт» эксплуатируются две поточные линии для производства короткорезанных макаронных изделий с использованием 25 матриц итальянской фирмы Landucci диаметром 520 мм (рис. 3.11). Основным недостатком данных матриц – коробление рабочей поверхности с ее прогибом до 5 мм, что приводит к некачественной отрезке полуфабрикатов режущим механизмом, особенно в зоне расположения периферийных формирующих отверстий. Предлагаемое техническое решение в полной мере применимо к матрицам итальянской фирмы, которые в процессе работы коробятся.



Рис. 3.11. Общий вид матриц итальянского производства

Еще больший эффект применения составных матриц наблюдается при использовании их на ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов», где на поточной линии для производства короткорезанных макаронных изделий используются 15 матриц итальянской фирмы Niccolai диаметром 600 мм.

3.6.3. Прочностные параметры

В технологическом оборудовании пищевых производств широко применяются перфорированные рабочие органы, в частности матрицы макаронных прессов, представляющие собой перфорированные

пластины, нагруженные силами, действующими перпендикулярно их плоскости. Наличие у перфорированных пластин (матриц) большого числа отверстий, которые могут иметь различное расположение и форму, делает затруднительным получение точных решений, так называемых периодических задач теории упругости, хотя исследовательские работы в этом направлении ведутся.

Одним из возможных приемов расчета перфорированных пластин является способ приведения, заключающийся в замене расчета перфорированной пластины расчетом некоторой эквивалентной ей по жесткости сплошной пластины.

При использовании способа приведения расчет деформаций перфорированной пластины ведется по формулам, полученным для неперфорированных пластин, однако при этом в расчет вводятся приведенные значения модуля упругости и коэффициента Пуассона. В литературе приводятся многочисленные расчеты на прочность круглых пластин, у которых отверстия расположены по вершинам равносторонних треугольников со стороной S как по вершинам квадратов со стороной S .

Известны также рекомендации по расчету пластин с произвольным расположением отверстий. Однако, как показывает мировая практика, в макаронных прессах ведущих европейских фирм (Италия, Швейцария, Австрия, Франция) используются круглые матрицы с концентрическим расположением отверстий, что обуславливает ряд преимуществ. В то же время такие матрицы имеют чрезмерную толщину. Например, итальянская матрица фирмы Niccolai при наружном диаметре $D_n = 610$ мм и высоте вкладышей $h_n = 22$ мм изготовлена толщиной $h = 120$ мм.

Вместе с тем расчеты круглых макаронных перфорированных матриц с наружным диаметром $D_n = 298$ мм при толщине 50 мм показывают, что они выдерживают давление $P = 15$ МН/м² при максимальном прогибе, равном 0,00525 м, кольцевой пластины, опертой по внешнему краю [74].

Оптимальная толщина матриц позволяет уменьшить величину прогиба и компенсировать температурные деформации, обуславливающие коробление перфорированной рабочей поверхности нижней части матрицы. Однако толщина матриц может быть уменьшена, если у нее составной корпус. Покажем это на примерах.

Пример 1. Матрица круглая сплошная. Плоский сплошной круглый корпус матрицы равномерно нагружен по всей площади

давлением $P = 15 \text{ МПа}$ (рис. 3.12). Радиус корпуса $R = 260 \text{ мм}$. Корпус выполнен из стали 20 ($\mu = 0,3$, $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$). Температура нагрева корпуса матрицы не превышает $120 \text{ }^\circ\text{C}$, корпус свободно опирается по контуру. Толщина корпуса матрицы $h = 110 \text{ мм}$. Предел прочности стали 20 составляет $\sigma = 420 \text{ МПа}$; коэффициент, зависящий от способа крепления корпуса, $K = 0,38$; коэффициент запаса прочности $n_B = 3,5$.

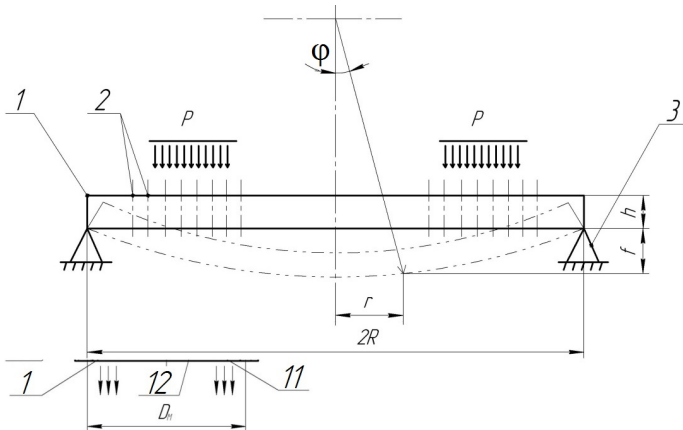


Рис. 3.12. Схема деформаций корпуса сплошной матрицы с шарнирным закреплением по наружному контуру:

1 – корпус матрицы; 2 – отверстия формующие; 3 – опора;
 φ – угол поворота к оси симметрии матрицы; f – прогиб центра матрицы;
 h – высота (толщина) корпуса матрицы; P – давление

Необходимо определить максимальные значения моментов напряжений и прогиба центра корпуса матрицы.

Решение. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 420 : 3,5 = 120 \text{ МПа}$. Максимальные моменты и напряжения будут иметь место в центре корпуса матрицы. Рассчитаем их по формулам:

$$M_r = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot PR^2 (3 + \mu) =$$

$$= 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 0,260^2 (3 + 0,3) = 210\,000 \text{ Н}\cdot\text{м/м};$$

$$\sigma_r = 6 \cdot \frac{M_r}{h^2} = 6 \cdot \frac{210\,000}{0,11^2} = 104 \cdot 10^6 \text{ Па} < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Условие выдержано.

Жесткость корпуса матрицы определим по выражению

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = \left(2 \cdot 10^{11} \cdot \frac{0,110^3}{12} \right) (1 - 0,3^2) = 24 \cdot 10^8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Прогиб корпуса матрицы в центре рассчитаем по формуле

$$f = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{PR^4}{D} = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,260^4 (5+0,3)}{24 \cdot 10^8 (1+0,3)} = 0,00441 = 4,4 \text{ мм}.$$

Таким образом, прогиб корпуса сплошной матрицы – примерно 4,4 мм.

Пример 2. Матрица круглая составная. Корпус матрицы равномерно нагружен по всей площади давлением $P = 15$ МПа (рис. 3.13).

Радиус корпуса $R = 260$ мм, радиус центрального вкладыша (основания) $R_1 = 130$ мм. Корпус выполнен из стали 20 ($\mu = 0,3$, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа). Температура нагрева корпуса матрицы не превышает 120 °С, корпус свободно опирается по контуру (большая кольцевая часть). Центральная (меньшая) часть корпуса установлена внутри большей кольцевой части со сквозным ступенчатым зазором. Толщина корпуса матрицы $h = 110$ мм, предел прочности стали 20 составляет $\sigma = 420$ МПа. Коэффициент, зависящий от способа крепления корпуса, $K = 0,38$; коэффициент запаса прочности $n_b = 3,5$.

Определить максимальные значения моментов напряжения и прогиба центра корпуса матрицы.

Решение. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 420 : 3,5 = 120$ МПа. Максимальные моменты и напряжения будут иметь место в центре корпуса матрицы. Рассчитаем их по формулам:

$$\begin{aligned} M_r &= 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot PR^2 (3 + \mu) = \\ &= 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 (0,260 - 0,013)^2 (3 + 0,3) = 52\,284,4 \text{ Н}\cdot\text{м/м}; \end{aligned}$$

$$\sigma_r = 6 \cdot \frac{M_r}{h^2} = 6 \cdot \frac{52\,284,4}{0,11^2} = 26 \cdot 10^6 \text{ Па} < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

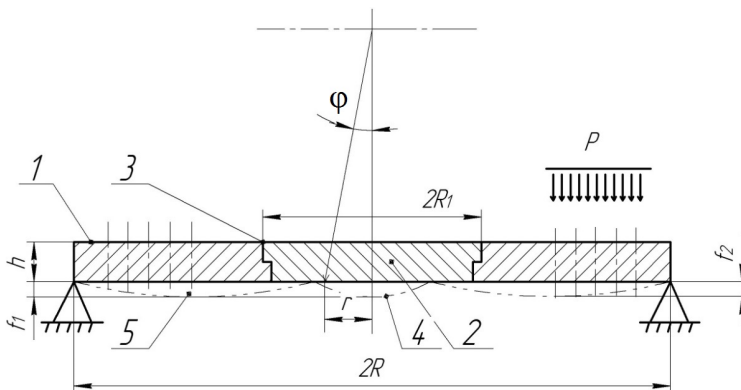


Рис. 3.13. Схема деформаций корпуса составной матрицы с шарнирным закреплением по наружному контуру:

- 1 – большая часть корпуса матрицы; 2 – меньшая (центральная) часть корпуса матрицы; 3 – зазор сквозной ступенчатый;
4 – центр матрицы; 5 – отверстия формирующие;

φ – угол поворота к оси симметрии матрицы; r – текущее значение радиуса;
 R – радиус корпуса матрицы; R_1 – радиус центральной части корпуса матрицы;
 f_1 – величина прогиба центральной части матрицы; f_2 – величина прогиба большей (кольцевой) части матрицы; h – высота (толщина) корпуса матрицы; P – давление

Условие выдержано.

Жесткость корпуса матрицы определим по выражению

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = \left(2 \cdot 10^{11} \cdot \frac{0,110^3}{12} \right) (1 - 0,3^2) = 24 \cdot 10^8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Прогиб корпуса матрицы в центре рассчитаем по формуле

$$y_0 = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{PR^4}{D} = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot 15 \cdot 10^6 \frac{(0,260 - 0,130)^4 (5 + 0,3)}{24 \cdot 10^8 (1 + 0,3)} = 0,00242 = 2,4 \text{ мм}.$$

Таким образом, прогиб корпуса составной матрицы – примерно 2,4 мм, что почти в два раза меньше прогиба корпуса сплошной матрицы. Максимальные моменты и напряжения в составных матрицах значительно снижены.

4. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕССОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

4.1. Реологический процесс формирования макаронных изделий в колодцах матрицы с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста

Предварительные сведения. Рассмотрим течение теста через цилиндрический канал конечной длины и постоянного диаметра под действием разности давлений у его входного и выходного отверстия [1, 13, 39, 48, 68].

Так как диаметр канала постоянный, то скорость течения теста во всех точках, равностоящих от стенки канала, одинакова, при этом скорость у стенки вследствие прилипания к ней теста равна нулю. Скорость течения – функция от r , т. е. $v = v(r)$, где r – расстояние слоя теста от центральной оси симметрии канала (рис. 4.1).

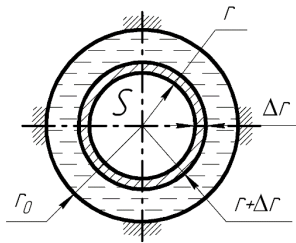


Рис. 4.1. Схема течения теста в цилиндрическом канале

Тогда скорость течения теста будет определяться по формуле

$$v = \frac{1}{4\eta} \frac{P - P_0}{L} (r_0^2 - r^2), \quad (4.1)$$

где η – коэффициент вязкости теста, Па·с;

P и P_0 – давление соответственно у входного (после конфузора) и выходного (перед диффузором) отверстий цилиндрической горловины вкладыша, Па;

L – длина колодца, м;

r_0 – радиус колодца, м.

Построение математической модели. Выделим в поперечном сечении цилиндрического канала элементарное кольцо радиусом r и толщиной Δr (рис. 4.1) и найдем его площадь ΔS как разность площадей двух кругов с радиусами $(r + \Delta r)$ и r :

$$\Delta S = \pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2 = \pi(r^2 + 2r\Delta r + \Delta r^2) - \pi r^2 = 2\pi r\Delta r. \quad (4.2)$$

Тогда объем теста, протекающий через это кольцо за 1 с:

$$\Delta Q = \Delta S v.$$

Принимая во внимание равенство (2.41) и значение ΔS , получаем:

$$\Delta Q = \frac{\pi}{2\eta} \frac{P - P_0}{L} r (r_0^2 - r^2) \Delta r, \quad (4.3)$$

или в дифференциальной форме:

$$dQ = \frac{\pi}{2\eta} \frac{P - P_0}{L} (r_0^2 - r^2) dr. \quad (4.4)$$

Пример 1. Найти объем теста, протекающий за 1 с через поперечное сечение канала, если известны давление P у входного отверстия канала, давление P_0 у выходного, диаметр d и длина L колодца, коэффициент вязкости η и скорость v течения теста, заданная формулой (4.1).

Решение. Если r изменяется от 0 до r_0 , то Q по смыслу задачи – от 0 до Q_0 . Проинтегрируем значение (4.4) в указанных пределах:

$$\int_0^{Q_0} dQ = \frac{\pi}{2\eta} \frac{P - P_0}{L} \int_0^{r_0} r (r_0^2 - r^2) dr. \quad (4.5)$$

Отсюда

$$Q_0 = \frac{\pi}{128} \frac{P - P_0}{L} \frac{d^4}{\eta}. \quad (4.6)$$

В данном случае рассмотрен закон истечения теста через цилиндрический канал с позиции так называемых нормально вязких «ньютоновских» жидкостей, т. е. таких, которые не образуют сцепления частиц и макромолекул, вызывающих резкое повышение вязкости, а коэффициент вязкости не является постоянной величиной, работа внешней силы затрачивается не только на преодоление «ньютоновской» вязкости, но и на разрушение структуры.

Из формулы (4.6) следует, что объемный расход теста Q_0 зависит от длины канала L : с увеличением L – уменьшается, а с уменьшением вязкости теста за счет его предварительного разогрева в колодце – увеличивается.

Определение скорости течения теста в цилиндрическом канале

Предварительные сведения. Рассмотрим тонкую цилиндрическую трубку конечной длины. Через нее под действием разностей давления у входного и выходного отверстия трубки протекает поток теста с заданным коэффициентом вязкости.

Учитывая симметричность сечения канала, можно предположить, что скорость теста во всех точках, равностоящих от стенки, одна и та же, а скорость у стенки вследствие прилипания к ней теста равна нулю. Таким образом, скорость v слоя теста зависит от его расстояния до стенки канала: $v = v(r)$.

Схема однородного сдвига слоев теста в продольном сечении канала показана на рис. 4.2.

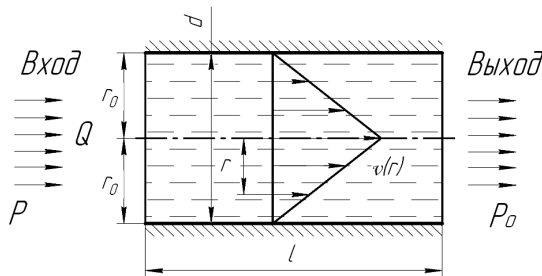


Рис. 4.2. Схема движения теста в продольном сечении горловины вкладыша

Основной закон вязкого течения, открытый Ньютоном:

$$F = \eta \frac{v_2 - v_1}{r_2 - r_1} S, \quad (4.7)$$

где S – площадь слоя, м;

v_1 и v_2 – скорость слоев, отстоящих от стенки канала на расстояния r_1 и r_2 соответственно, м/с².

Построение математической модели. Длина канала L , давление у его входного и выходного отверстия соответственно P и P_0 .

В соответствии с законом вязкого течения (законом Ньютона) получим дифференциальное уравнение для скорости движения теста. Для этого выделим в канале элементарный цилиндр длиной ΔL и радиусом r и изменим его радиус на Δr (см. рис. 4.2). Этот цилиндр будет испытывать трение, сила которого согласно закону Ньютона

$$\Delta F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta r} \Delta S, \quad (4.8)$$

где ΔF – сила внутреннего трения, Н;

ΔS – площадь боковой поверхности цилиндра, м².

Тогда

$$\Delta F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta r} 2\pi r \Delta L. \quad (4.9)$$

Силе трения противодействует сила давления, которая равна ΔF и противоположна ей по направлению:

$$\Delta F = -\pi r^2 \Delta P, \quad (4.10)$$

где πr^2 – площадь основания элементарного цилиндра, м²;

$$\Delta P = P - P_0. \quad (4.11)$$

Приравняв правые части равенств (4.9) и (4.10) для ΔF , получим:

$$\Delta v = -\frac{1}{2\eta} \frac{\Delta P}{\Delta L} \Delta r. \quad (4.12)$$

Так как поперечные сечения канала одинаковы по всей длине, то давление распределяется равномерно и составляет $\Delta P = \frac{P - P_0}{L}$. Поэтому

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = -\frac{P - P_0}{L}. \quad (4.13)$$

Значит

$$\Delta v = -\frac{1}{2\eta} \frac{P - P_0}{L} r \Delta r, \quad (4.14)$$

или в дифференциальной форме:

$$\Delta v = -\frac{1}{2\eta} \frac{P - P_0}{L} r dr. \quad (4.15)$$

Пример 2. Найти скорость ламинарного течения теста как функцию r , если радиус колодца r_0 и $v(r_0) = 0$.

Дифференциальное уравнение (4.15) с условием $v(r_0) = 0$ является задачей Коши. Проинтегрировав это уравнение, получим:

$$\int_0^v dv = -\frac{P - P_0}{2\eta L} \int_{r_0}^r r dr, \quad (4.16)$$

откуда

$$v = \frac{1}{4\eta} \frac{P - P_0}{L} (r_0^2 - r^2). \quad (4.17)$$

В колодце вкладыша имеет место предварительное уплотнение теста, его пластификация и разогрев. Таким образом, в колодцах наблюдается упорядоченное течение теста, при котором поток перемещается слоями, параллельными направлению течения, т. е. можно считать, что такое течение носит ламинарный характер и справедливо для нормально вязких – «ньютоновских» – жидкостей.

Из формулы (4.17) следует, что скорость течения теста в цилиндрическом колодце зависит от длины L : с ее увеличением скорость уменьшается при одной и той же разности давлений $(P - P_0)$.

4.2. Реологическое моделирование процессов течения макаронного теста в каналах конфузorno-диффузорных вставок формирующих матриц

Одним из эффективных направлений модернизации конструкций прессового оборудования для производства макаронных изделий является расширение функциональных возможностей конструктивных элементов, используемых недостаточно эффективно [1–3]. К числу таких элементов относятся колодцы матриц макаронных прессов, которые, занимая достаточно большой объем, не выполняют технологически важных функций.

Поперечное сечение колодцев значительно больше суммарной площади формирующих отверстий вставок, что обуславливает неравномерность движения теста из колодцев в формирующие отверстия. При этом в колодцах практически не происходит предварительного уплотнения и пластификации теста, т. е. отсутствует его подготовка к процессу формования.

Существенным недостатком работы шнековых макаронных прессов, обусловленным несовершенством конструкции матриц, является неравномерность выпрессовывания изделий по плоскости матрицы, приводящая к увеличению количества отходов в виде обрезков, а в конечном счете – к снижению производительности пресса. Количество отходов по указанной причине на макаронных прессах ЛПЛ-2М достигало 20 % [1].

Расширение функциональных возможностей колодцев матриц можно обеспечить за счет установки перед фильерами специальных коническо-цилиндрических вставок, имеющих, подобно трубкам Вентури, зоны сужения (конфузор), расширения (диффузор) и расположенный между ними цилиндрический пояс. Изменяя размеры конических и цилиндрических элементов вставки, можно управлять величиной входного сопротивления перед фильерой, а вместе с ней – полным сопротивлением течению макаронного теста, от которого зависит скорость выхода экструдата. Установка вкладышей позволяет: осуществить более плавный переход теста в формирующие отверстия фильеры; провести дополнительное уплотнение, пластификацию, гомогенизацию (за счет сдвигового деформирования), дополнительный разогрев теста (как за счет теплопередачи от стенок матрицы, так и за счет рассеивания энергии при сдвиговом дефор-

мировании) и тем самым снизить гидравлическое сопротивление при продавливании теста сквозь отверстия вкладышей; повысить качество макаронных изделий; увеличить производительность макаронного пресса; повысить долговечность работы фильер. Кроме того, установка таких вставок повышает изгибную прочность и жесткость матрицы, что также благоприятно сказывается на работе прессового оборудования.

Однако реологические аспекты такого метода регулирования скорости применительно к макаронному тесту не изучены, рекомендации по расчету и проектированию конструктивных элементов не разработаны. Все это является существенным препятствием для использования метода в инженерной и производственной практике.

Постановка задачи и методика исследования. Одним из эффективных направлений модернизации конструкций прессового оборудования для производства макаронных изделий является установка перед фильерами специальных коническо-цилиндрических вставок, имеющих конфузор, диффузор и горловину между ними. В зависимости от соотношения длин конфузора и диффузора возможно несколько конструктивных исполнений, например в виде симметричного вкладыша-вставки или несимметричных прямоточной или противоточной (обратной) трубок Вентури, применение которых обеспечивает в гидросистемах минимальные возможные гидравлические потери [5].

