

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра технологии пищевых производств

Е.В. Волошин

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ХЛЕБОЗАВОДОВ

Методические указания

Часть 2

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья

Оренбург
2019

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73
В 68

Рецензент - кандидат технических наук, доцент С.В. Антимонов

Волошин, Е.В.
В 68 Технологическое оборудование хлебозаводов: методические указания:
В 2 Ч. Часть 2 / Е.В. Волошин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург:
ОГУ, 2019 – 55 с.

Методические указания предназначены для проведения практических работ по дисциплине «Технологическое оборудование» очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья по общему профилю подготовки.

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73

© Волошин Е.В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Практическая работа №1 Технологическое оборудование для замеса тестовых полуфабрикатов.....	5
1.1 Назначение и классификация тестомесильных машин.....	5
1.2 Тестомесильные машины периодического действия.....	5
1.3 Тестомесильные машины непрерывного действия.....	6
1.4 Смесители для жидких полуфабрикатов.....	6
1.5 Задание.....	6
1.6 Методика расчета.....	9
2 Практическая работа №2 Технологическое оборудование для механической переработки сырья и полуфабрикатов формованием.....	11
2.1 Теоретические основы процесса прессования макаронных изделий.....	11
2.2 Расчет макаронного пресса.....	14
2.3 Расчет экструдера.....	23
3 Практическая работа №3 Технологическое оборудование для сушки пищевых продуктов.....	27
3.1 Ленточные сушилки.....	27
3.2 Барабанные сушилки.....	27
3.3 Оборудование для сушки коротких макаронных изделий.....	28
3.4 Оборудование для сушки длинных макаронных изделий.....	29
3.5 Расчет ленточной сушилки.....	29
3.6 Расчет барабанной сушилки.....	34
4 Практическая работа №4 Технологическое оборудование для выпечки и обжарки продуктов.....	42
4.1 Назначение и классификация хлебопекарных печей.....	42
4.2 Расчет хлебопекарной печи.....	42
Список использованных источников.....	55

Введение

Перерабатывающая промышленность России, которая должна обеспечивать устойчивое снабжение населения широким ассортиментом качественных продуктов питания, в последние годы находится в сложном положении. Технический уровень многих пищевых производств не удовлетворяет современным требованиям.

Для выхода из создавшегося положения требуется коренная реконструкция многих предприятий пищевых отраслей, оснащение их современной техникой, создание принципиально новых, энергетически выгодных технологий, обеспечивающих комплексную безотходную переработку сырья и производство экологически безопасных продуктов питания с учетом потребностей различных возрастных групп и состояния здоровья населения.

Знания, приобретенные студентами при выполнении практических работ, позволят им не только более детально изучить устройство, принцип действия оборудования, методику его расчета, но и наметить основные пути его совершенствования и модернизации.

1 Практическая работа №1 Технологическое оборудование для замеса тестовых полуфабрикатов

Цель работы: изучение теоретических основ процесса замеса теста; знакомство с классификацией тестомесильных машин, устройством и принципом их работы; выполнение расчета тестомесильной машины.

1.1 Назначение и классификация тестомесильных машин

Тестомесильные машины в зависимости от рецептурного состава и особенностей ассортимента должны оказывать различное воздействие на тесто и последующее его созревание. От работы тестомесильных машин зависит в итоге качество готовой продукции.

В зависимости от структуры рабочего цикла тестомесильные машины делят на машины периодического действия и машины непрерывного действия. Машины периодического действия снабжают стационарными месильными емкостями (дежами) или сменными (подкатными дежами). Дежи бывают неподвижными, со свободным или принудительным вращением.

1.2 Тестомесильные машины периодического действия

Особенностью работы тестомесильных машин периодического действия с подкатными дежами является то, что перед замесом в дежу загружают определенную порцию компонентов, дежу подкатывают и фиксируют на фундаментной площадке тестомесильной машины. После замеса дежу с тестом помещают в камеру брожения, где происходит его созревание в течение нескольких часов. К месильной машине в это время подкатывается следующая дежа, и цикл повторяется. На одну месильную машину приходится от 5 до 12 дежей в зависимости от производительности линии. Поскольку масса дежи с тестом достигает 300-500 кг, полы тестомесильных отделений выкладывают плитками. Перемещение дежей требует применения физического труда, поэтому в отдельных конструкциях тестоприготовительных агрегатов используются специальные конвейеры (кольцевые, цепные) для механизации перемещения дежей.