На рис. 4.3, *а* показан общий вид матрицы с конфузорно-диффузорными вставками 4 к малому макаронному прессу МИТ-2. Матрица состоит из корпуса 3 с колодцами 1, внутри которых установлены вкладыши 2.

Вставка 4 состоит из двух усеченных конусов различной длины – конфузора 6 и диффузора 8 с небольшой цилиндрической горловиной 7 между ними (рис. 4.3, *б*). Конфузор 6, обращенный большим основанием в сторону шнека, служит для плавного входа потока теста и постепенного его уплотнения. Предназначение горловины 7 (средней, цилиндрической части вставки) – стабилизировать поток теста и направить его в диффузор 8.

В диффузоре – конической части вставки, примыкающей расширенной частью к вкладышу 4 с формирующими отверстиями 5, – постепенно снижается скорость теста и выравнивается давление по плоскости фильеры. В конфузоре, горловине и диффузоре вставки

имеет место не только постепенное уплотнение тестового потока, но и дополнительный его разогрев. Таким образом, тесто подходит к вкладышу 4 предварительно уплотненным и разогретым, а затем плавно входит в формующие отверстия 5.

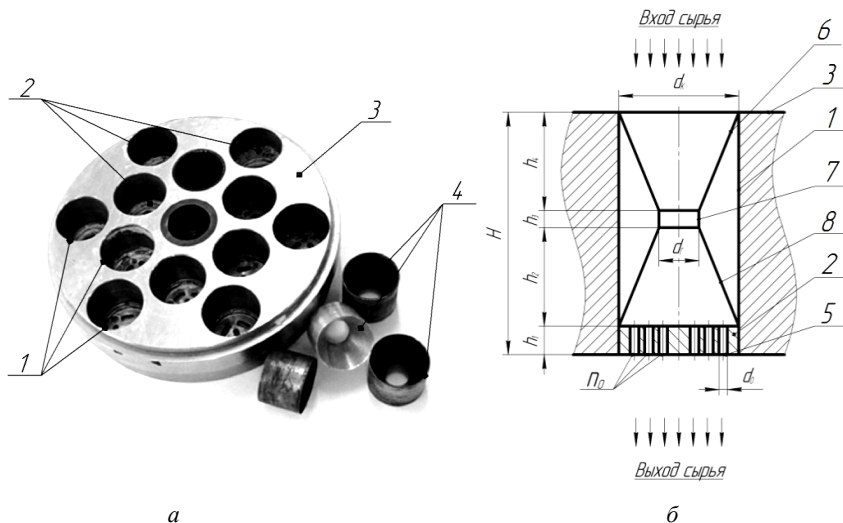


Рис. 4.3. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) матрицы с конфузорно-диффузорными вставками к малому макаронному прессу МИТ-2:

d_k – диаметр конфузора; d_r – диаметр горловины; d_o – диаметр формующего отверстия; H – общая высота (толщина) корпуса матрицы; h_1 – высота вкладыша; h_2 – высота диффузора; h_3 – высота (длина) горловины; h_4 – высота конфузора

Вставка установлена в колодце 1 на фильерном вкладыше 2 плотно (с натягом) без возможности проворачивания. Диаметр диффузора 8 равен диаметру вкладыша 2, что обеспечивает свободный проход теста из диффузора 8 в формующие отверстия 5. Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Стрелками указано направление движения исходного сырья.

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и матрицу, иначе при контакте с тестом может возникнуть гальваническая пара и появившиеся в ее системе слабые токи приведут

к коррозии металла. Матрицы изготавливают из антикоррозийных и прочих материалов, таких как бронза Бр-АЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Внутренние поверхности вставки (конфузор, горловина и диффузор) желательнее покрывать тефлоном.

Разработка реологических моделей течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузорно-диффузорной вставки. Макаронное тесто представляет собой реологически сложную систему, деформирование которой связано с преодолением вязкого внутреннего и внешнего трения, а также обусловленных этим трением трибореологических эффектов [6–9, 11]. Реологическое поведение пищевых смесей рассмотрено в работах [10, 13–15], а течение при экструзионном формовании – в работах [16, 17]. Специфика макаронного теста при этом не учитывается [18, 19].

В научно-технической литературе течение высоконаполненных систем изучено только в общетеоретической постановке [13, 15], а также применительно к течению высоконаполненных полимерных композитов [20–22].

Анализ экспериментальных данных показал, что макаронное тесто подчиняется с достаточной для технических расчетов точностью закону вязкого течения Балкли–Гершеля [18, 19]:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (4.18)$$

где τ_0 – сдвиговая прочность материала (минимальные значения напряжений сдвига, при которых начинает происходить необратимое деформирование материала), Па;

k – аналог вязкости, называемый коэффициентом консистенции, Па;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ;

n – параметр среды (показатель степени).

Размерность k зависит от значения n , поэтому k не является физической величиной: это коэффициент, получаемый в результате аппроксимации кривой течения степенной функцией.

Вместе с тем ранее выполненные исследования показали, что вклад сдвиговой прочности τ_0 в общее сопротивление течению мал [19]. В табл. 4.1 приведены расчетные значения потерь давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу τ_0 различных видов макаронного теста [19].

Таблица 4.1

Расчетные потери давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу τ_0 макаронного теста влажностью 30 % в каналах ступенчато-переменного сечения при температуре 40 °С и давлении 4,9 МПа

Вид муки для макаронного теста	Предельное сопротивление сдвигу τ_0 , кПа	Потери давления по ступеням, кПа				Суммарные потери давления, кПа
		1-я ступень ($d_1 = 23$ мм; $L_1 = 32$ мм)	2-я ступень ($d_2 = 21$ мм; $L_2 = 29$ мм)	3-я ступень ($d_3 = 20$ мм; $L_3 = 26$ мм)	4-я ступень ($d_4 = 18$ мм; $L_4 = 23$ мм)	
Высший сорт	3,28	18,25	18,12	17,06	16,76	70,19
Первый сорт	5,60	31,17	30,93	29,12	28,62	119,84
На основе полу-крупки	15,00	83,48	82,86	78,00	76,67	321,01

Примечание: при увеличении температуры происходит уменьшение предельного напряжения сдвига (сдвиговой прочности) материала. Для муки первого сорта: при 18 °С – 18,3 кПа, при 40 °С – 5,6 кПа, при 56 °С – 2,1 кПа.

По данным табл. 4.1 видно, что вклад τ_0 в общий вклад давления мал (0,3 МПа) в сравнении с общим давлением формования (6,0–12,0 МПа), поскольку не превышает 2,5 %–5,0 %. Основной вклад вносит вязкая составляющая сопротивлению течения. Поэтому при технических расчетах можно осуществлять анализ на основе степенного реологического уравнения Оствальда–де Виля [18, 22]

$$\tau \approx k \dot{\gamma}^n. \quad (4.19)$$

С использованием методических подходов, изложенных в работах [17, 20–22], рассмотрим течение макаронного теста в отдельных зонах (участках) конфузorno-диффузорного канала.

Цилиндрический участок. Зависимость объемной производительности Q от перепада давления $P_{ц}$, размеров канала (длины $L_{ц}$, радиуса R) и показателей реологических свойств k, n имеет вид [22]:

$$Q = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{P_{ц}}{2kL_{ц}} \right)^{\frac{1}{n}} R_{ц}^{\frac{3n+1}{n}}, \quad (4.20)$$

откуда перепад давления $P_{ц}$, необходимый для обеспечения объемной производительности Q :

$$P_{ц} = \left(\frac{1 + 3n}{\pi n} \frac{Q}{R_{ц}^3} \right)^n \frac{2kL_{ц}}{R_{ц}}. \quad (4.21)$$

Массовая производительность Q_m , кг/ч, может быть выражена через объемную Q , м³/с, при помощи расчетной зависимости

$$Q = \frac{Q_m}{3600\rho}, \quad (4.22)$$

где ρ – плотность макаронного теста, кг/м³.

Средняя скорость $V_{ср}$ течения теста может быть определена как отношение объемного расхода Q к площади сечения πR^2 :

$$V_{ср} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\pi n}{3n + 1} \left(\frac{P_{ц}}{2kL_{ц}} \right)^{\frac{1}{n}} R_{ц}^{\frac{n+1}{n}}. \quad (4.23)$$

Реологические модели течения для конических участков вставки в зонах сужения сечения (конфузор) и расширения сечения (диффузор) могут быть получены из зависимостей для цилиндрического канала с использованием метода предельного перехода к элементарному объему. Принимая материал несжимаемым (пренебрегая упругими деформациями вследствие их малых значений), можно считать, что расход теста в любом сечении постоянен ($Q = \text{const}$). Кроме того, можно пренебречь инерционными силами, обусловленными ускорением или замедлением движения теста, в связи с их незначительностью.

Сужающийся канал (конфузор) (рис. 4.4, а). Для элементарного объема длиной dx справедливы формулы течения как для элементарного цилиндра такой же длины. Сделав предельный переход от длины L к дифференциалу dx и заменив полный перепад давления P на элементарный перепад dp в формуле (4.21), получим:

$$\frac{dp}{dx} = \left(\frac{1 + 3n}{\pi n} \right)^n Q^n \frac{2k}{R^{1+3n}}. \quad (4.24)$$

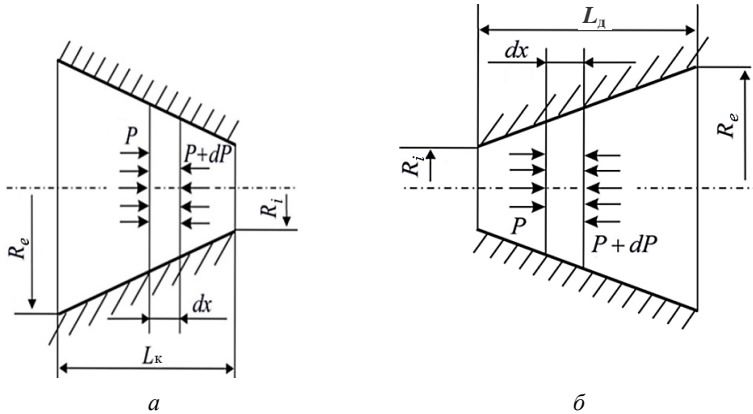


Рис. 4.4. Расчетная реологическая схема течения макаронного теста в коническом канале:
a – сужающемся; *б* – расширяющемся

Входящий в формулу (4.24) радиус R изменяется по длине, т. е. является функцией от координаты x .

Интегрирование уравнения (4.24) можно осуществить путем замены переменной. Введя переменную

$$u = R = R_e - \frac{R_e - R_i}{L_k} x \quad (4.25)$$

и проведя преобразования

$$du = -\frac{R_e - R_i}{L_k} dx, \quad (4.26)$$

после интегрирования и возвращения к исходным переменным получим следующую формулу, связывающую перепад давления, необходимый для преодоления сопротивления вязкому течению макаронного теста в сужающемся канале (конфузоре), с размерами канала и показателями реологических свойств теста:

$$P_k = \frac{2kL_k}{3n(R_e - R_i)} \left(\frac{1 + 3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right). \quad (4.27)$$

Из формулы (4.27) видно, что это давление линейно зависит от длины конфузора L_k и коэффициента консистенции теста k . В то же

время оно нелинейно зависит от удельного расхода теста Q через конфузур, а также от поперечных размеров (радиусов) канала.

Расширяющийся канал (диффузор) (рис. 4.4, б). Исходные данные те же, что и для сужающегося канала (конфузора). Для элементарного объема длиной dx справедливы формулы течения как для элементарного цилиндра такой же длины. Дифференциальное уравнение равновесия элементарного участка совпадает с уравнением (4.24).

Произведем интегрирование этого уравнения с использованием метода замены переменной. Введя переменную

$$u = R = R_i + \frac{R_i - R_e}{L_d} x \quad (4.28)$$

и выполнив преобразование

$$dx = \frac{L_d}{R_e - R_i} du, \quad (4.29)$$

в результате интегрирования получим:

$$P_d = \frac{2kL_d}{3n(R_e - R_i)} \left(\frac{1 + 3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right). \quad (4.30)$$

Аналитические зависимости (4.29) и (4.30) совпадают по форме записи.

Поскольку расход теста через все участки вставки одинаков, то суммарный перепад давления, необходимый для преодоления сопротивления вязкому течению, может рассматриваться как сумма перепадов давления в конфузоре, цилиндре и диффузоре.

Приведенные формулы позволяют производить расчет перепадов давления в конфузурно-диффузорной вставке или ее элементах, а также осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление вязкому течению. По заданным реологическим характеристикам теста и размерам канала можно определить расход (объемную производительность канала) и перепад давления на каждом участке. Давление формования будет равно сумме перепадов давлений P_i на отдельных участках:

$$P_B = P_K + P_{Ц} + P_D. \quad (4.31)$$

Поскольку внутренние радиусы конфузора и диффузора равны радиусу цилиндра, то для случая, когда равны внешние радиусы, можно записать:

$$P_B = 2k \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{R_i} + \frac{L_{\text{к}} + L_{\text{д}}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (4.32)$$

Совместное решение выражений (4.32) и (4.23) дает формулу для расчета взаимосвязи перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста в конфузorno-диффузорной вставке с массовой производительностью (расходом), кг/ч:

$$P_B = 2k \left(\frac{1+3n}{3600\pi n} \frac{Q_m}{\rho R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{R_i} + \frac{L_{\text{к}} + L_{\text{д}}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (4.33)$$

Выразив радиусы в формулах (4.32) и (4.33) через соответствующие диаметры, после преобразований запишем видоизмененные зависимости, связывающие перепад давления с размерами участков канала и показателями реологических свойств макаронного теста:

$$P_B = 4k \left(\frac{1+3n}{450\pi n} \frac{Q_m}{\rho D_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{D_i} + \frac{L_{\text{к}} + L_{\text{д}}}{3n(D_e - D_i)} \left(1 - \frac{D_i^{3n}}{D_e^{3n}} \right) \right). \quad (4.34)$$

Полученные аналитические зависимости (4.33) и (4.34) показывают, что при равных внешних и внутренних диаметрах полостей канала перепад давления на преодоление сопротивления вязкому течению линейно зависит от длин каждого из участков, причем для конфузора и диффузора это сопротивление зависит от суммы соответствующих длин. Из этого следует, что изменение направления течения макаронного теста (установка вставки по схемам прямоточной или противоточной трубок Вентури) при неизменных значениях показателей реологических свойств не влияет на гидродинамическое сопротивление вставки, поскольку сумма длин участков остается неизменной. Увеличение длины каждого из участков приводит к росту необходимого давления

на преодоление вязкого сопротивления. Нелинейный рост давления наблюдается при уменьшении размера радиуса цилиндра, равного внутреннему радиусу конфузора и диффузора (проходного отверстия канала).

Зависимости позволяют осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов канала и показателей реологических свойств теста, а также удельного расхода теста (производительности) через один канал на сопротивление вязкому течению.

Результаты исследований и их обсуждение. Разработан ряд типоразмеров вставок (табл. 4.2), чтобы осуществить численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов канала и показателей реологических свойств макаронного теста, а также удельного расхода теста (производительности) на сопротивление вязкому течению.

Для удобства анализа принята следующая система обозначения конфузоро-диффузорных вставок: ВКД $D \times d \times L$, где ВКД – вставка конфузоро-диффузорная; D , d , L – наружный диаметр вставки, внутренний диаметр полости вставки (диаметр проходного отверстия), длина (высота) вставки соответственно.

Таблица 4.2

Конструктивные размеры вставок матрицы макаронного пресса для проведения численного моделирования

Параметр	Условное обозначение вставки			
	ВКД 23×10×48	ВКД 23×10×34	ВКД 23×10×18	ВКД 23×10×13
Диаметр, мм:				
– вставок (наружный)	23	23	23	23
– конфузора (максимальный)	22	22	22	22
– цилиндрического пояска	10	10	10	10
Длина, мм:				
– общая	48	34	18	13
– конфузора	27	21	12,5	7,5
– диффузора	13	8	5	5
– цилиндрического пояска	8	5	0,5	0,5

Значения реологических констант типового макаронного теста для различных скоростей сдвига, полученные в работе [18], приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Расчетные значения констант k и n
для теста при температуре 40 °С

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Реологические константы	
	n	k , кПа·с ^{n}
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. 4.3 показывает хорошую воспроизводимость результатов. Среднее значение коэффициента k составляет 109,97 кПа·с ^{n} , а коэффициента n – 0,473. Для выполнения оценочных технических расчетов взаимосвязи перепадов давления по длине участков канала и в целом по длине конфузорно-диффузорной вставки примем следующие значения констант степенного реологического уравнения Оствальда–де Виля: $k = 0,11$ МПа·с ^{n} , $n = 0,473$.

Произведено численное моделирование и получены расчетные данные по влиянию размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление его вязкому течению. В табл. 4.4 приведены рассчитанные значения перепадов давления, необходимого для преодоления сопротивления вязкому течению макаронного теста с массовым расходом Q_m , проходящего через конфузорно-диффузорные вставки, размерные параметры которых даны в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Взаимосвязь перепада давления
на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста,
проходящего через конфузорно-диффузорные вставки

Типоразмер вставки	Массовый расход Q_m макаронного теста, кг/ч					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
ВКД 23×10×48	0,82	1,14	1,39	1,59	1,77	1,92
ВКД 23×10×34	0,57	0,79	0,96	1,10	1,22	1,33
ВКД 23×10×18	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54	0,59
ВКД 23×10×13	0,18	0,25	0,31	0,35	0,39	0,43

Данные по влиянию диаметра проходного отверстия рассмотренных конфузурно-диффузорных вставок на сопротивление вязкому течению макаронного теста с массовым расходом $Q_m = 1,25$ кг/ч приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Взаимосвязь расчетного перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста с массовым расходом $Q_m = 1,25$ кг/ч, проходящего через конфузурно-диффузорные вставки

Типоразмер вставки	Диаметр d проходного отверстия, мм					
	4	6	8	10	12	14
ВКД $23 \times d \times 48$	9,45	4,34	2,59	1,77	1,31	1,02
ВКД $23 \times d \times 34$	6,29	2,94	1,77	1,22	0,91	0,72
ВКД $23 \times d \times 18$	2,03	1,11	0,74	0,54	0,42	0,35
ВКД $23 \times d \times 13$	1,54	0,83	0,55	0,40	0,31	0,25

Для более широкого диапазона изменения размеров полости и удельного (на один канал) массового расхода макаронного теста взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению приведена в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению с массовым расходом макаронного теста, проходящего через конфузурно-диффузорные вставки, для различных значений диаметра проходного отверстия полости

Диаметр d проходного отверстия, мм	Массовый расход Q_m макаронного теста, кг/ч					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
l	2	3	4	5	6	7
Вставка ВКД $23 \times d \times 48$						
5	2,86	3,97	4,81	5,51	6,12	6,67
6	2,03	2,82	3,41	3,91	4,34	4,73
7	1,53	2,13	2,58	2,95	3,28	3,57
8	1,21	1,68	2,03	2,33	2,59	2,82
9	0,99	1,37	1,66	1,90	2,11	2,30
10	0,82	1,14	1,39	1,59	1,77	1,92
11	0,70	0,98	1,18	1,36	1,51	1,64
12	0,61	0,85	1,03	1,18	1,31	1,43

Окончание таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7
Вставка ВКД $23 \times d \times 34$						
5	1,92	2,66	3,23	3,70	4,11	4,48
6	1,37	1,90	2,31	2,64	2,94	3,20
7	1,04	1,45	1,75	2,01	2,23	2,43
8	0,83	1,15	1,39	1,59	1,77	1,93
9	0,68	0,94	1,14	1,31	1,45	1,58
10	0,57	0,79	0,96	1,10	1,22	1,33
11	0,49	0,68	0,82	0,94	1,04	1,14
12	0,43	0,59	0,71	0,82	0,91	0,99
Вставка ВКД $23 \times d \times 18$						
5	0,68	0,94	1,14	1,303	1,45	1,58
6	0,52	0,72	0,87	1,00	1,11	1,21
7	0,42	0,58	0,70	0,80	0,89	0,97
8	0,34	0,48	0,58	0,66	0,74	0,80
9	0,29	0,41	0,49	0,56	0,63	0,68
10	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54	0,59
11	0,22	0,31	0,37	0,43	0,48	0,52
12	0,20	0,28	0,33	0,38	0,42	0,46
Вставка ВКД $23 \times d \times 13$						
5	0,51	0,71	0,86	0,98	1,09	1,19
6	0,39	0,54	0,65	0,75	0,83	0,91
7	0,31	0,43	0,52	0,60	0,66	0,72
8	0,26	0,35	0,43	0,49	0,55	0,60
9	0,22	0,30	0,36	0,42	0,46	0,50
10	0,19	0,26	0,31	0,36	0,40	0,43
11	0,16	0,23	0,27	0,31	0,35	0,38
12	0,15	0,20	0,24	0,28	0,31	0,34

Из данных табл. 4.5 и 4.6 видно, что с уменьшением диаметра проходного отверстия полости расчетное значение давления, необходимого для преодоления сопротивления вязкому течению, возрастает для всех исследованных значений массовой производительности. Для всех исследованных типоразмеров вставок в широком диапазоне изменения значений расхода макаронного теста Q_m с изменением диаметра проходного отверстия зависимости имеют аналогичный характер.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что сопротивление вязкому течению зависит от размеров участков канала, показателей реологических свойств и удельного расхода макаронного теста (производительность устройства на одну фильеру). При равных внешних и внутренних диаметрах полостей канала перепад давления на преодоление сопротивления вязкому течению зависит от суммы длин участков конфузора и диффузора, из чего следует, что изменение направления течения макаронного теста при неизменных значениях показателей реологических свойств не влияет на гидродинамическое сопротивление вставки. Увеличение длины каждого из участков приводит к линейному росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления. Резкий рост давления наблюдается при уменьшении диаметра проходного отверстия цилиндра, равного внутреннему диаметру конфузора и диффузора. Полученные результаты, дополненные данными экспериментальной проверки, могут составить основу инженерно-технологических расчетов при проектировании конфузорно-диффузорных вставок для лабораторных и промышленных матриц макаронных прессов.