В тестомесильных машинах со стационарными дежами замешенное тесто сразу же поступает в специальные емкости для брожения.

1.3 Тестомесильные машины непрерывного действия

Тестомесильные машины непрерывного действия входят в состав тесто-приготовительных агрегатов и имеют стационарную емкость в виде одной или двух рабочих камер с месильными органами разнообразной формы, вращающимися на горизонтальном валу.

1.4 Смесители для жидких полуфабрикатов

Для приготовления жидких опар, заквасок, мучных питательных смесей используют смесители, работающие, как правило, в непрерывном режиме. Конструкция смесителя оказывает значительное влияние на однородность получаемой смеси и активность жизнедеятельности микроорганизмов. Для этого дрожжи должны быть равномерно распределены по всей массе полуфабриката.

В смесителях периодического действия вследствие высокой неоднородности начального распределения контактирующих фаз достижению однородности полуфабриката препятствует практически мгновенное связывание жидкости и муки. Интенсификация процесса резко повышает сопротивление материала деформационному воздействию и необходимую мощность. Эти недостатки успешно преодолеваются в смесителях непрерывного действия высокой интенсивности.

1.5 Задание

Выполнить расчет тестомесильной машины по заданным вариантам (таблицы 1.1 и 1.2), если заданы: V - вместимость месильной камеры, м^3 ; $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$ - плотность теста; τ_3 - время, необходимое для замеса теста, с ($\tau_3 = 3-20$ мин); τ_6 - время для совершения вспомогательных операций, с; λ - коэффициент использования объема дежи ($\lambda = 0,45-0,65$); z - количество валов, шт.; $D_{\text{л}}$ - наружный диаметр лопастей, м ($D_{\text{л}} = 0,25-0,30$ м); d_6 - диаметр вала, м ($d_6 = 0,04-0,05$ м); S - шаг лопастей, м; $S = (1,1-1,2) D_{\text{л}}$; n - частота вращения вала, мин^{-1} ; η - КПД привода; G_0 - масса дежи, кг; $G_{\text{т}}$ - масса теста в деже, кг; r_4 - радиус цапфы, м; ω_2 - угловая скорость дежи, рад/с ; m - число лопастей, шт.; a - ширина лопатки, м; b - высота лопатки, м; α - угол наклона лопасти к оси вращения, град; R - радиус вращения центра лопасти, м; B - ширина корыта, м; H - высота корыта, м.[2]

Таблица 1.1 - Варианты индивидуальных заданий для расчета тестомесильных машин непрерывного действия

Вар.	τ , мин	z , шт.	n , мин ⁻¹	m , шт.	a , м	b , м	R_1 , м	B , м	H , м	Марка тестомесильной машины
1	10	1	58	14	0,10	0,20	0,28	1,0	0,6	X12Д
2	14	2	60	16	0,12	0,24	0,30	1,0	0,6	X12Д
3	12	1	48	14	0,14	0,26	0,30	1,2	0,6	X26А
4	13	2	44	16	0,10	0,20	0,26	1,1	0,4	X26А
5	14	1	46	14	0,12	0,24	0,30	1,1	0,4	ФТК-1000
6	10	2	48	18	0,14	0,26	0,30	1,0	0,4	ФТК-1000
7	11	1	44	14	0,10	0,20	0,28	0,9	0,6	X-26А
8	12	2	46	16	0,12	0,24	0,30	0,8	0,6	КВТ-1000
9	13	1	50	14	0,14	0,26	0,34	0,9	0,6	КВТ-1000
10	14	2	48	16	0,10	0,20	0,36	0,9	0,4	КВТ-1000
11	17	1	44	16	0,12	0,24	0,32	1,0	0,4	РЗ-ХТО
12	18	2	46	14	0,14	0,26	0,34	1,0	0,8	РЗ-ХТО
13	19	1	48	14	0,12	0,24	0,38	1,1	0,8	РЗ-ХТО
14	20	2	47	16	0,12	0,24	0,34	1,3	0,8	X-26А
15	18	2	45	14	0,12	0,24	0,32	1,4	0,6	X-26А

Таблица 1.2 - Варианты индивидуальных заданий для расчета тестомесильных машин периодического действия