4.3. Управление течением макаронного теста в формирующих матрицах прессы с помощью конфузорно-диффузорных вставок

Существенным недостатком прессования макаронных изделий на шнековых прессах является неравномерность скорости выхода экструдата по плоскости матрицы, которая приводит к увеличению количества отходов в виде обрезков и, в конечном счете, к снижению производительности прессы. Количество отходов по указанной причине, например, на макаронных прессах ЛПЛ-2М достигало 20 % [1]. Неравномерность скоростей формования макаронных изделий по сечению матрицы является нерешенной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Известно несколько способов частичного устранения неравномерности формования по зонам матрицы: применение устройств конусно-цилиндрической формы, колосников, тормозящих решеток, устанавливаемых на диск матрицы [2–6]. Данная проблема может

быть решена установкой в колодцах матрицы специальных вставок, содержащих зоны сжатия (конфузор), расширения (диффузор) и цилиндрический переход между ними. Однако конструктивно-технологические аспекты такого подхода в научно-технической литературе не освещены, что является сдерживающим фактором на пути внедрения подхода в производственную практику.

Анализ возможных механизмов неравномерности распределения скорости выпрессовывания макаронных изделий. Макаронное тесто представляет собой реологически сложную систему, деформирование которой связано с преодолением вязкого внутреннего и внешнего трения, а также обусловленных этим трением трибореологических эффектов [7–11]. В научно-технической литературе указанные эффекты изучены только в общетеоретической постановке [13–15], а также применительно к течению высоконаполненных полимерных композитов [16–18]. Специфика макаронного теста при этом не учтена [7, 19].

Основными параметрами, характеризующими режим прессования макаронных изделий, являются давление, оказываемое рабочими органами пресса на тесто, и скорость выпрессовывания. Давление в предматричной камере обусловлено сопротивлением теста, которое оказывают его истечению формующие отверстия матрицы. Величина давления, как и скорость прессования, является функцией многих факторов: консистенции теста, конфигурации формующих отверстий, характера течения теста в отверстиях и т. д. Скорость и давление зависят от температуры и влажности теста (от его пластично-вязких свойств), состояния поверхности формующих элементов матрицы и многих других факторов, связанных со свойствами исходного сырья, расходуемого на приготовление макаронного теста. Наличие пульсации давления в предматричной камере приводит к неравномерному выпрессовыванию полуфабриката, что не только уменьшает производительность действующего оборудования, но и затрудняет механизацию и автоматизацию последующих технологических операций.

Эпюра скоростей и давления прессования макаронных изделий через круглую матрицу, полученная Ю. А. Калошиным, представлена на рис. 2.4. На ней выделяется несколько кольцевых зон по диску матрицы с примерно одинаковой скоростью [2]. В точках,

расположенных в центральной части матрицы, а также по наружному радиусу, скорости прессования выше, чем в остальных точках плоскости матрицы. Выявлено, что температура в центральной части матрицы примерно одинакова, а ближе к периферии начинает возрастать, достигая максимального значения в зоне предматричной камеры. Повышение температуры в периферийных слоях тестовой массы приводит к уменьшению вязкости формируемой массы и, как следствие, к увеличению скорости выпрессовывания. Высокая скорость формования изделий в центральной зоне матрицы объясняется максимальным давлением тестового потока, при этом основными факторами, сглаживающими пульсацию, являются внутреннее вязкостное и внешнее трение на ограничивающей поверхности. Существенное влияние на эпюру скоростей оказывают также кинематические и геометрические характеристики нагнетателя теста, конструктивные изменения предматричной камеры и другие факторы.

Обоснование направления модернизации конструкции матрицы.

Наибольшее распространение в макаронной промышленности получили матрицы толщиной от 60 до 110 и даже 140 мм, при этом толщина фильерных вкладышей с формирующими отверстиями составляет всего 10–21 мм. На филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируются автоматические линии по производству коротких макаронных изделий фирмы FAVA S.p.A. (Италия), оснащенные матрицами фирмы Landucci толщиной $H = 110$ мм, в колодцах которых установлены фильерные вкладыши толщиной $h = 21$ мм.

На ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируется линия фирмы Buhler AG (Швейцария), матрицы которой при наружном диаметре $D = 610$ мм имеют толщину $H = 140$ мм при толщине фильерных вставок 21 мм. Поперечное сечение колодцев значительно больше суммарной площади формирующих отверстий вставок, что обуславливает неравномерность движения теста из колодцев в формирующие отверстия. В колодцах практически не происходит предварительного уплотнения и пластификации теста, т. е. отсутствует предварительная подготовка теста к процессу формования.

Данная проблема может быть решена установкой в колодцах матрицы конфузорно-диффузорных вставок. Возможно несколько конструктивных исполнений, например в виде симметричного

вкладыша-вставки (рис. 4.5, *a*) или несимметричных типа прямой (рис. 4.5, *б*) или противоточной (обратной) трубки Вентури (рис. 4.5, *в*). Их применение обеспечивает в гидросистемах минимальные возможные гидравлические потери [11].

Вставка состоит из двух усеченных конусов различной длины – конфузора 1 и диффузора 5 с небольшой цилиндрической горловиной 4 между ними. Конфузор 1, обращенный большим основанием в сторону шнека, служит для плавного входа потока теста и постепенного его уплотнения. Предназначение горловины 4 (средней, цилиндрической части вставки) – стабилизировать поток теста и направить его в диффузор 5.

В диффузоре – конической части вставки, примыкающей расширенной частью к вкладышу 6 с формующими отверстиями 7, – постепенно снижается скорость теста и выравнивается давление по плоскости фильтры. В конфузоре, горловине и диффузоре вставки имеет место не только постепенное уплотнение тестового потока, но и дополнительный его разогрев. Таким образом, тесто подходит к вкладышу 6 предварительно уплотненным и разогретым, а затем плавно входит в формующие отверстия 7.

Вставка установлена в колодце 3 на фильерном вкладыше 6 по переходной посадке плотно, с минимальным обеспечивающим неподвижность соединения при сборке натягом. Необходимость в значительном натяге отсутствует, поскольку вставка в осевом направлении при работе пресса прижимается к фильерному вкладышу за счет разности давлений теста на входе в канал и на выходе из него, а в радиальном направлении прижимается к стенкам колодца матрицы за счет упругих деформаций под действием давления теста, находящегося в полости вставки. Диаметр диффузора 5 равен диаметру вкладыша 6, что обеспечивает свободный проход теста из диффузора 5 в формующие отверстия 7. На рис. 4.5 показан вариант установки вставки внутри колодца 3 на вкладыше 6 (вплотную без зазора). Втулка установлена неподвижно диффузором 5 вниз, конфузором 1 вверх – навстречу движению теста, заподлицо с рабочей поверхностью корпуса 2 матрицы. Формующие отверстия 7 остаются открытыми для прохода теста.

Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Стрелками указано направление движения исходного сырья.

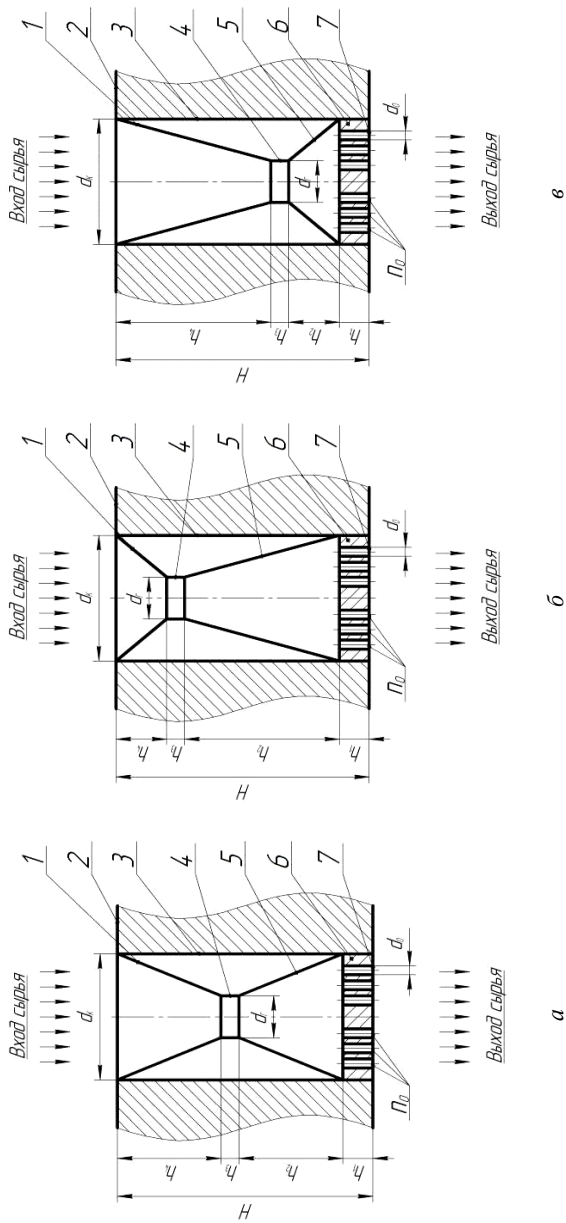


Рис. 4.6. Схема конфузорно-диффузорной вставки макаронной матрицы:

a – симметричной; $б$ – в форме прямооточной трубки Вентури; $в$ – в форме противоточной (обратной) трубки Вентури;
 d_k – диаметр конфузора; d_t – диаметр горловины; d_0 – диаметр формирующего отверстия; H – общая высота (толщина) корпуса матрицы;
 h – высота вкладыша; h_1 – высота диффузора; h_2 – высота (длина) горловины; h_3 – высота конфузора

При конструировании вставок исходили из того, что для эффективной работы нового устройства необходимо, чтобы площадь поперечного сечения горловины вставки F_r была равна суммарной площади поперечного сечения формирующих отверстий фильерного вкладыша:

$$F_r = f_0 n_0, \quad (4.35)$$

где f_0 – площадь поперечного сечения формирующего отверстия, м^2 ;
 n_0 – количество формирующих отверстий в фильерном вкладыше.

Устройство работает следующим образом. В шнековой камере пресса тесто подвергается интенсивному механическому воздействию со стороны винтовой лопасти шнека, освобождается от включений воздуха, становится плотным, упруго-пластичным и вязким. Уплотненное макаронное тесто с помощью шнека, преодолевая сопротивление матрицы, продавливается сквозь колодцы 3 и вкладыши 6.

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и матрицу, иначе при контакте с тестом может возникнуть гальваническая пара и появившиеся в ее системе слабые токи приведут к коррозии металла. Матрицы изготавливают из антикоррозийных материалов, таких как бронза Бр-АЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Для внутренних поверхностей вставки (конфузор, горловина и диффузор) лучшим покрытием является тефлон. Толщина стенки вставки должна быть минимальной, но обеспечивающей жесткость и прочность конструкции, а также требуемый размер проходного отверстия.

Методика и результаты оценочного эксперимента. Для предварительной (оценочной) экспериментальной проверки теории изготовлены специальные вставки, установленные в зонах повышенных скоростей выпрессовывания (центральный и периферийные колодцы) матрицы для производства лапши к малому макаронному прессу МИТ-2 (рис. 4.3, а).

Конструктивные параметры испытанных вставок, приведенные в табл. 4.7, определены на основе результатов предварительного комплексного реологического анализа процессов течения макаронного теста в конфузоре, диффузоре и горловине вставки.

Поскольку вклад сдвиговой прочности τ_0 в общее сопротивление вязкому течению, как правило, мал (0,3 МПа в сравнении с общим давлением формования – 6,0–12,0 МПа) [20], то основной вклад вносит вязкая составляющая сопротивлению течения. Поэтому при

оценочных технических расчетах анализ осуществляли на основе степенного реологического уравнения Оствальда–де Вилля [7]

$$\tau \approx k \dot{\gamma}^n$$

со значениями констант $k = 0,11 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{n-1}$, $n = 0,473$.

Таблица 4.7

Взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста, проходящего через конфузорно-диффузорную вставку

Диаметр проходного отверстия вставки, мм	Массовый расход Q_m макаронного теста, кг/ч					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
5	0,508	0,705	0,854	0,978	1,087	1,185
6	0,388	0,539	0,653	0,748	0,831	0,906
7	0,311	0,432	0,523	0,599	0,666	0,726
8	0,258	0,357	0,433	0,496	0,551	0,601
9	0,219	0,303	0,368	0,421	0,468	0,510
10	0,189	0,263	0,318	0,364	0,405	0,442
11	0,166	0,231	0,280	0,320	0,356	0,388
12	0,148	0,205	0,249	0,285	0,317	0,345

С использованием методических подходов, изложенных в работах [17, 18], получены значения перепадов давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста для широкой номенклатуры типоразмеров конфузорно-диффузорных вставок. В качестве примера в табл. 4.7 приведены расчетные значения перепадов давления при симметричной конфузорно-диффузорной вставке с длиной конфузора и диффузора $h_1 = h_3 = 6,5$ мм и длиной цилиндрического перешейка $h_2 = 0,4$ мм. Методика расчета по причине ее громоздкости не приводится в данной работе.

Из данных табл. 4.7 видно, что давление, необходимое для преодоления сопротивления вязкому течению макаронного теста, зависит как от размеров вставки, так и от производительности (расхода теста) через канал. Один и тот же перепад давления может быть обеспечен за счет изменения длины вставки или радиуса ее внутренней полости.

Для проведения оценочных экспериментов была изготовлена конфузорно-диффузорная вставка типа трубки Вентури с конструктивными параметрами, приведенными в табл. 4.8.

На рис. 4.6 показан общий вид малого макаронного прессы МИТ-2 в момент проведения экспериментальных исследований при производстве лапши.

Конструктивные параметры конфузорно-диффузорной вставки

Наименование конструктивного параметра	Величина параметра, мм
Длина вставки общая H	18,0
Длина конфузора h_1	12,5
Длина диффузора h_3	5,0
Длина цилиндрического пояска h_2	0,5
Диаметр цилиндрического пояска $d_{ц}$	10,0
Диаметр конфузора максимальный d_k	22,0
Диаметр диффузора максимальный d_d	22,0
Диаметр наружный вставок D	23,0



Рис. 4.6. Проведение экспериментальных исследований на малом макаронном прессе МИТ-2

Экспериментально были исследованы вставки типа прямоточной и противоточной (обратной) трубок Вентури. Выходной поток лапши (полуфабрикатов) измерялся при работе пресса без конфузорно-диффузорных вставок и с ними.

В качестве сырья выбрана мука хлебопекарная высшего сорта М-54-28 (СТБ 1666–2006 «Мука пшеничная. Технические условия») [21] и вода, соответствующая СТБ 1188–99 «Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества» [22].

На одну загрузку использовали 8 кг муки. Количество воды рассчитывали исходя из влажности муки 12 % (по заранее определенному значению). Испытания проводились при следующих условиях: температура окружающей среды – (21 ± 1) °С; относительная влажность воздуха (72 ± 5) %; атмосферное давление 750–760 мм рт. ст.

Серия проведенных оценочных экспериментов показала, что длина лапши, полученная в колодцах с установленными специальными ставками, увеличилась в среднем на 25 % в сравнении с об-

разцами, полученными в матрицах без применения вставок, при одинаковых условиях прессования (частота вращения напорного шнека $n = 150$ об/мин) (рис. 4.7). Это свидетельствует о возможности повышения производительности технологического оборудования.

Согласно предварительным экспериментам влияние схем установки вставок (направление течения макаронного теста) в виде прямоточной или противоточной трубок Вентури менее существенно. В обоих случаях за счет дополнительного сопротивления вставок в соответствующих каналах скорость выхода экструдата уменьшалась на 5 %–8 %. Это способствовало выравниванию скоростей по плоскости матрицы и создавало возможности повышения общей скорости (производительности устройства) за счет увеличения числа оборотов напорного шнека при выравненном потоке скоростей.



Рис. 4.7. Образцы полученных при испытаниях макаронных изделий с использованием специальных вставок (слева) и без вставок (справа)

Анализ результатов предварительных (оценочных) экспериментов позволяет сделать вывод, что предложенные технические решения эффективны для совершенствования процесса формирования макаронных изделий и конструкции узла формирования, поскольку позволяют выравнивать гидравлическое сопротивление по площади матрицы и скорость выпрессовывания макаронных изделий и благодаря этому увеличить производительность. Предположительный механизм достижения комплекса полезных эффектов от применения вставок состоит в осуществлении более плавного перехода теста в формирующие отверстия фильеры с дополнительным его уплотнением, пластификацией и разогревом.

Оптимизация конструкции конфузорно-диффузорных вставок предполагает проведение комплекса дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на установление количественной взаимосвязи между конструктивно-технологическими параметрами канала вставок, а также показателями реологических свойств макаронного теста с сопротивлением вязкому течению для различных температурно-скоростных условий прессования.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ ТЕСТА НА ПРОЧНОСТЬ, ЖЕСТКОСТЬ И ПРОГИБ КРУГЛЫХ МАТРИЦ

5.1. Предварительные сведения. Матрицы сплошные и составные

Матрица является главным рабочим органом прессы в линии производства макаронных изделий, определяющим производительность, удельные энергозатраты, качество и процент отходов в виде концов. С целью повышения прочностных, теплотехнических и гидравлических характеристик матрицы было применено рациональное конструктивное решение – выполнение корпуса матрицы составным.

Производительность макаронного прессы МИТ-2, кг/ч, определяется путем замера массы отформованных макаронных изделий по формуле

$$\Pi = \frac{m_{\text{пол}}}{\tau_{\text{ф}}}, \quad (5.1)$$

где $m_{\text{пол}}$ – масса сформированных макаронных изделий (полуфабриката), поступающих из матрицы, кг;

$\tau_{\text{ф}}$ – время формования макаронных изделий, ч.

Удельная энергоёмкость процесса формования макаронных изделий на экспериментальном прессы определяется по выражению

$$N_{\text{уд}} = \frac{N}{\Pi}, \quad (5.2)$$

где N – общая потребляемая мощность, затрачиваемая на процесс формования макаронных изделий, кВт.

Важнейшим показателем качества, характеризующим прочность структуры сваренных макаронных изделий, являются потери сухого вещества, переходящие при варке изделий в варочную воду [85]:

$$m_{\text{с. в}} = \frac{(m_{\text{с. о}} - m_{\text{ч}}) V_1}{V_2 m_{\text{п}}} \frac{100}{100 - W_{\text{изд}}} 100, \quad (5.3)$$

где $m_{с.о}$ – масса чашки для выпаривания с сухим остатком, г;
 $m_{ч}$ – масса пустой чашки для выпаривания, г;
 V_1 – общий объем раствора варочной воды, см³;
 V_2 – объем раствора варочной воды, взятый на выпаривание, см³;
 $m_{п}$ – масса пробы макаронных изделий для анализа, г;
 $W_{изд}$ – влажность макаронных изделий, %.

Качественными показателями, оценивающими полученные макаронные изделия, являются цвет, вкус, запах, состояние поверхности, вид излома, влажность, кислотность изделий, массовая доля изделий с отклонениями от средней длины, время варки до готовности, сухое вещество, перешедшее при варке изделий в варочную воду, количество поглощенной воды, состояние изделий после варки, прочность, содержание лома, крошки, деформированных изделий, металлопримесей и наличие вредителей [73].

Чтобы определить наиболее важные факторы, влияющие на процесс формования макаронных изделий, была проанализирована обзорная информация об аналитических и экспериментальных исследованиях и проведена серия «отсеивающих экспериментов».

Факторами варьирования были выбраны следующие параметры:

- толщина пластины, мм;
- диаметр пластины, мм;
- нагрузка, равномерно распределенная по площади пластины, кг.