Вар.	τ_3 , мин	τ_B , мин	V , м ³	G_T , кг	G_d , кг	r_4 , м	R , м	n_1 , мин ⁻¹	ω_2 , с ⁻¹	Марка тестомесильной машины
1	10	2,0	0,70	300	81	0,10	0,40	40	4,8	«Стандарт»
2	12	2,5	0,71	310	82	0,11	0,41	41	4,9	«Стандарт»
3	14	2,0	0,72	320	83	0,12	0,42	42	5,0	Т1-ХТ2А
4	16	2,5	0,73	330	84	0,13	0,43	43	5,2	Т1-ХТ2А
5	18	2,0	0,74	340	85	0,14	0,42	44	5,4	ESI-140/80
6	20	2,5	0,75	350	86	0,13	0,41	45	5,6	ESI-140/80
7	18	2,0	0,76	360	87	0,12	0,40	46	5,8	«Момент-100»
8	16	2,5	0,77	370	88	0,12	0,39	47	5,1	«Момент-100»
9	16	2,0	0,78	380	89	0,13	0,40	48	5,3	ТМ-63М
10	14	2,5	0,79	390	90	0,13	0,41	49	-	ТМ-63М
11	12	2,0	0,80	380	89	0,12	0,42	50	-	РЗ-ХТИ-3
12	13	2,3	0,79	370	88	0,11	0,41	49	-	РЗ-ХТИ-3
13	11	2,2	0,78	360	87	0,11	0,43	48	-	РЗ-ХТИ-3
14	12	2,5	0,77	350	86	0,12	0,44	47	-	ДК-65
15	11	2,1	0,76	340	85	0,14	0,45	46	-	ДК-65

1.6 Методика расчета

Производительность тестомесильных машин периодического действия Π , кг/с,

$$\Pi = \frac{\lambda \cdot V \cdot \rho}{\tau_3 + \tau_B}, \quad (1.1)$$

где λ - коэффициент использования объема дежи ($\lambda = 0,45-0,65$);

τ_B - время для совершения вспомогательных операций, с

($\tau_B = 120-150$ с).

Производительность тестомесильных машин непрерывного действия Π , кг/с,

$$\Pi = z \frac{\pi D_L^2 - d_B^2}{240} S \cdot n \cdot \rho \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (1.2)$$

где k_1 - коэффициент подачи, зависящий от формы лопаток и их расположения на валу ($k_1 = 0,2-0,5$);

k_2 - отношение суммарной площади лопастей к винтовой поверхности того же диаметра и шага ($k_2 = 0,15-0,20$);

k_3 - коэффициент, учитывающий площадь сечения, образуемую пересечением траекторий движения лопастей (для одновальной машины $z = 1$, $k_3 = 1$, для двухвальной машины $z = 2$, $k_3 = 0,55-0,70$).

Для тестомесильных машин непрерывного действия производительностью до 30 т/ч можно принять следующие данные: $D_L = (0,25-0,30)$ м; $d_B = (0,04-0,05)$ м; $S = (1,1-1,2) D_L$.

Вместимость месильной камеры для машин непрерывного действия V_H , м³,

$$V_H = \frac{\Pi \cdot \tau_3}{\rho \cdot k'_1}, \quad (1.3)$$

где k'_1 - коэффициент заполнения месильной камеры ($k'_1 = 0,6-0,7$).

Мощность электродвигателя привода тестомесильных машин периодического действия $N_{дв}$, кВт

$$N_{дв} = \frac{N_1 + N_2}{\eta}, \quad (1.4)$$

где N_1 - мощность, необходимая для вращения месильного органа при замесе теста, кВт;

N_2 - мощность, необходимая для вращения дежи, кВт;
 η - КПД привода.

$$N_1 = 4 \cdot 10^{-4} \lambda \cdot V \cdot \rho \cdot R \cdot \omega_1 \cdot g, \quad (1.5)$$

где ω_1 - угловая скорость месильного органа, рад/с

$$N_2 = 10^{-3} \cdot g G_d + G_T f \cdot r_4 \cdot \omega_2, \quad (1.6)$$

где f - коэффициент трения вала дежи в опорах ($f = 0,2-0,3$);
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

Мощность, необходимая для вращения месильного органа при замесе теста в тестомесильных машинах непрерывного действия N , кВт,

$$N = \frac{P_0 v_0 + P_p v_p}{1000 \eta} m, \quad (1.7)$$

где P_0 и P_p - соответственно осевая и радиальная составляющая равнодействующей сил сопротивления, действующих на лопасть, Н;
 v_0 и v_p - соответственно осевая и окружная скорость движения точки приложения равнодействующей сил сопротивления, действующих на лопасть, м/с;
 m - число лопастей в тестомесильной машине, шт.;
 η - КПД привода ($\eta = 0,83 - 0,92$).

$$P_0 = F R \cdot \rho \cdot t g^2 \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) + 2c \cdot t g \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \alpha - \mu \cos \alpha, \quad (1.8)$$

где $F = a b$ - площадь лопасти, погруженной в тесто, м²;
 c - удельное сопротивление теста с материалом лопасти, Па ($c = 5000 \text{ Па}$);
 γ - угол внутреннего трения теста ($\gamma = 40^\circ$);
 μ - коэффициент трения теста о лопасть ($\mu = 1$).

$$P_0 = F R \cdot \rho \cdot t g^2 \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) + 2c \cdot t g \left(45 + \frac{\gamma}{2} \right) \sin \alpha - \mu \cos \alpha. \quad (1.9)$$

$$v_0 = v_p \cos \alpha \cdot \sin \alpha. \quad (1.10)$$

$$v_p = \omega R. \quad (1.11)$$

Площадь поперечного сечения корыта Φ , м²

$$\Phi = \frac{\pi B^2}{2 + H - \frac{B}{2}} . \quad (1.12)$$

Длина корыта L , м

$$L = \frac{V}{\Phi} . \quad (1.13)$$

2 Практическая работа №2 Технологическое оборудование для механической переработки сырья и полуфабрикатов формованием

Цель работы: изучение теоретических основ процессов экструзии и пресования макаронных изделий; ознакомление с классификацией макаронных прессов и экструдеров, их конструкциями и принципом работы; приобретение практических навыков расчетов макаронного пресса и экструдера.

2.1 Теоретические основы процесса пресования макаронных изделий

2.1.1 Назначение и классификация макаронных прессов

В тестосмесителе макаронного шнекового пресса лишь предварительно смешиваются ингредиенты теста до образования крошкообразной массы. Поэтому для приготовления макаронного теста используется пшеничная мука высокого качества, которая должна удовлетворять повышенным требованиям в отношении количества и качества белковых веществ, консистенции и цвета эндосперма и по ряду других показателей.

Макаронное тесто должно быть вязким и плотным, хорошо сопротивляться разрыву и в то же время легко поддаваться формоизменению под действием нагрузки, но не сжиматься и не слипаться в процессе разделки и сушки.

В высушенном виде макаронные изделия должны обладать высокой прочностью и не деформироваться, иметь стекловидный излом и привлекательный вид. Эти свойства обуславливаются количеством и качеством содержащегося в эндосперме белка.

Белковые вещества зерна пшеницы весьма гидрофильны и способны при

смешивании с водой образовывать клейковину, которая связывает более чем двукратное количество воды по отношению к массе сухих веществ.

Клейковинные нити и пленки, будучи равномерно распределены в массе теста среди крахмальных зерен, склеивают их и образуют упруго-пластичный скелет пшеничного теста, придавая ему эластичность и вязкость. В сухом виде эти пленки и нити становятся твердыми, прочными телами, передают эти свойства изделию в целом, сообщают ему монолитность, прочную структуру, способную сопротивляться значительным нагрузкам, возникающим при перевозках и хранении.

Замес макаронного теста и его последующее формование осуществляются в шнековых макаронных прессах непрерывного действия. В тестомесительное крыто мука подается из дозатора тонким слоем непрерывно. Здесь поток муки в падении встречается с водой, поступающей из другого дозатора в виде мельчайших струек или брызг. С первого момента соприкосновения этих компонентов начинается процесс связывания воды коллоидами муки и набухание последних.

В отечественных шнековых прессах приготовление макаронного теста происходит в два этапа.

На первом этапе мука, вода и обогатительные добавки (если последние предусмотрены рецептурой) смешиваются в тестосмесителе, входящем в конструкцию пресса. Процесс смешивания муки и воды в этих машинах непрерывный. Для этого тестосмеситель снабжен мучным и жидкостным дозаторами. Они должны очень точно дозировать муку и особенно воду, т.к. даже незначительное отклонение дозировки воды в любую сторону изменит свойства теста.

В смесителях шнековых прессов получают порошкообразное тесто в виде мелких крошек и небольших крупинок. Такое тесто непригодно для непосредственного прессования. Поэтому тестосмесители шнековых прессов нельзя называть тестомесительными машинами, т.к. они не вымешивают тесто, а лишь равномерно увлажняют муку разбрызгиваемой водой.