В качестве входных параметров выбраны величина прогиба f в центре корпуса матрицы и максимальный момент M_r .

5.2. Разработка, изготовление и наладка лабораторного экспериментального стенда. Программа и методика испытаний

Для подтверждения изложенных теоретических расчетов и установления влияния внутреннего давления теста на прочность, жесткость и прогиб круглых составных матриц новой конструкции был разработан, изготовлен и налажен лабораторный экспериментальный стенд. На рис. 5.1 представлена принципиально-конструктивная схема экспериментального стенда для исследования прогиба круглых пластин, нагруженных равномерно распределенным давлением P . Для измерения прогиба пластины использовались индикаторы часового типа ИЧ-10МН, расположенные под пластиной согласно точкам замера 1_x , 2_x , 3_x , 4_x и 5_x .

Индикаторы часового типа ИЧ-10МН – датчики уровня, предназначенные для измерения линейных размеров абсолютным и относительным методами, определения величины отклонения от заданной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей (прогиба).

Технические характеристики:

- цена деления: 0,01 мм;
- диапазон измерения: 0–10 мм;
- класс точности: 0,1;
- наибольшее измерительное усилие при прямом ходе: 1,5 Н;
- колебания измерительного усилия при изменении направления движения измерительного стержня: 0,5 Н.

На рис. 5.2 представлен общий вид экспериментального стенда. Опыты проводились на пластинах сплошных и составных толщиной 2, 3 и 4 мм при наружном диаметре $D = 300$ мм и нагрузке 5, 10, 15, 20 и 25 кг.

В соответствии с целями и задачами экспериментальных исследований для определения оптимальных технологических параметров по влиянию давления теста на прочность, жесткость и прогиб корпуса матрицы был спланирован и проведен многофакторный эксперимент по плану 2^3 со звездой.

Применение оптимального плана эксперимента позволило сократить число необходимых опытов и повысило точность обработки. В данном случае для трех независимых факторов по плану 2^3 со звездой было проведено шестнадцать опытов, где факторы варьируются на трех уровнях [6, 18, 20, 101]. В таблице представлена матрица планирования экспериментальных исследований.

Целью математического планирования эксперимента был также поиск экстремальных значений исследуемых зависимостей с наименьшей затратой средств и времени.

Развитие компьютерных технологий позволило провести планирование и обработку экспериментальных данных при помощи специализированных компьютерных программ математической статистики и графического предоставления данных. Такие программы позволяют автоматизировать основные операции, связанные с обработкой и проведением экспериментальных исследований: планирование эксперимента, анализ вариаций (дисперсионный анализ), анализ временных рядов, дескриптивная (описательная) статистика,

контроль качества, многомерный анализ, непараметрический анализ, подбор распределений, прогнозирование, разведочный анализ, регрессивный анализ и т. д. [92, 99, 100].

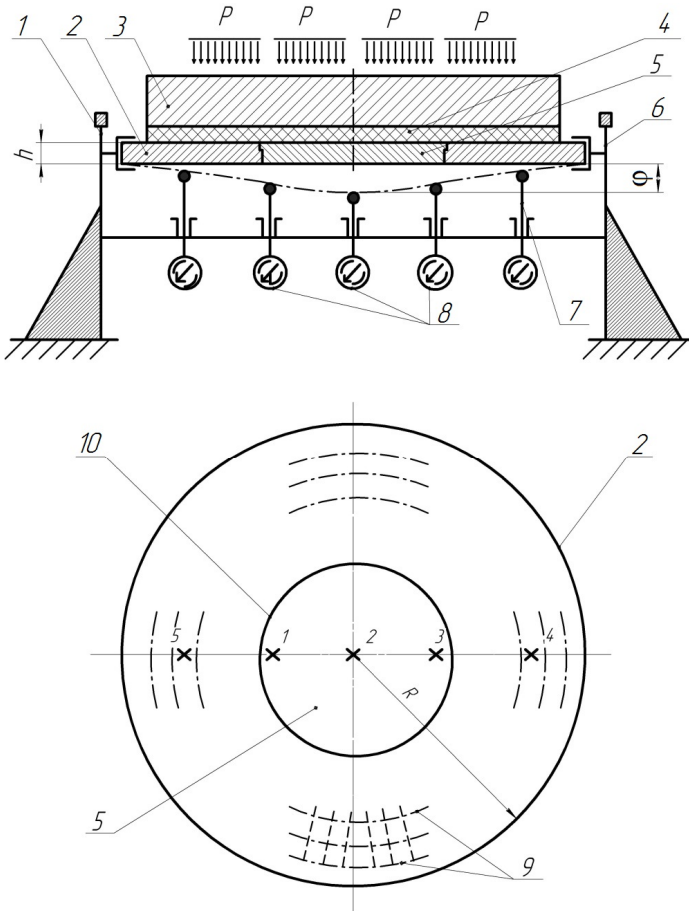


Рис. 5.1. Принципиально-конструктивная схема экспериментального стенда для исследования прогиба круглых пластин, нагруженных равномерно распределенным давлением P :
 1 – опора; 2 – пластина (кольцевая часть); 3 – нагрузка; 4 – устройство демпферное;
 5 – центральная часть пластины; 6 – стойка; 7 – стержень удлинительный;
 8 – датчик уровня ИЧ-10МН; 9 – отверстия; 10 – зазор сквозной ступенчатый;
 R – радиус пластины; h – толщина пластины; f – величина прогиба;
 $1_x, 2_x, 3_x, 4_x$ и 5_x – точки замера прогиба пластины

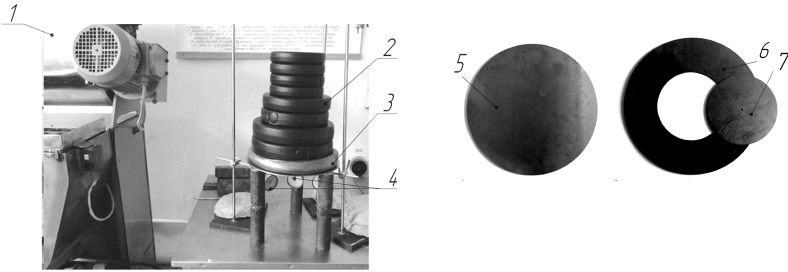


Рис. 5.2. Общий вид экспериментального стенда:

- 1 – пресс-автомат МИТ-2 ТУ РБ 200167377.002–2001;
 2 – равномерно распределенное давление; 3 – прокладка демпферная;
 4 – индикаторы часового типа ИЧ-10МН; 5 – пластина сплошная; 6 – кольцевая часть пластины составной; 7 – центральный вкладыш пластины составной

Таблица

Матрица планирования экспериментальных исследований

Номер опыта	Входные параметры			Выходные параметры	
	Толщина h , мм	Диаметр D , мм	Нагрузка P , кг	Максимальные моменты M_r , Н·м	Прогиб f , мм
1	h_2	D_2	P_{\min}	M_{r1}	f_1
2	h_3	D_1	P_1	M_{r2}	f_2
3	h_1	D_1	P_1	M_{r3}	f_3
4	h_1	D_1	P_3	M_{r4}	f_4
5	h_3	D_1	P_3	M_{r5}	f_5
6	h_2	D_2	P_2	M_{r6}	f_6
7	h_2	D_{\max}	P_2	M_{r7}	f_7
8	h_2	D_{\min}	P_2	M_{r8}	f_8
9	h_1	D_3	P_1	M_{r9}	f_9
10	h_{\min}	D_2	P_2	M_{r10}	f_{10}
11	h_2	D_2	P_{\max}	M_{r11}	f_{11}
12	h_3	D_3	P_1	M_{r12}	f_{12}
13	h_2	D_2	P_2	M_{r13}	f_{13}
14	h_{\max}	D_3	P_3	M_{r14}	f_{14}
15	h_3	D_3	P_3	M_{r15}	f_{15}
16	h_3	D_3	P_3	M_{r16}	f_{16}

Круглые пластины были изготовлены из хромистой стали марок 2Ч13 и 3Ч13 (ГОСТ 5949–75), наружный диаметр пластины менялся от 50, 100, 150, 200, 250 до 300 мм, толщина пластины составляла

2, 3 и 4 мм. Были подготовлены два варианта круглых пластин – сплошные и составные. В качестве нагрузки использовались гири массой 5, 10, 15, 20 и 25 кг.

5.3. Результаты экспериментальных исследований. Анализ, обработка и обобщение результатов экспериментальных исследований

После обработки результатов эксперимента получены графики зависимости прогиба центра пластины от конструктивных параметров пластины (толщина и диаметр) и нагрузки P для двух вариантов пластин – сплошных и составных.

На рис. 5.3 представлена экспериментальная зависимость прогиба пластины толщиной 2 мм в двух вариантах – сплошная и составная.

Прогиб сплошной пластины имеет линейный характер (рис. 5.3) и описывается уравнением

$$f_{\text{спл}} = 0,53P - 0,2,$$

а прогиб составной пластины определяется по формуле

$$f_{\text{сост}} = 0,064P.$$

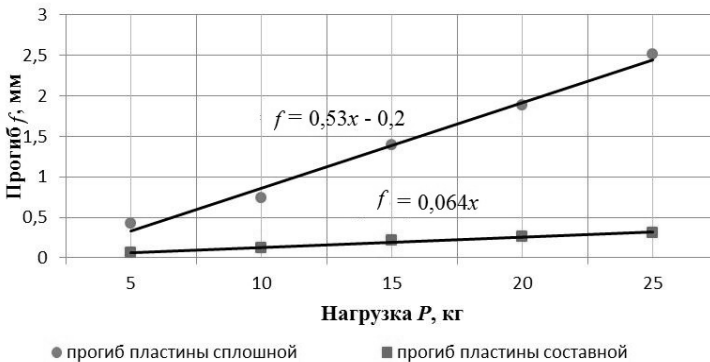


Рис. 5.3. Экспериментальная зависимость прогиба пластины толщиной 2 мм от величины давления P

При максимальной нагрузке прогиб сплошной пластины доходит до 2,5 мм, а составной – до 0,25 мм. Отсюда следует, что наличие

зазора в составной пластине имеет явный положительный эффект и приводит к уменьшению величины прогиба почти в 10 раз.

Аналогичная картина имеет место при испытании пластин толщиной 3 мм (рис. 5.4).

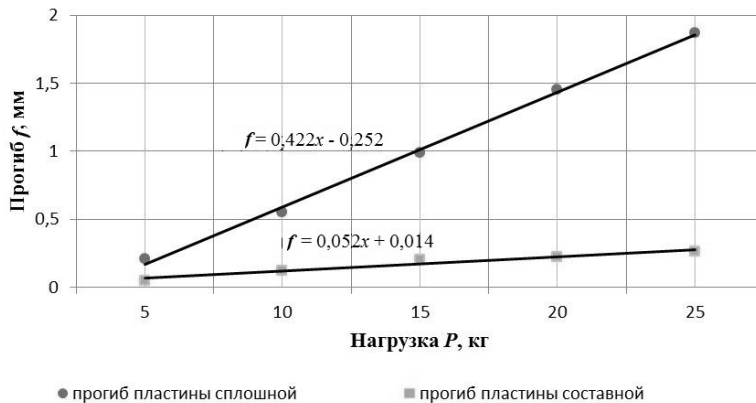


Рис. 5.4. Экспериментальная зависимость прогиба пластины толщиной 3 мм от величины давления P

Анализ графиков на рис. 5.4 показывает, что с увеличением толщины прогиб в пластинах уменьшается до 2 мм в сплошной и до 0,2 мм – в составной и описывается соответственно уравнениями:

$$f_{\text{спл}} = 0,422P - 0,252 ;$$

$$f_{\text{сост}} = 0,052P + 0,014 .$$

Испытания пластин толщиной 4 мм выявили аналогичную зависимость (рис. 5.5).

Из графиков на рис. 5.5 следует, что прогиб сплошной пластины при максимальной нагрузке доходит до 1,3 мм, а прогиб составной пластины – до $\approx 0,13$ мм и подчиняется уравнениям:

$$f_{\text{спл}} = 0,279P - 0,189 ;$$

$$f_{\text{сост}} = 0,025P + 0,017 .$$

Графики на рис. 5.3–5.5 подтверждают изложенную теорию.



Рис. 5.5. Экспериментальная зависимость прогиба пластины толщиной 4 мм от величины давления P

С учетом полученных экспериментальных данных, их анализа, систематизации и обобщения получены новые формулы для определения максимальных изгибающих моментов M_r и величины прогиба f в центре корпуса составных матриц в зависимости от нагрузки P , МПа, и радиуса R , м:

$$M_r = 6,25 \cdot 10^{-2} \cdot P \frac{R^2}{n} (3 + \mu), \quad (5.4)$$

где n – число составных частей;

$$f = 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot P \frac{R^4}{Dn}, \quad (5.5)$$

где D – цилиндрическая жесткость корпуса матрицы, Н·м, которая определяется по уравнению

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}. \quad (5.6)$$

Для практических расчетов можно принять $n = 2$ или $n = 3$. Количество составных частей определяется числом сквозных ступенчатых зазоров: при одном зазоре $n = 2$, при двух зазорах $n = 3$.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕСТА НА ПРОГИБ СОСТАВНЫХ КРУГЛЫХ МАТРИЦ

6.1. Предварительные сведения. Трехмерная модель составной матрицы

Традиционные режимы замеса и резания технологического полуфабриката допускают повышение температуры теста перед матрицей до 50 °С–55 °С, т. к. при больших температурах происходят денатурация белковых веществ, потери связующих свойств клейковины, а следовательно, ослабление структуры макаронных изделий. Однако денатурация белка, связанная с деструкцией белковых молекул, происходит в большей степени за счет механического трения шнека об уплотненную тестовую массу и интенсивного смещения внутренних слоев теста, т. е. в результате его перетирания. Поэтому были проведены исследования возможностей использования высокотемпературных режимов замеса (ВТРЗ) макаронного теста.

Нагрев макаронного теста перед его уплотнением в шнековой камере прессы увеличивает пластичность и текучесть теста, вследствие чего растет скорость выпрессовывания изделий, т. е. производительность прессы. Это характерно и для температур, превышающих 50 °С–55 °С, которые ранее считались оптимальными для достижения наибольшей производительности шнекового прессы. Однако при температуре замеса теста выше 65 °С–70 °С наблюдается заметное снижение варочных свойств макаронных изделий в результате ослабления клейковинной массы структуры изделий. Поэтому оптимальной, по мнению Г. М. Медведева, температурой макаронного теста после замеса на шнековых прессах является температура около 60 °С, с тем чтобы перед матрицей она составила не более 65 °С с учетом прироста температуры теста в шнековой камере при таких условиях замеса примерно на 5 °С. Такой режим называется высокотемпературным.

Высокотемпературный режим замеса макаронного теста наряду с сохранением нормального качества изделий дает следующие преимущества по сравнению с традиционным низкотемпературным:

- на 10 %–15 % увеличивается производительность прессы;
- предотвращается выпрессовывание белесых изделий вследствие повышения пластичности теста;

– не требуется расхода воды на охлаждение шнековой камеры, сокращается продолжительность сушки изделия;

– улучшается цвет изделий в результате частичной тепловой инактивации фермента полифенолоксидазы.

При прохождении полуфабриката через матрицу без тефлоновых вкладышей минимальные потери сухих веществ установлены при температуре матрицы 110 °С–120 °С, т. к. изделия имеют абсолютно гладкую поверхность. В целом увеличение температуры матрицы с 45 °С–50 °С до 100 °С–110 °С снижает продолжительность варки изделия до готовности с 8–9 до 6–7 мин и увеличивает прочность сваренных изделий на срез с 60–80 до 100–120 кПа.

Вместе с тем при переходе на высокотемпературный режим формирования и нагрева матрицы до 110 °С–120 °С ее корпус подвергается значительным температурным деформациям, которые проявляются, прежде всего, в прогибе (выпучивании) срединной рабочей поверхности (до 5 мм), что увеличивает процент отходов в виде концов.

Рассмотрим основы теории упругости применительно к матрицам новой конструкции для производства макаронных изделий. На рис. 6.1 представлена трехмерная модель составной матрицы в разобранном виде.

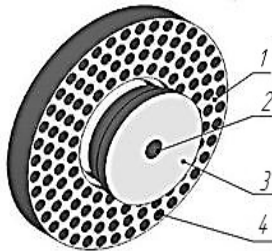


Рис. 6.1. Трехмерная модель составной матрицы:
1 – корпус матрицы; 2 – отверстие центральное;
3 – основание матрицы; 4 – колодцы формирующие

Составная матрица состоит из двух частей (см. рис. 6.1): большей, имеющей вид кольца, и меньшей, выполненной в виде круглого основания. Меньшая часть устанавливается внутри большей со сквозным ступенчатым зазором, а колодцы с формирующими механизмами расположены только на большей, кольцевой части и распределены по концентрическим окружностям.

Для установления влияния температуры теста на прочность, жесткость и прогиб составной матрицы воспользуемся допущениями теории упругости и заменим корпус матрицы круглой пластиной.

6.2. Экспериментальные исследования температурных напряжений в круглых матрицах и обсуждение их результатов

Для подтверждения теории, изложенной в главе II, был разработан, изготовлен и налажен экспериментальный стенд, установленный в научно-исследовательской лаборатории кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции. На рис. 6.2 представлена принципиально-конструктивная схема экспериментального стенда для исследования температурных деформаций опытных образцов круглых пластин.

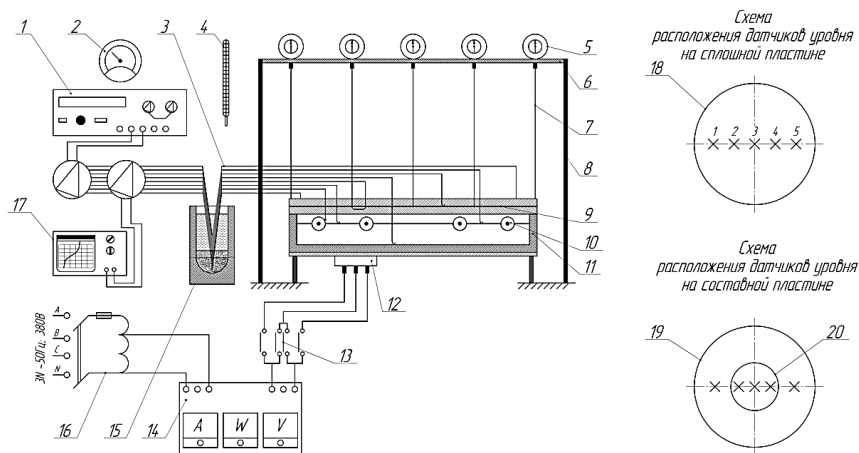


Рис. 6.2. Схема экспериментального стенда

для исследования температурных деформаций круглых пластин:

- 1 – милливольтметр Щ-31; 2 – барометр; 3 – термопары; 4 – термометр;
- 5 – датчик уровня ИЧ-10МК; 6, 11 – изоляция тепловая; 7 – стержень удлинительный;
- 8 – опора; 9 – рабочая поверхность электроконфорки; 10 – элемент нагревательный;
- 12 – колодка клеммная; 13 – переключатель пакетный; 14 – комплект приборов К-505;
- 15 – сосуд Дьюара; 16 – трансформатор; 17 – потенциометр электронный КСН-4;
- 18 – пластина круглая сплошная; 19 – пластина круглая составная;
- 20 – зазор температурный

Основу стенда составляет нагревательное устройство, в качестве которого использована электроконфорка – нагревательная плита

ЛАБ-ПН-01 с рабочей поверхностью из алюминиевого сплава, предназначенная для безопасного нагрева опытных образцов круглых пластин. Данный тип плиты обеспечивает равномерное распределение температуры по всей рабочей поверхности, при этом нагревательный элемент изолирован и позволяет быстро разогревать платформу до 400 °С, а электронный терморегулятор поддерживает температуру рабочей поверхности с точностью до ± 5 °С.

Технические характеристики нагревательной плиты ЛАБ-ПН-01:

- максимальная температура нагрева: 400 °С;
- разница температур по платформе, не более: ± 5 °С;
- размеры нагревательной платформы: 430×310 мм;
- размеры лотка (для ЛАБ-ПН-01 Б): 430×310×50 мм;
- потребляемая мощность: 2600 Вт;
- материал платформы: алюминий;
- габаритные размеры (без лотка): 470×460×130 мм;
- масса: 15 кг.

Над рабочей поверхностью электроконфорки через удлинительные стержни установлены датчики уровня ИЧ-10МК часового типа, предназначенные для измерения линейных размеров абсолютным и относительным методами, определения величины отклонений от заданной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей (коробления).

Для измерения температуры рабочей поверхности плиты был использован прибор АКИП-9303 – инфракрасный (ИК) бесконтактный радиационный термометр для промышленного и бытового применения (пирометр). Данный тип прибора широко применяется в пищевой индустрии для оценки термических процессов.