Второй этап осуществляется в канале шнековой камеры пресса, где крошкообразная масса теста под воздействием шнековой лопасти постепенно уплотняется и пластифицируется, приобретая структуру и свойства, необходимые для последующего формования.

Для расчета температуры воды t_w , °С, по заданной температуре теста, температуры макаронного теста t_m , °С, и необходимой температуры муки t_m , °С, по заданной температуре воды и теста пользуются формулами (2.1) - (2.3) и соответствующими данными (таблица 2.1).

Расход муки на 1 т готовых изделий и количество воды, необходимое для получения теста, требуемой влажности, определяются по формулам (2.4), (2.5).

$$t_w = \frac{Tt_1c_1 - Mt_m c_m - \Gamma M}{B}, \quad (2.1)$$

$$t_m = \frac{Mt_M c_M + Bt_B + \Gamma M}{T c_M}, \quad (2.2)$$

$$t_M = \frac{T t_m c_m - B t_B - \Gamma M}{M c_M}, \quad (2.3)$$

где T - масса полученного теста, кг;

c_m - удельная теплоемкость теста, кДж/(кг·К);

M - масса муки на замес теста, кг;

c_M - удельная теплоемкость муки, кДж/(кг·К);

Γ - теплота гидратации 1 кг муки, израсходованной на замес теста, кДж/(кг·К);

B - масса воды на замес теста, кг.

Таблица 2.1 - Теплофизические характеристики муки и макаронного теста

Влажность, %	Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К)		Теплота гидратации Γ , кДж/(кг·К)
	муки	макаронного теста	
1	2	3	4
10,0	-	-	16,70
10,5	-	-	14,60
11,0	1,93	-	12,90
11,5	1,95	-	11,70
12,0	1,96	-	9,04
12,5	1,97	-	8,79
13,0	1,98	-	7,53
13,5	2,00	-	6,27
14,0	2,01	-	5,44
14,5	2,02	-	4,60
14,0	2,03	-	3,76
15,5	2,05	-	2,93
28,0	-	2,36	-
28,5	-	2,37	-
29,0	-	2,40	-
29,5	-	2,40	-
20,0	-	2,41	-
30,5	-	2,42	-
31,0	-	2,44	-
31,5	-	2,45	-
32,0	-	2,46	-
32,5	-	2,47	-

$$M = 1000 \frac{100 - W_{\text{и}}}{100 - W_{\text{м}}} + M_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

$$B = \frac{M(W_{\text{м}} - W_{\text{и}})}{100 - W_{\text{м}}}, \quad (2.5)$$

где $W_{\text{и}}$, $W_{\text{м}}$, $W_{\text{м}}$ - соответственно влажность готовых изделий, муки, теста, %;

$M_{\text{п}}$ - механические потери муки, кг/т, $M_{\text{п}} = (0,36-0,60)$.

2.2 Расчет макаронного пресса

2.2.1 Задание

Выполнить расчет по заданным вариантам (таблица 2.2), если заданы: S - шаг шнека, м; l - длина шнека дозатора муки, м; τ - продолжительность замеса теста, ч; $Q'_{\text{п}}$ - производительность макаронного пресса по готовым изделиям, кг/ч; $n_{\text{м}}$ - частота вращения месильного органа, мин^{-1} ; $n_{\text{ш}}$ - максимальная частота вращения шнека, мин^{-1} ; p - давление прессования, МПа; $W_{\text{м}}$ - начальная влажность макаронного теста, %; n_0 - число формирующих отверстий в матрице, шт.; вид макаронного изделия.

2.2.2 Методика расчета

Расчет дозирующего устройства. Производительность шнекового дозатора муки $Q_{\text{м}}$, кг/ч [2]

$$Q_{\text{м}} = \frac{60\pi D^2 - d^2}{4} S \cdot n \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \varphi, \quad (2.1)$$

где D - наружный диаметр спирали шнека, м ($D = 0,18-0,20$ м);

d - диаметр вала шнека, м ($d = D/2$);

S - шаг шнека, м;

n - частота вращения шнека, мин^{-1} ($n = 20-24$ мин^{-1});

$\rho_{\text{м}}$ - насыпная плотность муки, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\rho_{\text{м}} = 600$ $\text{кг}/\text{м}^3$);

φ - коэффициент заполнения ($\varphi = 0,8$).