Для наведения на объект в приборе применяется одноточечный лазерный целеуказатель.

С помощью прибора АКИП-9303 можно бесконтактно измерять температуру объекта до +535 °С при базовой погрешности ± 2 % и отображении результата в °С/°R.

Одновременно температура плитного настила контролировалась термопарами с клеммной головкой типа ТХА-1199/15 с диаметром горячего спая 1,5 мм при длине монтажной части 800–1000 мм.

На рис. 6.3 показан общий вид экспериментального стенда. В качестве опытных образцов использованы круглые пластины толщиной 2,3 и 4 мм и диаметром 100, 200 и 300 мм в двух вариантах: сплошные и разрезные (составные), изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–72).

Цель проведения экспериментальных исследований – определить влияние температурных зазоров на величину коробления (прогиба) поверхности пластины.

На рис. 6.4 представлены обобщенные данные по экспериментальному нагреву сплошной пластины 2, 3 и 4 мм при наружном диаметре $D = 300$ мм.

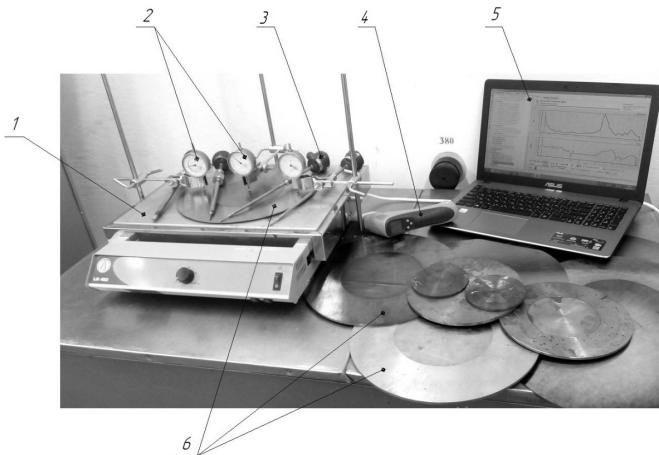


Рис. 6.3. Общий вид экспериментального стенда:

1 – элементы нагревательные (плита электрическая типа ЛАБ-ПН-01); 2 – индикаторы часового типа ИЧ-10МК; 3 – термопара ТХА-1199/15; 4 – измеритель температуры АК ИП-9303; 5 – компьютер ASUS-X550C; 6 – пластины (опытные образцы)

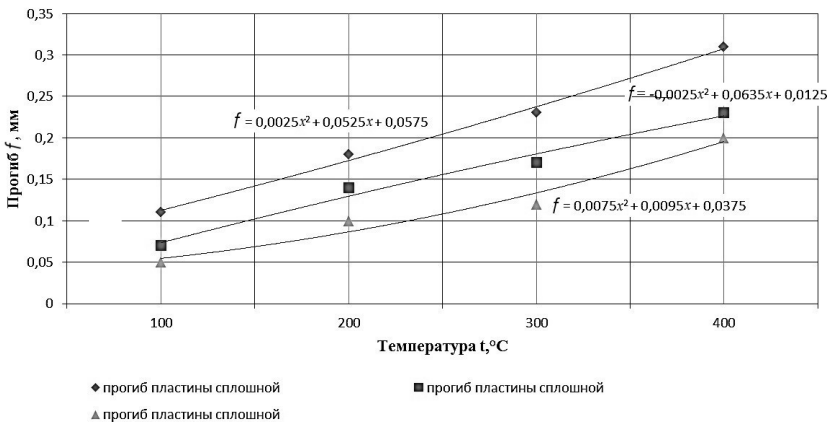


Рис. 6.4. Экспериментальная зависимость прогиба сплошной пластины от степени нагрева

Обработка, обобщение и систематизация экспериментальных данных выявила следующие закономерности.

Из графиков (см. рис. 6.4) следует, что с увеличением толщины пластины прогиб ее срединной поверхности от воздействия температуры уменьшается:

– при толщине пластины 2 мм с увеличением температуры нагрева конфорки от 100 °С до 400 °С ее прогиб изменяется с 0,12 до 0,31 мм;

– при толщине пластины 3 мм и росте температуры от 100 °С до 400 °С прогиб изменяется от 0,054 до 0,250 мм;

– при толщине пластины 4 мм и увеличении температуры от 100 °С до 400 °С прогиб изменяется от 0,05 до 0,18 мм.

Характер графиков описывается полиномиальной зависимостью:

– при толщине сплошной пластины 2 мм:

$$f_{\text{спл}} = 0,0025t^2 + 0,0525t + 0,0575;$$

– при толщине сплошной пластины 3 мм:

$$f_{\text{спл}} = 0,0025t^2 + 0,0635t + 0,0125;$$

– при толщине сплошной пластины 4 мм:

$$f_{\text{спл}} = 0,0075t^2 + 0,0095t + 0,0375.$$

Одновременно были проведены экспериментальные исследования составных пластин с наружным диаметром $D = 300$ мм и толщиной 2,3 и 4 мм. На рис. 6.5 представлены графические обобщенные данные по нагреву составных пластин.

Из рис. 6.5 следует, что составные пластины благодаря наличию температурного концентрического зазора подвержены значительно меньшим тепловым деформациям. Характер кривых более точно описывается полиномиальной зависимостью:

– при толщине составной пластины 2 мм:

$$f_{\text{сост}} = 0,015t^2 + 0,131t - 0,025;$$

– при толщине составной пластины 3 мм:

$$f_{\text{сост}} = 0,0025t^2 + 0,0365t - 0,0025;$$

– при толщине составной пластины 4 мм:

$$f_{\text{сост}} = 0,005t^2 + 0,047t - 0,04.$$

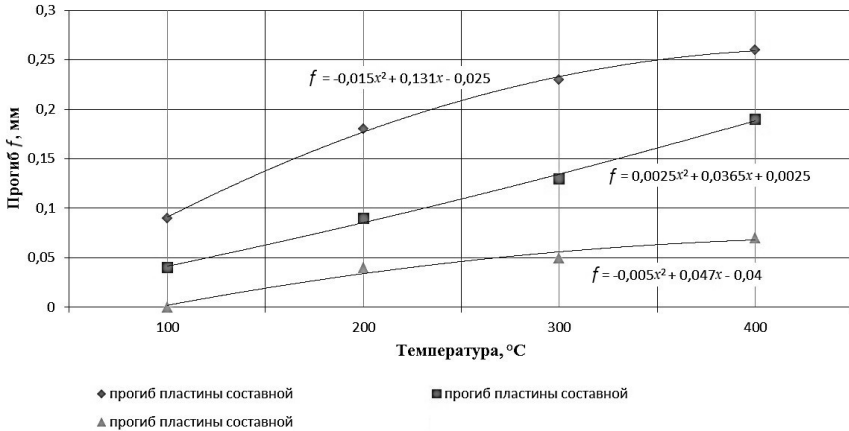


Рис. 6.5. Экспериментальная зависимость прогиба составных пластины от степени нагрева

Сравнение и анализ экспериментальных данных показывают, что наличие зазора снижает прогиб составных пластин:

- при толщине 2 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,31 до 0,26 мм;
- при толщине 3 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,28 до 0,18 мм;
- при толщине 4 мм и температуре нагрева 400 °C с 0,180 до 0,054 мм.

Таким образом, экспериментальным путем установлено положительное влияние температурного зазора на снижение тепловых деформаций в пластинах, в частности на снижение величины коробления – прогиба срединной поверхности.

7. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МАТРИЦ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

На основе проделанной работы и собранного материала впервые составлена современная классификация промышленных матриц для производства макаронных изделий.

1. Матрицы сплошные отечественные

Расчетное давление прессования: 7–9 МПа (пусковое – 10–14 МПа).

Общее количество отверстий (матрица диаметром 298 мм), шт.:

– количество дисковых вставок: 102–120;

– количество отверстий в каждой вставке: 2–55;

– количество формующих отверстий в матрице: 212–600.

По габаритным размерам, мм:

Размеры	Круглая матрица	Прямоугольная (тубусная) матрица
Диаметр	298, 350	–
Длина	–	955
Ширина	–	100
Высота	22, 28, 60	35–50

По конструктивному оформлению:

– матрицы без вкладышей;

– матрицы с вкладышами.

По расположению колодцев на рабочей поверхности круглых матриц:

– по вершинам равносторонних треугольников;

– по вершинам квадратов;

– по квадратам.

По технологическим требованиям:

М – макароны; Л – лапша;

Р – рожки; Ф – фигурные изделия.

В – вермишель;

По видам формующих отверстий:

– отверстия без вкладышей;

– щелевые;

– кольцевые:

одно для формования вермишели;

два для формования лапши;

два для формования изделий типа «ерш»;

три для формования тестовой ленты.

По материалу изготовления:

– матрицы:

латунь ЛС59-1 (ГОСТ 15527–70);

твердая фосфористая бронза БрАЖ9-4 (ГОСТ 1628–78);

нержавеющая сталь 1Х118Н9Т (ГОСТ 5949–75);

хромистая сталь 2Х13 и 3Х13 (ГОСТ 5949–75);

– колосники – углеродистая сталь Ст5 и Ст3 (ГОСТ 380–88).

– ребра колосников – конструкционная сталь 45 (ГОСТ 1050–88).

2. Матрицы сплошные зарубежные

Производители: итальянские фирмы Niccolai Trafile S.r.l., Landucci S.r.l., Montoni Trafile – Pavan S.p.A., Capitano Camillo & C. S.a.s.

Расчетное давление прессования: 8–15 МПа.

Расположение колодцев (формирующих отверстий): по концентрическим окружностям.

По габаритным размерам, мм:

Размеры	Круглая матрица	Прямоугольная (тубусная) матрица
Диаметр	520, 610	–
Длина	–	2400
Ширина	–	1200
Высота	110, 140	450

3. Матрицы составные

Формующие механизмы составной матрицы расположены по концентрической окружности (рис. 7.1).

В зависимости от конструктивного оформления различают составные матрицы:

– с одним температурным зазором (рис. 7.2);

– с двумя температурными зазорами;

– с температурными зазорами и тепловыми ребрами;

– биметаллические: большая часть изготовлена из твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4, а меньшая, например, из менее дефицитной хромистой стали 2Х13 или 3Х13 (ГОСТ 5942–75).

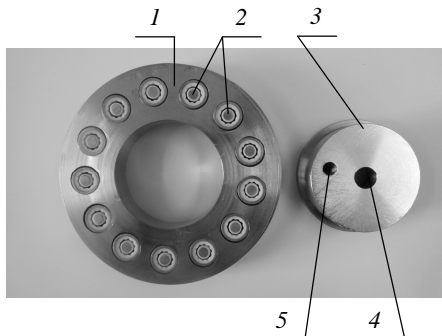


Рис. 7.1. Общий вид составной матрицы в разобранном состоянии:
 1 – большая (кольцевая) часть матрицы; 2 – механизмы формующие;
 3 – меньшая (центральная) часть матрицы; 4 – гнездо для датчика температуры;
 5 – отверстие под вал шнека

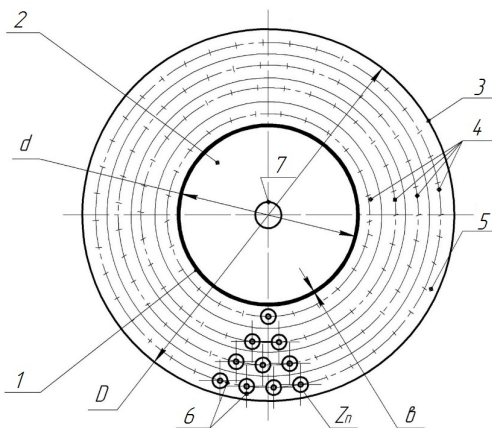


Рис. 7.2. Принципиально-конструктивная схема составной матрицы с одним температурным зазором:
 1 – зазор сквозной температурный;
 2 – меньшая (центральная) часть матрицы; 3 – корпус матрицы;
 4 – окружности концентрические; 5 – большая (кольцевая) часть матрицы;
 6 – отверстия формующие (колодцы); 7 – отверстие центральное;
 d – диаметр вкладыша центрального; D – наружный диаметр корпуса;
 b – ширина зазора температурного

8. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РЕЖУЩЕГО МЕХАНИЗМА МАКАРОННОГО ПРЕССА НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗАНИЯ

Резание может быть осуществлено при относительном перемещении режущего инструмента и продукта и в зависимости от направления этого перемещения. Резание принято подразделять на рубящее и скользящее [1, 2].

При *рубящем* резании лезвие ножа, перемещаясь перпендикулярно режущей кромке, деформирует продукт и уплотняет его поверхностный слой, в котором возникают контактные напряжения, имеющие максимальное значение в зоне контакта с острой кромкой ножа.

В отличие от рубящего резания, при *скользящем* требуются меньшие уплотнение и усилие, т. к. перерезание продукта осуществляется отдельными микрорубчиками, причем суммарная длина микрорубчиков, одновременно участвующих в резании продукта, всегда меньше длины режущей кромки лезвия. По этой причине при скользящем резании величина контактных напряжений, необходимая для резания продукта, а следовательно, и требующая усилия, значительно меньше, чем при рубящем резании. Поверхности среза при скользящем резании получаются более гладкими и ровными, т. к. продукт подвержен меньшему силовому воздействию со стороны режущего инструмента. Скользящее резание целесообразно применять при резании пластичных продуктов с невысокой механической прочностью, продукт при этом значительно меньше деформируется. Сочные продукты не теряют сока, а их ломтики не разваливаются [3, 4].

Однако, как показывает опыт изучения технологии производства макаронных изделий, в макаронных прессах отечественного и зарубежного производства работа режущего механизма для отрезания отформованных полуфабрикатов основана на теории рубящего резания – макаронные прессы ЛПЛ-2М, ЛПЛ-1М, ЛМБ, ЛПШ-500, ЛПШ-750, ЛПШ-1000, швейцарский макаронный пресс ТРХО (210/520, 210/600, 2×210/520 и 2×2210/600). Рубящее резание (отрезание) применяется в современных пресс-автоматах РТ-ПМ-21, РТ-ПМ-21-01, РТ-ПМ-31, а также в пресс-автомате МИТ-2 (Барановичи). Неравномерная скорость прессования в сочетании с методом рубящего резания приводит к увеличению количества отходов

в виде обрезков и в конечном счете – к снижению производительности. Количество отходов по указанной причине на макаронных прессах достигает 20 %, а качество отрезанных полуфабрикатов не отвечает технологическим требованиям.

Кроме того, в учебной и научно-технической литературе до настоящего времени отсутствуют данные о взаимосвязи геометрических и конструктивных параметров трущейся пары «нож–матрица», что не позволяет оптимизировать процесс резания.

С целью получения гладкой и ровной поверхности среза и уменьшения отходов режущий механизм макаронных прессов должен работать на основе теории скользящего резания трущейся пары «нож–матрица». Его геометрические характеристики должны быть максимально взаимосвязаны с конструктивными параметрами матрицы [5–7].

Скорость v любой точки ножа относительно продукта может быть представлена суммой двух скоростей: v_n , направленной по нормали к режущей кромке лезвия, и v_τ , направленной по касательной к ней [8, 9]. Абсолютная величина скорости

$$v = \sqrt{v_n^2 + v_\tau^2}. \quad (8.1)$$

Угол β , заключенный между нормалью к режущей кромке и скоростью относительно продукта, называется углом скольжения. Тангенс угла скольжения называется коэффициентом скольжения K_β , который численно равен отношению касательной скорости v_τ к нормальной v_n :

$$K_\beta = \operatorname{tg} \beta = \frac{v_\tau}{v_n}. \quad (8.2)$$

С увеличением коэффициента скольжения K_β улучшается и качество нарезанного продукта: кусочки меньше деформируются, имеют более чистую поверхность среза. При скользящем резании сопротивление перерезанию волокон и стенок клеток продукта уменьшается с возрастанием угла скольжения.

Коэффициент скольжения может принимать численные значения от нуля до ∞ . При $K_\beta = 0$ имеет место рубящее резание, при $K_\beta = \infty$ режущий инструмент совершает скользящее движение вдоль продукта, не разрезая его.

При скользящем резании с увеличением коэффициента скольжения K_β величина общего усилия, действующая на инструмент, а также нормальная составляющая этого усилия, от которых в большей степени зависит деформация продукта при резании, уменьшаются, что способствует более качественному отрезанию отформованных полуфабрикатов:

$$\begin{aligned} v_\tau &= \omega r \sin \beta; \\ v_n &= \omega r \cos \beta. \end{aligned} \quad (8.3)$$

При использовании вращающегося ножа с прямолинейной кромкой лезвия, расположенной под углом к радиусу, минимальная скорость v произвольной точки А равна $v = \omega r$ и направлена перпендикулярно к радиусу. Здесь ω – угловая скорость ножа.

Рассмотрим изменение K_β по длине прямолинейного лезвия (рис. 8.1).

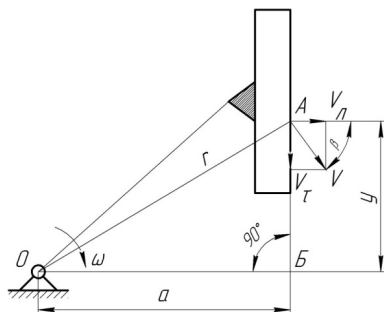


Рис. 8.1. Схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия

Согласно рис. 8.1 коэффициент скольжения

$$K_\beta = \frac{v_\tau}{v_n} = \operatorname{tg} \beta = \frac{a}{y}, \quad (8.4)$$

где a – наименьшее расстояние от центра вращения до режущей кромки лезвия или ее продолжение, м;

y – расстояние от рассматриваемой точки А до пересечения режущей кромки с перпендикуляром, опущенным на нее из центра вращения, м.

При постоянном значении a коэффициент скольжения K_β изменяется по длине лезвия в зависимости от расстояния y по закону гиперболы. В точке Б ($y = 0$) нормальная составляющая скорости $v_n = 0$, $K_\beta = \infty$, т. е. резания не будет. При увеличении y коэффициент K_β уменьшается. При $y = \text{const}$ коэффициент K_β возрастает с увеличением a . Если $a = 0$, значит режущая кромка лезвия совпадает с радиусом. Если $K_\beta = 0$, значит осуществляется рубящее резание. Для качественной нарезки пищевых продуктов необходимо, чтобы K_β по длине лезвия был постоянным или мало изменялся. С учетом изложенной теории предпосылок определим коэффициент скольжения трущейся пары «нож–матрица» макаронного пресса.

Коэффициент скольжения трущейся пары «нож–матрица»

Построение математической модели. При скользящем резании сопротивление перерезанию волокон и стенок клеток продукта уменьшается с возрастанием угла скольжения или, что то же самое, с увеличением коэффициента скольжения и длины режущей кромки лезвия. Поэтому в системе «нож–матрица» необходимо учитывать не только законы скользящего резания, но и максимальную длину режущей кромки лезвия. На рис. 8.2 представлена схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия в трущейся паре «нож–матрица».

Как видно из рис. 8.2, коэффициент скольжения K_β определяется по формуле

$$K_\beta = \frac{V_r}{V_n} = \text{tg}\beta \frac{a}{y}. \quad (8.5)$$

Режущая кромка лезвия 4 вращающегося ножа 3 проходит по касательной $C-C$ к внутренней окружности $R_{\text{вн}}$. В этом случае длина l режущей кромки лезвия 4 будет максимальной, а коэффициент скольжения K_β – наибольшим.

При увеличении y коэффициент скольжения K_β уменьшается. При $y = \text{const}$ коэффициент K_β возрастает с увеличением a . Если $a = 0$ и $K_\beta = 0$, имеет место рубящее резание.

Таким образом, режущая кромка лезвия, наклоненная по касательной $C-C$ к внутренней окружности $R_{\text{вн}}$ матрицы, позволяет получить наибольшую длину l лезвия 4 и, как следствие, создать наилучшие условия для скользящего резания и процесса измельчения в целом.

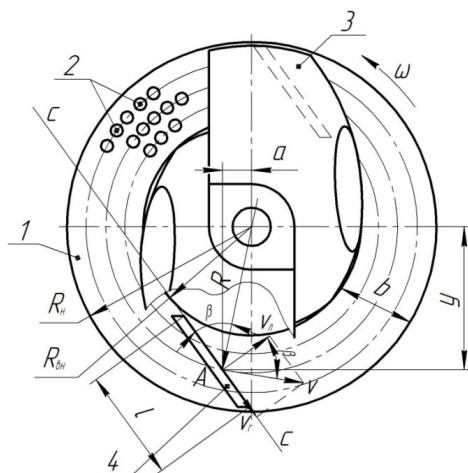


Рис. 8.2. Схема определения коэффициента скольжения по длине прямолинейного лезвия:

1 – матрица; 2 – отверстия перфорации; 3 – нож вращающийся; 4 – лезвие ножа; l – длина режущей кромки лезвия; R_n – наружный радиус матрицы; $R_{вн}$ – внутренний радиус матрицы; $C-C$ – касательная к внутренней окружности $R_{вн}$; V – линейная скорость произвольной точки A ; V_n, V_r – нормальная и касательная составляющие линейной скорости V ; β – угол скольжения; a, y – координаты точки A ; R – радиус вращения точки A ; b – ширина рабочей поверхности матрицы; ω – угловая скорость ножа

Определение оптимальной длины режущей кромки лезвия ножа.

С увеличением коэффициента скольжения K_β суммарная сила сопротивления перерезанию продукта P и ее нормальная составляющая P_n уменьшаются, что и приводит к снижению энергозатрат на процесс измельчения.

Нормальная P_n и касательная P_τ составляющие сопротивления перерезанию P (рис. 8.3) определяются по формулам:

$$P_n = P \cos \beta = ql \cos^2 \beta; \quad (8.6)$$

$$P_\tau = P \sin \beta = ql \sin \beta \cos \beta, \quad (8.7)$$

где q – удельное сопротивление продукта на единицу длины лезвия, Н·м;

l – длина режущей кромки лезвия ножа, участвующая в отрезании слоя продукта, м.

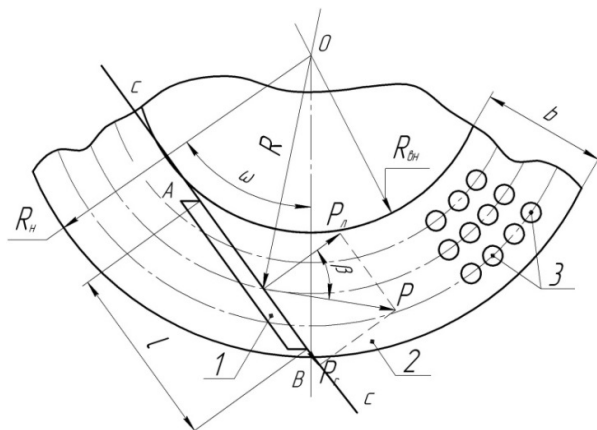


Рис. 8.3. Схема определения оптимальной длины режущей кромки лезвия ножа:
 1 – лезвие ножа; 2 – матрица; 3 – отверстия перфорации;
 l – длина режущей кромки лезвия; P – сила сопротивления
 перерезанию продукта; P_n – нормальная составляющая силы P ;
 P_τ – касательная составляющая силы P ; β – угол скольжения

Сопротивление перерезанию P и его составляющие P_n и P_τ в зависимости от коэффициента скольжения K_β имеют вид:

$$P = ql \frac{1}{\sqrt{1 + K_\beta^2}}; \quad (8.8)$$

$$P_n = ql \frac{1}{1 + K_\beta^2}; \quad (8.9)$$

$$P_\tau = ql \frac{K_\beta}{1 + K_\beta^2}. \quad (8.10)$$

Согласно рис. 8.3 определяем оптимальную длину режущей кромки лезвия ножа. Касательная, проведенная к окружности, является перпендикуляром к радиусу вращения, опущенному в точку касания окружности и касательной. Следовательно, треугольник OAB – прямоугольный (рис. 8.3).

По теореме Пифагора $AB = \sqrt{OB^2 - OA^2}$, где $AB = l$ – длина прямолинейной режущей кромки лезвия ножа; $OA = R_{\text{вн}}$ – внутренний

радиус рабочей поверхности матрицы; $OB = R_n$ – наружный радиус рабочей поверхности матрицы.

$$\text{Значит, } l = \sqrt{R_n^2 - R_{вн}^2} = \sqrt{(R_{вн} + b)^2 - R_{вн}^2} = \sqrt{b(2R_{вн} + b)}.$$

Таким образом:

$$l = \sqrt{b(2R_{вн} + b)}. \quad (8.11)$$

Данная формула позволяет увидеть взаимосвязь геометрических и конструктивных параметров трущейся пары «нож–матрица».

Оценка эффективности скользящего резания. Графики зависимости формул (8.8–8.10) представлены на рис. 8.4.

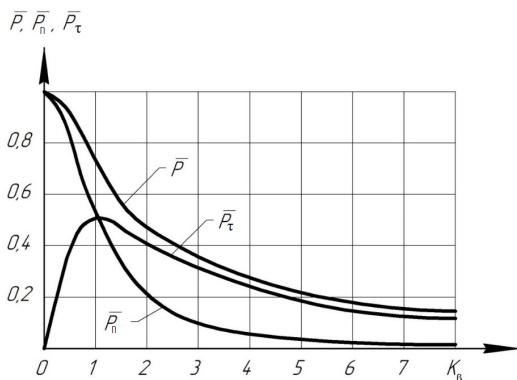


Рис. 8.4. Графики зависимости сопротивления перерезанию от коэффициента скольжения при скользящем резании

Из формул (8.5), (8.8–8.10) и рис. 8.4 следует, что с увеличением коэффициента скольжения K_β суммарная сила сопротивления перерезанию P и ее нормальная составляющая P_n уменьшаются, причем P_n – более значительно, чем P . Касательная составляющая P_τ вначале возрастает, достигая максимума при $K_\beta = 1$, после чего убывает, приближаясь по величине к P .

График на рис. 8.4 позволяет сделать вывод, что при скользящем резании в несколько раз уменьшается суммарная сила сопротивления перерезанию P , а следовательно, и удельные энергозатраты.

9. МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА СОСТАВНЫХ МАТРИЦ

1. Технологический расчет

Технологический расчет заключается в определении производительности (пропускной способности) матрицы и диаметра матрицы по заданной производительности.

Производительность матрицы по сухим изделиям Q , кг/с, определяется по формуле

$$Q = 0,0036 \nu \rho_T f \frac{100 - W_T}{100 - W_{\text{изд}}}, \quad (9.1)$$

где ν – скорость выпрессовывания, м/с;

ρ_T – плотность спрессованного теста, кг/м³;

f – площадь живого сечения матрицы, м²;

W_T и $W_{\text{изд}}$ – влажность теста и сухих изделий, %.

Определение площади живого сечения матрицы:

– для трубчатых изделий:

$$f_M = \frac{\pi d}{4} (d_{\text{щ}}^2 - d_{\text{в}}^2), \quad (9.2)$$

где $d_{\text{щ}}^2$ – диаметр формующей щели, м;

$d_{\text{в}}^2$ – диаметр ножки вкладыша, м;

– для вермишели:

$$f_M = \frac{n\pi}{4d^2}, \quad (9.3)$$

где n – число отверстий матрицы;

d – диаметр формующего отверстия, м;

– для лапши:

$$f_M = n l a, \quad (9.4)$$

где l – длина формующей щели, м;

a – ширина формующей щели, м.

Для определения диаметра матрицы проводится расчет суммарного живого сечения формующих щелей $\sum f$, м²:

$$\sum f = \frac{Q R(100 - W_T)}{3,6 \nu \rho_T f (100 - W_{\text{изд}})}, \quad (9.5)$$

где R – коэффициент полезной работы матрицы, учитывающий количество обрезков длинных сырых изделий, возвращаемых в пресс на переработку, а также количество неработающих отверстий; принимают $R = 0,90-0,95$.

Определение площади матрицы F , м²:

$$F = \sum \frac{f}{R_f}, \quad (9.6)$$

где R_f – коэффициент живого сечения матрицы для круглых матриц; в зависимости от вида изделий принимают $R_f = 0,035-0,140$.

Определение скорости выпрессовывания теста:

$$v = \frac{1}{4\eta} \frac{P - P_0}{h} (r_0^2 - r^2), \quad (9.7)$$

где η – коэффициент вязкости;

P, P_0 – давление перед матрицей и на выходе теста соответственно, Па;

h – толщина (высота) матрицы, м;

r_0 – наружный радиус формующего отверстия, м;

r – внутренний радиус формующего отверстия, м.

Определение объема теста Q_T , протекающего за 1 с через поперечное сечение формующего отверстия:

$$Q_T = \frac{\pi}{128} \frac{P - P_0}{h} \frac{d^4}{\eta}, \quad (9.8)$$

где d – диаметр формующего отверстия, м.

Диаметр матрицы D , м, рассчитывают по формуле

$$D = \frac{\sqrt{4F}}{\pi}. \quad (9.9)$$

Производительность матрицы должна быть равна производительности шнека прессы.

2. Расчет на прочность

Проводят с целью определения допустимой нагрузки (давления прессования) на матрицу.

Для круглых матриц при расчете минимальной толщины h , м, можно использовать формулу:

$$h = D \sqrt{\frac{AP}{[\delta]}}, \quad (9.10)$$

где D – диаметр матрицы, м;

A – коэффициент, величина которого в зависимости от диаметра отверстий и числа концентрических рядов в матрице составляет 1,4–13,7;

P – расчетное давление прессования, Па;

$[\delta]$ – допустимое напряжение материала матрицы, Па.

Максимальный изгибающий момент M_r , Н·м/м, определяют по формуле

$$M_r = 6,25 \cdot 10^{-5} \frac{PR^2}{n(3+\mu)}, \quad (9.11)$$

где R – радиус корпуса матрицы, м;

μ – коэффициент Пуассона материала матрицы; для стали 20 можно принять $\mu = 0,3$;

n – число составных частей.

Определение максимального напряжения в центре матрицы δ_r , Па:

$$\delta_r = \frac{6M_r}{h^2}, \quad (9.12)$$

где h – толщина корпуса матрицы, м.

Допускаемое напряжение для корпуса матрицы, изготовленного, например, из стали 20, равно $[\delta] = 420 : 3,5 = 120$ МПа.

Для нормальной работы матрицы должно выполняться условие

$$\delta_r < [\delta].$$

Теоретические расчеты показывают, что максимальные моменты и напряжения в составных матрицах значительно снижены при неизменной жесткости корпуса:

– с $M_r = 210\,000$ Н·м/м до $M_r = 5228,4$ Н·м/м ;

– с $\delta_r = 104 \cdot 10^6$ Па до $\delta_r = 26 \cdot 10^6$ Па .

Величину прогиба f в центре корпуса составной матрицы определяют по формуле (экспериментальные данные)

$$f = 1,56 \cdot 10^{-2} \frac{PR^4}{Dn}, \quad (9.13)$$

где D – цилиндрическая жесткость корпуса матрицы, которая определяется по уравнению $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ (E – модуль упругости материала матрицы; h – толщина матрицы, м).

Количество составных частей матрицы h зависит от числа сквозных зазоров: при одном зазоре $n = 2$, при двух зазорах $n = 3$.

Количество составных частей матрицы h зависит от числа сквозных зазоров: при одном зазоре $n = 2$, при двух зазорах $n = 3$.

3. Конструктивный расчет матрицы. Выравнивание скорости вытравливания теста в плоскости рабочей поверхности корпуса

Для достижения одинаковой пропускной способности геометрические параметры перфорации, количество колодцев и размеры корпуса матрицы должны быть взаимосвязаны между собой. Наибольший положительный эффект дает расположение формирующих отверстий по концентрическим окружностям с использованием закономерностей «золотого сечения» – принципа «золотой» перфорированной перегородки.

Матрица для производства макаронных изделий содержит цилиндрический корпус 1, основание 2, колодцы 3 и расположенные внутри колодцев вкладыши 5 со сквозными формирующими отверстиями 4.

Рабочая поверхность корпуса разделена на ряд условных колец 8. Колодцы 3 расположены в условных кольцах 8 на концентрических окружностях 7. Основание 2 установлено относительно корпуса 1 матрицы с зазором b и имеет центральное отверстие 9.

Таким образом, корпус матрицы выполнен составным, разделенным на две неравные части по внутреннему радиусу $R_{в}^n$ последнего условного кольца, считая от радиуса корпуса матрицы.

Колодцы 3 расположены по площади матрицы в условных кольцах 8 на концентрических окружностях 7. Наружные радиусы условных колец определяются по формуле

$$R_{н}^n = (0,786)^n R_{к}.$$

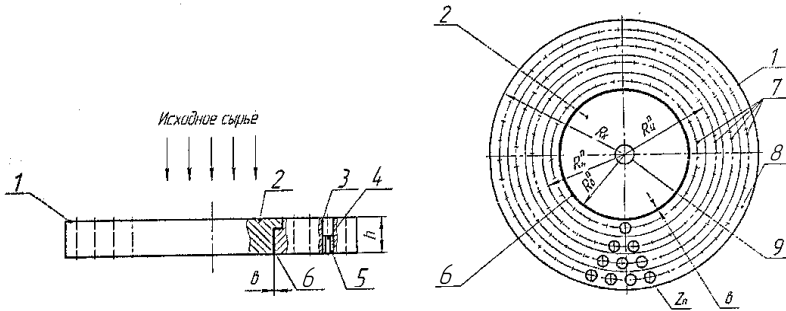


Рис. 9.1. Принципиально-конструктивная схема составной матрицы для производства макаронных изделий:

$R_{к}$ – радиус корпуса матрицы; $R_{н}^n$ – центральный радиус n -го условного кольца 8;

$R_{н}^n$ – наружный радиус n -го условного кольца 8; $R_{в}^n$ – внутренний радиус n -го условного кольца 8; $Z_{н}$ – количество колодцев 3 в n -м условном кольце 8;

b – ширина зазора b ; h – высота (толщина) матрицы

Количество колодцев на концентрической окружности каждого условного кольца определяется по формуле

$$Z_{n+1} = \left[\frac{Z_n}{1,618} \right].$$

Основание 2 установлено относительно корпуса 1 со ступенчатым зазором b шириной b по всей высоте (толщине) матрицы. Стрелками показано направление движения исходного сырья.

Примеры расчета приведены в п. 3.6. На рис. 9.2 представлен вариант установки основания в корпусе матрицы.

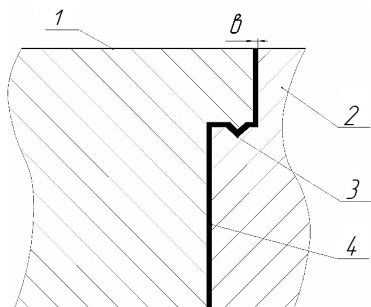


Рис. 9.2. Вариант установки основания в корпусе матрицы:
1 – основание; 2 – корпус матрицы; 3 – выступ кольцевой; 4 – зазор

4. Оценка экономической эффективности составных матриц

Матрицы изготавливают из антикоррозионных и прочных материалов, таких как латунь ЛС59-1 (ГОСТ 15527–70), твердая фосфористая бронза БрАЖ9-4 и нержавеющая сталь 1Х18Н9Т (ГОСТ 5949–75). При отсутствии латуни, бронзы и нержавеющей стали их можно заменить менее дефицитной хромистой сталью 2Х13 и 3Х13 (ГОСТ 5949–75). Однако конструкция составной матрицы позволяет изготавливать большую часть, имеющий вид кольца, из бронзы БрАЖ9-4, а меньшую, выполненную в виде диска, – из хромистой стали 30Х13. В этом случае мы получаем не просто составную матрицу, а составную биметаллическую матрицу, но более дешевую.

Трехмерная модель составной матрицы в разобранном виде представлена на рис. 6.1.

По сравнительным данным на 2020 г. цена 1 кг бронзы БрА9ЖЗЛ – 14,7 р., а 1 кг стали 30Х13 (40Х13) – 6,8 р. Исходя из разницы в ценах замена материала центрального основания (вкладыша) на более дешевый дает заметный экономический эффект. Итальянские матрицы имеют массу от 40 до 150 кг стоимостью от 500 до 9000 евро.

При замене бронзового основания на стальной экономия с каждого килограмма массы составляет $14,7 - 6,8 = 7,9$ белорусских рубля, т. е. $\Delta = 7,9m$, где m – масса центрального основания составной матрицы, кг.

Экономический эффект можно также получить за счет уменьшения толщины корпуса матрицы, например со 140 до 110 мм или со 110 до 89 мм, принимая во внимание, что для составных матриц максимальные моменты и напряжения значительно ниже по сравнению со сплошными матрицами.

Новые технические решения по составным матрицам защищены патентами на изобретения РБ № 17855, 18195, 19138 и 21246.

10. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ СОСТАВНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ В ПРОИЗВОДСТВО ДЛЯ ПРЕССА BUNLER TPXO

1. *Определение геометрических параметров и объема центральной вставки составной матрицы*

Объем центральной вставки рассчитывается по формуле

$$V_{ц} = V_1 + V_2, \quad (10.1)$$

где V_1 и V_2 – объемы двух частей центральной вставки матрицы, м³.

Объем части определяется по формуле

$$V_n = \frac{\pi d_n^2}{4} l_n, \quad (10.2)$$

где n – номер части;

d_n – диаметр части центральной вставки матрицы, м;

l_n – длина части центральной вставки матрицы, м.

Тогда объем первой и второй частей:

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 0,24^2}{4} 0,09 = 0,004069 \text{ м}^3;$$

$$V_2 = \frac{3,14 \cdot 0,26^2}{4} 0,02 = 0,001061 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем объем центральной вставки матрицы:

$$V_{ц} = 0,004069 + 0,001061 = 0,00513 \text{ м}^3.$$

2. *Определение массы центральной вставки матрицы из твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4 или хромистой стали 2Х13*

Определим массу центральной вставки матрицы из бронзы:

$$m_6 = \rho_6 V_{ц}, \quad (10.3)$$

где ρ_6 – плотность бронзы (для БрАЖ9-4 составляет 7500 кг/м³).

Тогда масса центральной вставки матрицы из твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4

$$m_6 = 7500 \cdot 0,00513 = 38,475 \text{ кг.}$$

Определим массу центральной вставки матрицы из стали:

$$m_c = \rho_c V_{ц}, \quad (10.4)$$

где ρ_c – плотность хромистой стали 2Х13, $\rho_c = 7670 \text{ кг/м}^3$.

Тогда масса центральной вставки матрицы из хромистой стали 2Х13

$$m_c = 7670 \cdot 0,00513 = 39,347 \text{ кг.}$$

3. Определение стоимости материала центральной вставки матрицы из твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4 или хромистой стали 2Х13

Стоимостью металлообработки пренебрегаем, т. к. затраты будут идентичны.

Стоимость материала центральной вставки матрицы из бронзы можно определить по формуле

$$S_б = m_б Ц_б, \quad (10.5)$$

где $Ц_б$ – цена 1 кг бронзы (для БрАЖ9-4 составляет в среднем 7,84 евро).

Тогда стоимость центральной вставки матрицы из твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4

$$S_б = 38,475 \cdot 7,84 = 301,64 \text{ евро.}$$

Стоимость материала центральной вставки матрицы из стали можно определить по формуле

$$S_c = m_c Ц_c, \quad (10.6)$$

где $Ц_c$ – цена 1 кг стали (для 2Х13 составляет в среднем 2,02 евро).

Тогда стоимость материала центральной вставки матрицы из хромистой стали 2Х13

$$S_c = 39,347 \cdot 2,02 = 79,48 \text{ евро.}$$

4. Определение стоимости материала обычной матрицы

Объем матрицы рассчитывается по формуле

$$V_M = \frac{\pi d_M^2}{4} l_M, \quad (10.7)$$

где d_m – диаметр матрицы, м;
 l_m – длина (ширина) матрицы, м.

Тогда объем

$$V_m = \frac{3,14 \cdot 0,52^2}{4} \cdot 0,11 = 0,023349 \text{ м}^3.$$

Определим массу матрицы

$$m_m = \rho_m V_m, \quad (10.8)$$

где ρ_m – плотность материала (для БрАЖ9-4 составляет 7500 кг/м³).

Тогда масса матрицы

$$m_m = 7500 \cdot 0,023349 = 175,12 \text{ кг.}$$

Определим стоимость материала матрицы:

$$S_m = m_m \Pi_c.$$

Тогда стоимость материала матрицы

$$S_m = 175,12 \cdot 7,84 = 1372,92 \text{ евро.}$$

5. Определение годовой эксплуатационной производительности проектируемой машины

Годовая эксплуатационная производительность машины рассчитывается по формуле

$$\Pi_r = \Pi_{\text{ч}} K_{\text{п}} \Phi_{\text{д}}, \quad (10.9)$$

где $\Pi_{\text{ч}}$ – часовая техническая производительность машины, кг/ч ($\Pi_{\text{ч}} = 1500$ кг/ч);

$K_{\text{п}}$ – переходной коэффициент от технической к эксплуатационной производительности (принимается равным 0,7);

$\Phi_{\text{д}}$ – годовой действительный фонд времени работы машины, ч:

$$\Phi_{\text{д}} = (t_{\text{п}} D_{\text{п}} - t_{\text{с}} D_{\text{с}}) N_{\text{см}} K_{\text{р}}, \quad (10.10)$$

где $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{с}}$ – продолжительность полного и сокращенного (предпраздничного) рабочих дней соответственно, ч;

$D_{\text{п}}$ и $D_{\text{с}}$ – число полных и сокращенных (предпраздничных) дней в году соответственно;

$N_{\text{см}}$ – сменность работы машины (принимаем 3 смены);

$K_{\text{р}}$ – коэффициент, учитывающий простои машины в ремонте (принимаем равным 0,8).