Производительность дозатора воды $Q_{\text{в}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$

$$Q_{\text{в}} = v \cdot n_g \cdot k, \quad (2.2)$$

где v - вместимость одного кармана, м^3 ($v = (0,2-0,3) \cdot 10^{-3}$ м^3);

n_g - количество отмериваемых доз в час ($n_g = 1000-1100$ доз/ч);
 κ - коэффициент заполнения кармана водой ($\kappa = 0,4-0,5$).

Таблица 2.2 - Варианты индивидуальных заданий

Вар.	S , м	l , м	τ , ч	$Q'_п$, кг/ч	n_m , мин ⁻¹	$n_{ш}$, мин ⁻¹	P , МПа	W_m , %	n_0 , шт.	Вид изделия	Чертеж пресса
1	0,13	0,40	0,16	375	80	41	6,0	29,0	464	Макароны обыкновенные	ЛПЛ-2М
2	0,14	0,42	0,18	380	81	40	7,0	29,5	480		
3	0,15	0,45	0,20	385	82	43	6,0	30,0	520		
4	0,16	0,48	0,16	390	83	44	7,0	30,5	520		
5	0,17	0,50	0,20	395	85	45	6,0	31,0	600		
6	0,14	0,52	0,18	400	86	41	7,0	31,5	480		
7	0,15	0,55	0,16	375	88	42	6,0	32,0	520		
8	0,16	0,60	0,20	380	90	43	7,0	32,5	520		
9	0,17	0,60	0,28	490	60	20	9,0	29,0	1938		
10	0,16	0,55	0,30	495	62	21	10,0	29,5	1735	Вермишель	Б6-ЛПМ-500
11	0,15	0,52	0,32	500	64	22	9,0	30,0	1122		
12	0,14	0,50	0,28	505	66	23	10,0	30,5	1020		
13	0,13	0,48	0,30	510	68	24	9,0	31,0	1938		
14	0,15	0,45	0,32	515	70	24	10,0	30,5	1735		
15	0,16	0,42	0,28	520	72	23	9,0	30,0	1122		
16	0,17	0,40	0,30	525	75	26	10,0	29,5	1020		
17	0,14	0,60	0,28	980	60	22	11,0	29,0	1200	Лапша	Б6-ЛПШ-1000
18	0,15	0,58	0,30	985	62	23	12,0	29,5	1140		
19	0,16	0,55	0,32	990	64	24	11,0	30,0	425		
20	0,17	0,52	0,28	1000	66	25	12,0	30,5	436		
21	0,13	0,50	0,30	1005	68	26	11,0	31,0	400		
22	0,15	0,48	0,32	1010	70	24	12,0	31,0	436		
23	0,16	0,45	0,28	1015	72	23	11,0	30,5	1140		
24	0,17	0,42	0,30	1020	74	24	12,0	30,0	1200		
25	0,14	0,40	0,32	1025	76	25	12,0	29,5	436		

Потребляемая дозаторами мощность N , кВт

$$N = \frac{Q_m \cdot l \cdot k_1 \cdot k_2}{1000\eta}, \quad (2.3)$$

где l - длина пути перемещения муки, м;

k_1 - коэффициент сопротивления перемещению муки в корпусе дозатора ($k_1 = 1,2$);

k_2 - коэффициент, учитывающий потери на трение в подшипниках ($k_2 = 1,1-1,2$);

η - КПД привода ($\eta = 0,8-0,9$).

Расчет тестосмесителя. Суммарная вместимость месильных корыт для заданной производительности прессы $V, \text{ м}^3$

$$V = \frac{Q_{\text{п}} \cdot \tau}{\rho_{\text{м}} \cdot k}, \quad (2.4)$$

где $Q_{\text{п}}$ - производительность прессы по сырым изделиям, кг/ч;

τ - продолжительность замеса, ч;

$\rho_{\text{м}}$ - плотность теста, кг/м^3 (таблица 2.3);

k - коэффициент заполнения корыта тестом ($k = 0,5-0,75$).