Годовой действительный фонд времени работы пресса ТРХО

$$\Phi_{\text{д}} = (8 \cdot 246 - 7 \cdot 5) 3 \cdot 0,80 = 4639 \text{ ч.}$$

Отсюда годовая эксплуатационная производительность пресса

$$\Pi_{\text{г}} = 1500 \cdot 0,7 \cdot 4639 = 4\,870\,950 \text{ кг} = 4870,95 \text{ т.}$$

6. Сравнение стоимости материала биметаллической составной и обычной матриц

Рассчитаем стоимость матрицы при условии использования в биметаллической составной матрице вместо центральной части из бронзы БрАЖ9-4 вставку из стали 2Х13:

$$S_{\text{бм}} = S_{\text{м}} - S_{\text{б}} + S_{\text{с}}; \quad (10.11)$$

$$S_{\text{бм}} = 1372,92 - 301,64 + 79,48 = 1150,76 \text{ евро.}$$

Определим экономию при использовании хромистой стали 2Х13 вместо твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4 для изготовления биметаллической составной матрицы:

$$\Xi = S_{\text{м}} - S_{\text{бм}}; \quad (10.12)$$

$$\Xi = 1372,92 - 1150,76 = 222,16 \text{ евро.}$$

В итоге экономия при использовании в биметаллической матрице центральной вставки из стали 2Х13 составляет 222,16 евро, что на 16,2 % дешевле, чем изготовление матрицы из бронзы.

Так как проектируемая матрица будет установлена на имеющийся на предприятии пресс ТРХО, то дополнительных площадей на установку не потребуется и они в расчетах учитываться не будут. Необходимость в транспортировке и монтажных работах также отсутствует.

Тогда инвестиции в создание биметаллической составной матрицы $I_{\text{бм}} = 1150,76$ евро. Инвестиции в базовую матрицу $I_{\text{м}} = 1372,92$ евро.

Инвестиции по группам основных средств заносятся в табл. 10.1.

Инвестиции

Группа основного капитала	Обозначение	Сумма инвестиций, евро	
		Базовый вариант	Проектируемый вариант
Здание	$I_{зд}$	–	–
Матрица	I_m	1372,92	1150,76
Итого	I	1372,92	1150,76

7. Расчет годовых эксплуатационных расходов

При расчете эксплуатационных издержек можно ограничиться расчетом только тех статей затрат, которые изменяются при внедрении новой матрицы (аппарата). Годовые эксплуатационные издержки при использовании техники состоят из следующих статей:

$$C = Z_3 + Z_m + Z_3 + Z_p + Z_a + Z_{пр}, \quad (10.13)$$

где Z_3 – заработная плата рабочего (рабочих), выполняющего технологическую операцию (операции), с отчислениями на социальные нужды, евро;

Z_m – затраты на сырье и материалы, евро;

Z_3 – затраты на электроэнергию, евро;

Z_p – затраты на ремонт и содержание машин (аппаратов) и зданий, евро;

Z_a – амортизационные отчисления по зданиям и оборудованию, евро;

$Z_{пр}$ – прочие расходы, евро.

Затраты на заработную плату персонала, работающего на рассматриваемой технике, затраты на материалы, электроэнергию, ремонт и содержание машин (аппаратов) и зданий не определяем и в издержках не учитываем, т. к. в результате модернизации они не изменяются по сравнению с базовой машиной.

Амортизационные отчисления определяются на основе инвестиций, вложенных в основные фонды. Используется линейный способ начисления амортизации – равномерное (по годам или месяцам) начисление амортизации в течение всего нормативного срока службы техники. Норма амортизационных отчислений определяется как обратная величина срока службы машины. По данным филиала «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минск-облхлебопродукт» норма амортизации на матрицу составляет 11,3 %.

Расчет амортизационных отчислений производится по формуле

$$A_o = \frac{I N_a}{100}, \quad (10.14)$$

где I – сумма инвестиций в машину, здания или в инструмент, евро;
 N_a – норма амортизационных отчислений, %.

Амортизационные отчисления на обычную матрицу

$$A_{об} = \frac{1372,92 \cdot 11,3}{100} = 155,14 \text{ евро.}$$

Амортизационные отчисления на биметаллическую составную матрицу

$$A_{об} = \frac{1150,76 \cdot 11,3}{100} = 130,04 \text{ евро.}$$

Значения амортизационных отчислений заносятся в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Амортизационные отчисления

Группа основного капитала	Норма амортизации, %	Сумма амортизационных отчислений, евро	
		Базовый вариант	Проектируемый вариант
Здание	–	–	–
Матрица	11,3	155,14	130,04
Итого		155,14	130,04

Прочие расходы составляют 5%–6% от всех предшествующих затрат. Результаты расчета эксплуатационных затрат сводятся в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Общие затраты

Наименование элементов затрат	Обозначение	Годовые затраты, евро	
		Базовый вариант	Проектируемый вариант
Амортизационные отчисления	A_o	155,14	130,04
Прочие расходы	$Z_{пр}$	84,04	70,44
Прямые затраты на матрицу	I_m	1372,92	1150,76
Итого		1612,10	1351,24

8. Расчет дохода от внедрения

Доход по проектируемому варианту представляет собой сумму чистой прибыли и амортизационных отчислений:

$$D_t = \Pi_{\text{ч}} + A_o, \quad (10.15)$$

где $\Pi_{\text{ч}}$ – чистая прибыль по проектируемому варианту, евро;

A_o – амортизационные отчисления по проектируемому варианту, евро.

Прибыль – это выручка от продажи сырья, полуфабриката (изделия, услуг) в составе готовой продукции без учета косвенных налогов за вычетом эксплуатационных издержек. С учетом сложности расчета выручки от продажи продукции и ее полной себестоимости величину прибыли по проектируемому варианту условно определяют следующим образом:

$$\Pi = C_{\text{б}} - C_{\text{п}}, \quad (10.16)$$

где $C_{\text{б}}$ и $C_{\text{п}}$ – эксплуатационные издержки по базовому и проектируемому вариантам соответственно, евро.

$$\Pi = 1612,10 - 1351,24 = 260,86 \text{ евро.}$$

Чистая прибыль – это прибыль за вычетом налогов и платежей из прибыли:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi(1 - H_{\text{п}}), \quad (10.17)$$

где $H_{\text{п}}$ – налог на прибыль в долях единицы ($H_{\text{п}} = 0,24$).

$$\Pi_{\text{ч}} = 260,86(1 - 0,24) = 198,25 \text{ евро;}$$

$$D_t = 198,25 + 130,04 = 328,29 \text{ евро.}$$

Таким образом, доход по проектируемому варианту составил 328,29 евро.

9. Определение эффективности проектируемого варианта

При оценке эффективности различных вариантов технических решений и вложений инвестиций выбор наиболее целесообразного в мировой практике производится по следующим показателям:

- чистому приведенному доходу (ЧПД);
- внутренней норме доходности (ВНД);
- сроку окупаемости проекта (периоду возврата инвестиций) $T_{ок}$;
- индексу доходности (рентабельности) инвестиций $P_{и}$.

Чистый приведенный доход – разность дисконтированных на один момент времени показателей дохода и инвестиций (капитальных вложений):

$$\text{ЧПД} = \sum^n (D_t K_t) - \sum^n (I_t K_t), \quad (10.18)$$

где D_t – доход в 1-м году, т. е. чистая прибыль и амортизационные отчисления, тыс. р.;

I_t – инвестиции (капитальные вложения в основные фонды), евро;

K_t – коэффициент дисконтирования в 1-м году.

Доход и инвестиции несопоставимы, т. к. ценность ресурсов (денег) меняется с течением времени. Стоимость сегодняшних денег больше, чем стоимость той же суммы в будущем. Инвестиции должны быть вложены раньше, а затем в зависимости от их жизненного периода ежегодно приносить выгоду (доход). Доход (прибыль и амортизационные отчисления) по годам усреднен, но его следует привести к современной стоимости с учетом фактора времени. Для этого используется коэффициент дисконтирования, который определяется по формуле

$$K_t = \frac{1}{(1 + C)^t}, \quad (10.19)$$

где C – ставка дисконтирования, выраженная в долях единицы, в расчетах принята равной 0,039 (по данным филиала «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов», самая низкая ставка дисконтирования – 3,9 %).

Результаты расчета современной стоимости дохода и инвестиций сводится в табл. 10.4 при значениях инвестиций и приведенной стоимости инвестиций, равных 1150,76 евро.

На основании данных табл. 10.4

$$\text{ЧПД} = 3852,48 - 1150,76 = 2701,72 \text{ евро.}$$

Так как показатель ЧПД является положительной величиной (т. е. вложение инвестиций рационально), рассчитываются остальные показатели.

Срок окупаемости (период возмещения инвестиций)

$$T_{\text{ок. ср}} = \frac{\sum^n (ИК_t)}{\sum^n \frac{ДК_t}{n}}, \quad (10.20)$$

где n – количество лет (месяцев), в течение которых получают доход от инвестиций.

$$T_{\text{ок. ср}} = \frac{1150,76}{240,78} = 4,8 \text{ месяца.}$$

Рентабельность инвестиций (индекс доходности)

$$P_n = \frac{\sum^n (Д_t K_t)}{\sum^n (И_t K_t)}; \quad (10.21)$$

$$P_n = \frac{3852,48}{1150,76} = 3,35.$$

Внутренняя норма доходности – это расчетная ставка процента, при которой полученный доход от проекта равен инвестициям в проект; другими словами, это максимальный процент, который может быть оплачен для привлечения инвестиций:

$$\text{ВНД} = C' + \left(\frac{\text{ЧПД}'_c}{\text{ЧПД}'_c - \text{ЧПД}''_c} \right) (C'' - C'), \quad (10.22)$$

где C' и C'' – более низкая и более высокая ставки процента соответственно, %;

$\text{ЧПД}'_c$ и $\text{ЧПД}''_c$ – приведенный доход при более низкой и более высокой ставке процента соответственно.

Чистый приведенный доход при более высокой ставке процента $\text{ЧПД}''_c$ определяется аналогично ЧПД (см. табл. 10.4).

Результаты расчетов сводим в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Расчет современной стоимости дохода и инвестиций

Месяц	Доход, евро	Коэффициент дисконтирования		Приведенная стоимость дохода, евро	
		C = 3,9 %	C = 25,4 %	C = 3,9 %	C = 25,4 %
0	–	1,000	1,000	–	–
1	328,29	0,962	0,796	315,82	261,32
2	328,29	0,926	0,634	304,00	208,14
3	328,29	0,892	0,507	292,83	166,44
4	328,29	0,858	0,404	281,67	132,63
5	328,29	0,823	0,322	270,18	105,71
6	328,29	0,795	0,256	260,99	84,04
7	328,29	0,765	0,204	251,14	66,97
8	328,29	0,736	0,163	241,62	53,51
9	328,29	0,709	0,130	232,76	42,68
10	328,29	0,682	0,103	223,89	33,81
11	328,29	0,657	0,083	215,69	27,25
12	328,29	0,632	0,066	207,48	21,67
13	328,29	0,608	0,053	199,60	17,40
14	328,29	0,585	0,042	192,05	13,79
15	328,29	0,563	0,033	184,83	10,83
16	328,29	0,542	0,027	177,93	8,86
Итого	–	–	–	3852,48	1255,05

$$\text{ЧПД}'_c = 1255,05 - 1150,76 = 104,29 \text{ евро.}$$

Так как показатель ЧПД является положительной величиной (т. е. вложение инвестиций рационально), рассчитываются остальные показатели.

Срок окупаемости

$$T_{\text{ок. ср}} = \frac{1150,76}{78,44} = 14,7 \text{ месяца.}$$

Рентабельность инвестиций (индекс доходности)

$$P_n = \frac{1255,05}{1150,76} = 1,09.$$

Внутренняя норма доходности

$$\text{ВНД} = 3,9 + \left(\frac{2701,72}{2701,72 - 104,29} \right) (25,4 - 3,9) = 26,2 \%$$

Если в качестве инвестиций использованы только привлеченные средства, а кредит получен по ставке C , то разность $(\text{ВНД} - C)$ показывает эффект инвестиционной деятельности. При $\text{ВНД} = C$ доход только окупает инвестиции, при $\text{ВНД} < C$ инвестиции убыточны для предприятия, привлекающего их.

В отечественной практике для выбора наилучшего варианта используется критерий минимума приведенных затрат

$$Z_{\text{ед}} = C_{\text{ед}} + E_{\text{н}} I_{\text{ед}}, \quad (10.23)$$

где $Z_{\text{ед}}$ – приведенные затраты на единицу продукции, р.;

$C_{\text{ед}}$ – эксплуатационные издержки на единицу продукции, р.;

$E_{\text{н}}$ – норматив эффективности капиталовложений ($E_{\text{н}} = 0,15$);

$I_{\text{ед}}$ – удельные инвестиции на единицу продукции.

Значения удельных показателей заносятся в табл. 10.5.

Таблица 10.5

Значения удельных показателей

Показатель	Единица измерения	Варианты	
		базовый	проектируемый
Годовой объем выпуска A_n	т	4870,95	4870,95
Инвестиции (И)	евро	1372,92	1150,76
Удельные инвестиции (капитальные вложения) $I_{\text{ед}}$	евро	0,28	0,23
Годовые эксплуатационные издержки $C_{\text{ед}}$	евро	1612,10	1351,24
Эксплуатационные издержки на единицу продукции $C_{\text{ед}, i}$	евро	0,33	0,28

Приведенные затраты на единицу продукции:

– по базовой матрице:

$$Z_{\text{ед}, б} = 0,33 + 0,15 \cdot 0,28 = 0,372 \text{ евро};$$

– по проектируемой матрице:

$$Z_{\text{ед. п}} = 0,28 + 0,15 \cdot 0,23 = 0,314 \text{ евро.}$$

Годовой экономический эффект от внедрения

$$Э_{\Gamma} = 12(Z_{\text{ед. б}} - Z_{\text{ед. п}})A_n,$$

где A_n – годовой объем выпуска, т.

$$Э_{\Gamma} = 12(0,372 - 0,314)4870,95 = 3390,18 \text{ евро.}$$

Результаты расчетов занесем в табл. 10.6.

Таблица 10.6

Значения технико-экономических показателей

Показатели	Единица измерения	Варианты	
		базовый	проектируемый
Количественные:			
– годовой объем выпуска	т	4870,95	4870,95
– прибыль	евро		260,86
– инвестиции	евро	1372,92	1150,76
– годовые эксплуатационные издержки	евро	1612,10	1351,24
Показатели эффективности:			
– чистый приведенный доход	евро		2553,76
– внутренняя норма доходности инвестиций	%		26,2
– срок окупаемости инвестиций	лет		1,2
– приведенные затраты	евро	0,372	0,314
– годовой экономический эффект	евро		3390,18

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что данный проект целесообразен и его практическая реализация позволит добиться поставленных целей – увеличения производительности и эффективности производственного процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ, систематизация и обобщение литературных данных, патентно-информационные исследования свидетельствуют о наличии значительного количества научных работ, направленных на интенсификацию процессов формования макаронных изделий и на совершенствование конструкций рабочих органов прессов, в частности матриц. Можно отметить следующие основные направления развития:

- применение высокотемпературного режима замеса и формования теста и повышение температуры корпуса матриц до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в прессах зарубежного производства;

- увеличение внутреннего давления теста с 6–7 до 12–14 МПа на зарубежных технологических линиях, что приводит к завышенным габаритным размерам матриц – 520 и 610 мм, а их толщина (высота) составляет соответственно 110 и 140 мм;

- высокая температура теста и значительное его внутреннее давление обуславливают коробление (выпучивание) рабочей поверхности матриц до 5 мм, что приводит к увеличению количества бракованной продукции в виде неровных концов (до 125 %);

- при значительных габаритных размерах матрицы ее корпус выполнен сплошным, что не обеспечивает конструкции достаточную прочность и жесткость при явном короблении рабочей поверхности и завышенной материалоемкости при стоимости, например, итальянских матриц от 6000 до 9000 евро.

2. Изучено влияние внутреннего давления теста на прочность, жесткость и прогиб перфорированных пластин, нагруженных силами, действующими перпендикулярно их плоскости. Определены прогибы рабочей поверхности матриц со сплошным корпусом диаметром 298 и 520 мм: в первом случае величина прогиба составляет 5,25 мм, во втором – 4,40 мм. Однако если корпус матрицы выполнить составным, величина прогиба рабочей поверхности уменьшается до 2,40 мм, т. е. почти в 2 раза, при этом в составных матрицах при неизменной жесткости корпуса значительно снижаются максимальные моменты M , с 210 000 до 52 284,4 Н·м/м и напряжения σ_r , с $104 \cdot 10^6$ до $26 \cdot 10^6$ Па. Уменьшение максимальных моментов и напряжений в составных матрицах почти в 4 раза при снижении прогиба позволяет сделать вывод, что толщина итальянских матриц может быть сокращена на 25 %–30 %, а это экономит дорогостоящий дефицитный

материал матрицы при одновременном снижении ее гидравлического сопротивления и увеличении производительности пресса.

3. Впервые рассмотрены математические модели тепловых процессов, протекающие в матрицах при формировании макаронных изделий, выведено дифференциальное уравнение теплопроводности, определена теплопроводность стенки колодца, получены уравнения теплоотдачи и теплопередачи от тестовой массы к корпусу матрицы и в окружающую среду. На основе закона Ньютона построена реологическая модель течения теста в цилиндрических кролодцах матрицы, позволяющая определить объемные расход теста и скорость его течения, т. е. скорость выпрессовывания теста. Данные формулы показывают зависимость объемного расхода теста Q_n и скорости его течения v от длины цилиндрического канала и вязкости η . При одной и той же разности давлений $(P - P_0)$ с увеличением длины канала значения Q_n и v уменьшаются, а при повышении вязкости теста η – увеличиваются.

4. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что круглые матрицы составной конструкции имеют меньший прогиб рабочей поверхности, повышенную жесткость и усиленную прочность. Полученные экспериментальным путем формулы позволяют определять максимальные моменты и величину прогиба центра корпуса составных матриц с учетом количества сквозных ступенчатых зазоров n в зависимости от нагрузок P и радиуса R корпуса матрицы. Количество составных частей определяется числом температурных зазоров.

Экспериментальным путем получены эмпирические полиномиальные уравнения для определения прогиба срединной поверхности матрицы в зависимости от температуры нагрева и толщины корпуса.

5. Проведены лабораторные исследования опытных образцов составных матриц на базе пресс-автомата для производства макаронных изделий МИТ-2 ТУ РБ 200167377.002–2001, оснащенного контрольно-измерительной аппаратурой. Установлено:

- снижение давления в предматричном пространстве на 5 %–7 %;
- уменьшение температуры теста на 1,5 °С–2,0 °С;
- снижение удельной энергоемкости на 10 %.

Экспериментально доказано, что опытный образец новой конструкции матрицы для производства макаронных изделий обеспечивает получение качественной продукции при снижении удельной энергоемкости процесса прессования и улучшении эксплуатац

онных характеристик, поэтому может быть рекомендован взамен итальянских аналогов. Составная конструкция корпуса матрицы позволяет изготавливать центральную ее часть не из дорогостоящей твердой фосфористой бронзы БрАЖ9-4, а из менее дефицитной и более дешевой хромистой стали 2Х13 или 3Х13 (ГОСТ 5942–75). Снижение себестоимости таких биметаллических матриц достигает 12 %.

6. Разработана методика инженерного расчета составных биметаллических матриц с температурными зазорами, содержащая следующие виды расчетов:

- технологический расчет позволяет определить производительность матрицы, скорость выпрессовывания теста, объемный расход теста и наружный диаметр матрицы;

- целью расчета на прочность является определение допустимой нагрузки (давление прессования), минимальной толщины корпуса, максимального изгибающего момента, максимального напряжения в центре матрицы, цилиндрической жесткости и величины прогиба в центре составного корпуса;

- конструктивный расчет основан на использовании закономерностей «золотого сечения» с целью выравнивания скорости выпрессовывания теста и плоскости рабочей поверхности корпуса;

- теплотехнический расчет проводится с целью определения величины температурного зазора и оптимального диаметра центрального вкладыша;

- оценка экономической эффективности проводится для составных биметаллических матриц при замене бронзового основания на более дешевое стальное.

Методика инженерного расчета составных матриц внедрена на ООО «РЕЛНИ» по производству пищевого оборудования и запасных частей (Логойск), а также передана на ОАО «Торгмаш» (Барановичи) для использования в пресс-автоматах МИТ-2.

7. Составлена современная (обновленная) классификация матриц отечественного и зарубежного производства:

- по технологическим требованиям;
- по габаритным размерам;
- по конструктивному исполнению;
- по расчетному давлению прессования;
- по расположению колодцев на рабочей поверхности;
- по видам формирующих механизмов;

- по материалам изготовления;
- по теплотехническим характеристикам.