Таблица 2.3 - Плотность и насыпная плотность муки, полуфабрикатов и макаронных изделий

Продукт	Влажность продукта $W, \%$	Плотность $\rho, \text{ кг/м}^3$	Насыпная плотность $\rho_{\text{н}}, \text{ кг/м}^3$	
			без утряски	с утряской
Мука из пшеницы:				
высшего сорта	12,6-14,4	1460	677	770-900
I сорта	12,2-13,7	1460	600	725-900
Тесто (в тестосмесителе)	29,0-31,0	1250	719	789
Тесто спрессованное	28,0-33,0	1392-1447	-	-
Полуфабрикаты:				
макароны особые	27,0-30,8	1320	637	727
макароны соломка	28,8-29,5	1280	612	771
вермишель	28,8-29,2	1280	516	616
рожки	29,4	1250	581	671
Готовые изделия:				
макароны особые	12,8-13,6	1330	411	452
макароны соломка	12,0-13,7	1320	305	368
вермишель	10,4-13,3	1300	346	408
лапша	12,8-13,7	1300	352	433
ракушки	10,8	1250	389	422

$$Q_{\text{п}} = \frac{Q'_{\text{п}}(100 - W_{\text{изд}})}{100 - W_{\text{т}}}, \quad (2.5)$$

где $Q'_{\text{п}}$ - производительность прессы по сухим изделиям, кг/ч;

$W_{\text{изд}}$ - влажность сухих изделий, % ($W_{\text{изд}} = 13 \%$);

$W_{\text{т}}$ - влажность теста, %.

Общая длина месильных корыт $L, \text{ м}$

$$L = \frac{V}{S_m}, \quad (2.6)$$

где S_m - площадь поперечного сечения корыта, м².

$$S_m = \frac{\pi b^2}{2 + h - \frac{b}{2}}, \quad (2.7)$$

где b - ширина корыта, м ($b = 0,38-0,42$ м);
 h - высота корыта, м ($h = 0,40-0,54$ м).

Производительность тестосмесителя Q_m , кг/ч

$$Q_m = \frac{(100 - W_m)V \cdot \rho_n \cdot k \cdot \tau}{100 - W_{изд}}, \quad (2.8)$$

где $\rho_n = 719$ кг/м³ - насыпная плотность теста (таблица 2.3).
 Потребная мощность на замес теста N_m , кВт

$$N_m = \frac{0,45V \cdot k_3 \cdot \rho_m \cdot R \cdot \omega \cdot g}{1000}, \quad (2.9)$$

где V - вместимость месильных корыт, м³;
 k_3 - коэффициент заполнения корыт тестом ($k_3 = 0,8$);
 ρ_m - плотность теста, кг/ м³ (таблица 2.3);
 R - максимальный радиус месильного органа, м;
 ω - угловая скорость вращения месильного органа, рад/с;
 $g = 9,81$ м/с² - ускорение свободного падения.

Расчет прессующего устройства. Фактическая производительность макаронного пресса по сырым изделиям должна быть равна производительности тестосмесителя.

Производительность нагнетающего шнека Q_ϕ , кг/ч

$$Q_\phi = 0,25m' \cdot \rho_m \cdot m \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot S_{ш} - \frac{B_2 + B_1}{2 \cos \alpha} \cdot n_{ш} \cdot k_n \cdot k_n \cdot k_c, \quad (2.10)$$

где m' - число заходов шнека ($m' = 1$ для вермишели, $m' = 3$ для лапши и макарон);

ρ_m - плотность спрессованного теста, кг/м³ ($\rho_m = 1430$ кг/м³);

m - количество прессующих шнеков, ($m = 1$ или 2);

R_2 и R_1 - соответственно наружный и внутренний радиус шнека, м

$$(R_2 = 0,060 \text{ м}, R_1 = 0,027 \text{ м});$$

$S_{\text{ш}}$ - шаг витков винтовой линии шнека, м;

b_2 - ширина винтовой лопасти шнека в нормальном сечении по наружному радиусу, м ($b_2 = 25 \cdot 10^{-3}$ м);

b_1 - ширина винтовой лопасти шнека в нормальном сечении по внутреннему радиусу, м ($b_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ м);

α - угол подъема винтовой лопасти по среднему диаметру шнека, град.

$n_{\text{ш}}$ - максимальная частота вращения шнека, мин^{-1} ;

$k_{\text{н}}$ - коэффициент наполнения полости шнека тестом (рисунок 2.1);

$k_{\text{п}}$ - коэффициент прессования теста, учитывает степень уменьшения его объема в шнековом канале при переходе его из крошкообразного состояния в спрессованное;

$k_{\text{с}}$ - коэффициент, характеризующий подачу теста шнеком, т.е. качество прессования ($k_{\text{с}} = 0,9-0,95$).