Впервые в данную классификацию включены составные биметаллические матрицы:

- с одним температурным зазором;
- с двумя температурными зазорами;
- с температурными зазорами и температурными ребрами.

Разработана конструкторская документация на матрицы для прессов ЛПЛ-2М (Российская Федерация), для пресс-автоматов типа МИТ-2 ТУ РБ 200167377.022–2001 (Барановичи) и для итальянских матриц фирмы Landucci S.r.l. Конструкторская документация для пресс-автоматов МИТ-2 передана на ОАО «Торгмаш» (Барановичи) для внедрения в производство и на ООО «РЕЛНИ» по производству пищевого оборудования и запасных частей (Логойск).

Конструкторская документация на итальянские матрицы фирмы Landucci S.r.l. передана на УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт» для внедрения на автоматизированной швейцарской линии Buhler AG по производству короткорезаных макаронных изделий производительностью 1500 кг/ч.

8. Разработаны реологические модели течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузорно-диффузорных вставок. Получены аналитические зависимости, связывающие перепад давления на каждом из участков с конструктивными размерами канала и показателями реологических свойств. Произведено численное моделирование и получены расчетные данные по влиянию размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление его вязкому течению. Доказано, что изменение направления движения теста путем установки вставки по форме прямой или обратной трубки Вентури не влияет на величину сопротивления вязкому течению и перепад давлений. Увеличение длины каждого из участков приводит к росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления. Более интенсивный рост давления наблюдается при уменьшении диаметра проходного отверстия цилиндра, равного внутреннему диаметру конфузора и диффузора.

Полученные результаты, дополненные данными экспериментальной проверки, могут составить основу инженерно-технологических расчетов при проектировании конфузорно-диффузорных вставок для лабораторных и промышленных матриц макаронных прессов.

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Производственные испытания составных матриц нового поколения для производства макаронных изделий на прессе ТРХО швейцарской линии Buhler AG по производству короткорезанных макаронных изделий, проведенные в производственных условиях филиала «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минск-облхлебопродукт», показали, что матрицы обладают пониженным короблением рабочей поверхности за счет компенсации температурных деформаций с помощью сквозного зазора шириной $b = 0,3$ мм, при этом протекания теста не наблюдается, а количество отходов в виде концов значительно сокращается. Испытаниями также установлено, что толщина составных матриц может быть уменьшена со 110 до 80 мм, т. е. на 25 % за счет повышенной прочности и жесткости конструкции корпуса.

При давлении прессования 10,5 МПа, расходе воды на высоко-температурный замес теста 565 л/ч, давлении вакуумирования 930 мбар и температуре теста 47,9 °С уровень коробления рабочей поверхности со стороны вращающегося ножа не превышал 0,9 мм, что обеспечивало отрезание полуфабрикатов одинаковой длины, повышение качества готовых изделий и снижение количества брака до 10 %.

2. Разработанные экспериментальные стенды по установлению влияния внутреннего давления и температуры теста на прочность, жесткость и прогиб матриц и опытный образец составной матрицы могут быть использованы в учебных целях для подготовки инженеров специальности 1-74 06 02 «Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» при изучении дисциплины «Машины, аппараты и оборудование процессов переработки и хранения сельскохозяйственной продукции», а также при курсовом и дипломном проектировании с целью повышения качества подготовки высококвалифицированных кадров для АПК Республики Беларусь.

3. Годовой экономический эффект от внедрения матриц на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» составляет 3390,18 евро – 11,19 тыс. р. (в ценах на март 2021 г.).

4. Методика инженерного расчета составных матриц внедрена на ООО «РЕЛНИ» по производству пищевого оборудования и запасных частей (Логойск), а также передана на ОАО «Торгмаш» (Барановичи) для использования в пресс-автоматах МИТ-2.

Опытный образец матрицы к пресс-автомату МИТ-2 был изготовлен на заводе торгового машиностроения ОАО «Торгмаш» (Барановичи) по конструкторской документации УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

С учетом результатов проведенных экспериментальных исследований была разработана современная классификация матриц для производства макаронных изделий, в которой впервые показано новое направление в конструировании матриц: биметаллических, составных с температурными зазорами и тепловыми ребрами.

Разработана конструкторская документация на матрицы для прессов ЛПЛ-2М (РФ), пресс-автоматов типа МИТ-2 ТУ РБ 200167377.022–2001 (Барановичи) и итальянских матриц фирмы Landucci S.r.l.

Конструкторская документация на итальянские матрицы фирмы Landucci S.r.l. передана на УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскоблхлебопродукт» для внедрения на автоматизированной швейцарской линии Buhler AG по производству короткорезанных макаронных изделий производительностью 1500 кг/ч.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, Б. М. Инженерная реология пищевых продуктов / Б. М. Азаров, И. Л. Арет. – М. : МТИПП, 1998. – 113 с.
2. Алфутов, Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. – М. : Машиностроение, 1978. – 312 с.
3. Антипов, С. Т. Машины и аппараты пищевых производств : в 3 кн. / С. Т. Антипов, И. Т. Кретов, А. Н. Остриков. – М. : Высшая школа, 2001. – Кн. 1. – 703 с.
4. Бийлаард, П. Теория пластической устойчивости и ее приложение к тонким стальным пластинкам / П. Бийлаард // Теория пластичности : сборник статей. – М. : ГИШГ, 1948. – С. 392–404.
5. Богатырев, А. Н. Система научного и инженерного обеспечения пищевых и перерабатывающих отраслей АПК России / А. Н. Богатырев, В. А. Панфилов, В. И. Тужилкин. – М. : Пищевая промышленность, 1995. – 528 с.
6. Бродский, В. З. Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский. – М. : Наука, 1976. – 223 с.
7. Бубнов, И. Г. Труды по теории пластин / И. Г. Бубнов. – М. : Гостехиздат, 1953. – 424 с.
8. Буров, Л. А. Проектирование макаронных фабрик / Л. А. Буров. – М. : Пищевая промышленность, 1972. – 287 с.
9. Буров, Л. А. Технологическое оборудование макаронных фабрик / Л. А. Буров, Г. М. Медведев. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 287 с.
10. Вандакурова, Н. И. Технологический контроль и учет макаронного производства : учебное пособие / Н. И. Вандакурова. – Кемерово : КемТИПП, 1998. – 97 с.
11. Вандакурова, Н. И. Технология, организация и оборудование макаронного производства : учебное пособие / Н. И. Вандакурова, В. Ю. Богер. – Кемерово : КемТИПП, 2007. – 121 с.
12. Васин, М. И. Пути улучшения качества макаронных изделий / М. И. Васин, М. А. Калинина, С. А. Парфенова // Хлебопекарная и макаронная промышленность. Обзорная информация. – М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. – С. 24.
13. Виноградов, Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М. : Химия, 1977. – 440 с.
14. Влияние размеров частиц на качество макаронных изделий / Л. А. Буров [и др.]. – М. : Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1975. – № 10. – С. 25.

15. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.

16. Высокотемпературное формование макаронных изделий через нагретые матрицы / Г. М. Медведев [и др.]. – М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1990. – 24 с.

17. Ганеева, М. С. Большие прогибы прямоугольных пластин под действием равномерного нормального давления при неравномерном нагреве / М. С. Ганеева // Труды конференции по теории пластин и оболочек. – 1961. – Вып. 1. – С. 101–106.

18. Гареев, А. Г. Основы обработки и визуализации экспериментальных данных : учебное пособие / А. Г. Гареев. – Уфа : УГНТУ, 2004. – 82 с.

19. Гоголев, А. Я. Экспериментальное определение коэффициента ослабления трубных решеток / А. Я. Гоголев // Энергомашиностроение. – 1962. – № 10. – С. 38–39.

20. Грачев, Ю. П. Математические планирования экспериментов / Ю. П. Грачев. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 200 с.

21. Гребенюк, С. М. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств / С. М. Гребенюк, И. М. Михеева. – М. : Агропромиздат, 1987. – 304 с.

22. 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.

23. Груданов, В. Я. Основы инженерного творчества / В. Я. Груданов. – Минск : БГУ, 2005. – 299 с.

24. Груданов, В. Я. Совершенствование конструкций машин и аппаратов пищевых производств : учебное пособие / В. Я. Груданов, Л. Ф. Глушенко, В. В. Климович. – Минск : УМЦ, 1996. – 248 с.

25. Гуськов, К. П. Перфорированные пластины в макаронном производстве / К. П. Гуськов, Б. М. Азаров. – М. : ЦНИИТЭИ пищепром, 1965. – 48 с.

26. Дворецкий, С. И. Основы проектирования пищевых производств : учебное пособие / С. И. Дворецкий, Е. В. Хабарова. – Тамбов : ТГТУ, 2008. – 92 с.

27. Додзина, Р. Н. Исследование устойчивости упруго-пластических оболочек переменной толщины при комбинированном нагружении / Р. Н. Додзина. – Куйбышев : КПТИ, 1984. – 20 с.

28. Драгилев, А. И. Технологическое оборудование хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств : сборник задач /

А. И. Драгилев, В. М. Хромеенков, М. Е. Чернов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 78 с.

29. Изготовление макаронных изделий с применением термообработки теста при замесе / Г. М. Медведев [и др.]. – М. : ЦНИИТЭИ Минхлебопродукт СССР, 1987. – 16 с.

30. Изделия макаронные. Общие технические условия : СТБ 1963–2009. – Введ. 29.12.09. – Минск : БелГИСС, 2009. – 28 с.

31. Инструкция по техно-химическому контролю макаронного производства. – 5-е изд., перераб. – М. : НПО хлебопекарной промышленности, 1986. – 136 с.

32. 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.

33. Калачев, М. В. Оборудование отрасли. Технологическое оборудование отрасли (хлебобулочных и макаронных предприятий) : учебно-практическое пособие / М. В. Калачев, М. Е. Чернов. – М. : МГУТУ, 2004. – 68 с.

34. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1971. – 784 с.

35. Ковалевский, В. И. Проектирование технологического оборудования и линий : учебное пособие / В. И. Ковалевский. – СПб. : ГИОРД, 2007. – 320 с.

36. Ковальская, Л. П. Технология пищевых производств / Л. П. Ковальская. – М. : Колос, 1999. – 374 с.

37. Корнишин, М. С. О выборе выражений для касательных составляющих перемещения при решении задач теории оболочек вариационными методами / М. С. Корнишин // Известия КФАН СССР. – 1958. – № 12. – С. 28–36.

38. Кувдин, А. Б. Устойчивость и большие прогибы прямоугольных пластин переменной толщины с опорными ребрами / А. Б. Кувдин, Б. И. Климанов, В. В. Рогалевич. – Свердловск : Деп. в ВИНТИ, 1981. – 12 с.

39. Кузнецов, О. А. Реология пищевых масс : учебное пособие / О. А. Кузнецов, Е. В. Волошин, Р. Ф. Сагитов. – Оренбург : ОГУ, 2005. – 106 с.

40. Лукьянов, В. В. Технология макаронного производства / В. В. Лукьянов. – М. : Пищепромиздат, 1959. – 248 с.

41. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 7401 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, В. Я. Смагин,

А. А. Выхварко ; заявитель УО «Могилевский государственный университет продовольствия». – № а 20020639 ; заявл. 18.07.02, опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 3. – С. 84.

42. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 17855 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20110514 ; заявл. 21.04.11 ; опубл. 30.12.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 12. – С. 158.

43. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 18195 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20111256 ; заявл. 28.09.11 ; опубл. 30.04.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 58.

44. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 19138 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, В. М. Поздняков, А. А. Бренч, П. В. Станкевич ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20120118 ; заявл. 27.01.12 ; опубл. 30.08.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 9. – С. 95.

45. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 21610 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20150358 ; заявл. 01.07.15 ; опубл. 28.02.17 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 10. – С. 65.

46. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 22246 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, П. В. Станкевич ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20170045 ; заявл. 16.02.17 ; опубл. 30.10.18 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 10. – С. 98.

47. Матрица для производства макаронных изделий : пат. 23081 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Е. Н. Филидович ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20190012 ; заявл. 17.01.19 ;

опубл. 27.05.20 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2020. – № 8. – С. 148.

48. Мачихин, Ю. А. Формование пищевых масс / Ю. А. Мачихин, Г. К. Берман, Ю. В. Клаповский. – М. : Колос, 1992. – 272 с.

49. Медведев, Г. М. Изготовление макаронных изделий с применением термообработки теста при замесе : обзорная информация / Г. М. Медведев, В. Г. Царев, М. Е. Чернов. – М. : ЦНИИТЭИ пищепром, 1987. – 15 с.

50. Медведев, Г. М. Использование режимов тепловой экструзии для формования макаронных изделий и полуфабрикатов крекеров на шнековых прессах / Г. М. Медведев. – М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1992. – 28 с.

51. Медведев, Г. М. Технология и оборудование макаронного производства / Г. М. Медведев. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 280 с.

52. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства : учебник / Г. М. Медведев. – М. : Колос, 1998. – 272 с.

53. Мельников, Н. П. Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов / Н. П. Мельников. – М. : Госатомиздат, 1963. – 519 с.

54. Милатович, Л. Производство макарон из муки зерна мягкой пшеницы / Л. Милатович // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1985. – № 1. – С. 44–45.

55. Мука из мягкой стекловидной пшеницы для макаронных изделий. Технические условия : ГОСТ 12306–66. – Введ. 01.07.67. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 3 с.

56. Мука и отруби. Метод определения влажности : ГОСТ 9404–88. – Введ. 01.01.90. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.

57. Мука пшеничная. Технические условия : СТБ 1666–2006. – Введ. 29.08.06. – Минск : БелГИСС, 2006. – 11 с.

58. Муштары, Х. М. Средний изгиб пологой оболочки, прямоугольной в плане и опирающейся на гибкие в своей плоскости ребра / Х. М. Муштары // Известия КФАН СССР. – 1958. – № 12.

59. Назаров, Н. И. Исследование режимов замеса и прессования теста для макарон (обзор) / Н. И. Назаров. – М. : ЦНИИТЭИ пищепром, 1970. – 28 с.

60. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 208 с.

61. Назаров, Н. И. Технология макаронного производства / Н. И. Назаров. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1969. – 288 с.

62. Назаров, Н. И. Технология макаронных изделий : учебник / Н. И. Назаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 286 с.

63. Никитин, Б. В. Расчет прогибов шнековых винтов с учетом периодически меняющейся жесткости / Б. В. Никитин, В. И. Васильев // Труды ВНИИТП. – Вып. XXII. – Л. : Недра, 1964. – С. 25–39.

64. Николаев, Б. А. Структурно-механические свойства мучного теста / Б. А. Николаев. – М. : Пищевая промышленность, 1976. – 246 с.

65. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств / М. М. Гернет [и др.] ; под ред. А. Я. Соколова. – М. : Пищепромиздат, 1960. – 742 с.

66. Основы численных методов / Л. И. Турчак [и др.] ; под ред. В. В. Щенникова. – М. : Наука, 1987. – 320 с.

67. Остапчук, Н. В. Математическое моделирование технологических процессов хранения и переработки зерна / Н. В. Остапчук. – М. : Колос, 1977. – 239 с.

68. Остриков, А. Н. Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 288 с.

69. Петров, В. В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек / В. В. Петров. – Саратов : Саратов. ун-т, 1975. – 173 с.

70. Поляков, Е. С. Перспективы развития техники и технологии макаронной промышленности / Е. С. Поляков. – М. : Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1980. – 400 с.

71. Поляков, Е. С. Технология и оборудование макаронного производства / Е. С. Поляков. – М. : Пищевая промышленность, 1968. – 257 с.

72. Пономарев, С. Д. Расчет на прочность в машиностроении : в 3 т. / С. Д. Пономарев. – М. : Машгиз, 1956. – Т. 1. – 884 с.

73. Сборник технологических инструкций по производству макаронных изделий. – М. : ВНИИХП, 1991. – 131 с.

74. Сергеев, Б. М. Расчеты на прочность деталей машин пищевых производств / Б. М. Сергеев. – М. : Машиностроение, 1969. – 143 с.

75. Скатецкий, В. Г. Математическое моделирование физико-химических процессов / В. Г. Скатецкий. – Минск : Высшая школа, 1981. – 144 с.

76. Смирнова, Н. А. Товароведение зерномучных и кондитерских товаров / Н. А. Смирнова, Л. А. Надеждина. – М. : Экономика, 1990. – 241 с.

77. Смоленцев, Ю. А. Расчет перфорированных тонкостенных цилиндров и пластин / Ю. А. Смоленцев // Химическое машиностроение. – 1963. – № 4. – С. 23–28.

78. Смоленцев, Ю. А. Экспериментальное определение коэффициента ослабления растягиваемых перфорированных пластин / Ю. А. Смоленцев // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1966. – № 6 – С. 12–13.

79. Совершенствование технологии макаронного производства / Н. И. Березина [и др.]. – Киев : Урожай, 1991. – 104 с.

80. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян [и др.] ; под ред. Г. С. Варданяна. – М. : АСВ, 1995. – 568 с.

81. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – М. : Агропромиздат, 1985. – 503 с.

82. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов : справочник / А. В. Горбатов [и др.] ; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 294 с.

83. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 1997. – 640 с.

84. Теория и техника теплофизического эксперимента : учебное пособие / Ю. Ф. Гортышов [и др.] ; под ред. В. К. Щукина. – М. : Агропромиздат, 1985. – 360 с.

85. Технологические инструкции по производству макаронных изделий. – М. : ЦНИИТЭИМГ пищепром, 1975. – 84 с.

86. Технологическое оборудование пищевых производств / Б. М. Азаров [и др.] ; под ред. Б. М. Азарова. – М. : Агропромиздат, 1988. – 463 с.

87. Технологическое оборудование хлебопекарных и макаронных предприятий / Б. М. Азаров [и др.] ; под ред. С. А. Мачихина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 263 с.

88. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войковский-Кригер. – М. : Физматгиз, 1963. – 625 с.

89. Трубы Вентури. Технические условия : ГОСТ 23720–79. – Введ. 01.07.80. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 17 с.

90. Узел прессования макаронного прессы : пат. 23082 Респ. Беларусь : МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Е. Н. Филидович ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный

технический университет». – № а 20190027 ; заявл. 05.02.19 ; опубл. 27.05.20 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2020. – № 8. – С. 147.

91. Узел прессования макаронного прессы : пат. 23162 Респ. Беларусь ; заявитель УО «Белорусский государственный аграрный технический университет». – № а 20190074 ; заявл. 15.03.19 ; опубл. 04.08.20 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2020. – № 6. – С. 57.

92. Федоров, В. Г. Планирование и реализация экспериментов в пищевой промышленности / В. Г. Федоров, А. К. Плесконос. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 240 с.

93. Хромеевков, В. М. Технологическое оборудование хлебо-заводов и макаронных фабрик / В. М. Хромеевков. – СПб. : ГИОРД, 2002. – 496 с.

94. Чернов, М. Е. Оборудование макаронной промышленности за рубежом / М. Е. Чернов. – М. : ЦНИИТЭИ пищепром, 1978. – 232 с.

95. Чернов, М. Е. Оборудование предприятий макаронной промышленности / М. Е. Чернов. – М. : Агропромиздат, 1988. – 263 с.

96. Чернов, М. Е. Оборудование предприятий макаронной промышленности / М. Е. Чернов. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 232 с.

97. Чернов, М. Е. Практикум по расчетам оборудования хлебо-пекарных и макаронных предприятий / М. Е. Чернов [и др.] ; под ред. Ю. А. Калошина. – М. : Агропромиздат, 1991. – 159 с.

98. Чернов, М. Е. Справочник по макаронному производству / М. Е. Чернов, Г. М. Медведев, В. П. Негруб. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 304 с.

99. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко ; под ред. Н. П. Бусленко. – М. : Мир, 1972. – 382 с.

100. Шнейдер, Т. И. Научное обеспечение макаронной промышленности / Т. И. Шнейдер // Хлебопечение России. – 2002. – № 3. – С. 32–35.

101. Яковлев, К. П. Математическая обработка результатов измерений / К. П. Яковлев. – СПб. : ГИОРД, 1999. – 388 с.

102. Levy, S. Large Deflection Theory for Rectangular Plates / S. Levy // Proceedings of Symposia in Applied Mathematics. – 1949. – Vol. 1. – P. 12–17.

Научное издание

**Груданов Владимир Яковлевич,
Торган Анна Борисовна,
Барсуков Владимир Георгиевич**

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ФОРМОВАНИЯ
ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫХ ПИЩЕВЫХ МАСС
В УЗЛАХ ПРЕССОВАНИЯ**

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Д. А. Значёнок*
Корректор *Д. А. Значёнок*
Компьютерная верстка *Д. А. Значёнок*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 10.12.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л. 8,18. Тираж 100 экз. Заказ 630.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.