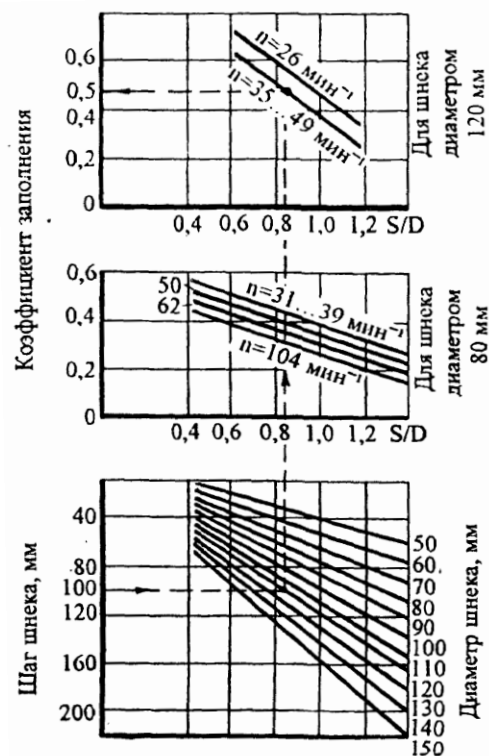


Рисунок 2.1 - Номограмма для определения коэффициента наполнения полости шнека тестом

$$S_{\text{ш}} = m \cdot S_0, \quad (2.11)$$

где S_0 - расстояние между смежными витками, ($S_0 = 0,1$ м).

$$\text{tg} \alpha = \frac{S}{2\pi R_{\text{ср}}}, \quad (2.12)$$

где R_{cp} - средний радиус шнека, м, $R_{cp} = (R_1 + R_2)/2$.

Коэффициент прессования теста

$$k_n = \frac{\rho_n}{\left(12,9 - \frac{176,7}{W_m}\right) 10^{-3} \cdot P + 1,373}, \quad (2.13)$$

где ρ_n - плотность теста, кг/м³ ($\rho_n = 719$ кг/м³);

W_m - начальная влажность теста, %;

P - давление прессования, МПа.

Мощность привода прессующего шнека N_m , кВт

$$N_m = 215P \cdot n_{ш} \cdot tg \alpha (R_2^3 - R_1^3), \quad (2.14)$$

где P - давление прессования, МПа;

$n_{ш}$ - частота вращения шнека, мин⁻¹;

R_1 и R_2 - внутренний и наружный радиусы шнеков, м.

Расчет матриц. Для матрицы выполняют технологический расчет, который заключается в определении ее производительности и соответствующего диаметра.

Производительность матрицы по сухим изделиям Π , кг/ч

$$\Pi = 3600v_n \cdot \rho_m \cdot f \frac{100 - W_m}{100 - W_{изд}}, \quad (2.15)$$

где v_n - скорость течения теста по формирующим каналам, м/с;

ρ_m - плотность спрессованного теста, кг/м³;

f - площадь живого сечения матрицы, м²;

W_m - влажность теста, %;

$W_{изд}$ - влажность готовых изделий, % ($W_{изд} = 13$ %).

Площадь живого сечения матриц, м², в зависимости от вида изделий:

а) для трубчатых изделий (для макарон)

$$f_m = \frac{\pi}{4} \cdot n_0 (d_n^2 - d_b^2), \quad (2.16)$$

где n_0 - число формирующих отверстий в матрице, шт. ($n_0 = 600$ шт.);
 d_n - наружный диаметр формирующего отверстия, м ($d_n = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м);
 d_b - диаметр вкладыша, м ($d_b = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м);
 б) для вермишели

$$f_b = \frac{\pi}{4} \cdot n_0 \cdot d_b^2, \quad (2.17)$$

где n_0 - число формирующих отверстий в матрице ($n_0 = 1938$);
 d_b - диаметр формирующего отверстия, м ($d_b = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м);

в) для лапши

$$f_l = n_0 \cdot l \cdot a, \quad (2.18)$$

где n_0 - число формирующих отверстий в матрице, шт. ($n_0 = 1140$ шт.);
 l - длина формирующей щели, м ($l = 4,0 \cdot 10^{-3}$ м);
 a - ширина формирующей щели, м ($a = 10^{-3}$ м).
 Площадь матрицы F , м²

$$F = \frac{f}{k_f}, \quad (2.19)$$

где k_f - коэффициент живого сечения матрицы (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Коэффициенты живого сечения макаронных матриц некоторых типов

Ассортимент	Число отверстий в матрице	k_f
Макароны диаметром, мм		
7,0	520	0,203
7,0	520	0,216
5,5	464	0,187
5,5	600	0,137
Рожки диаметром, мм		
5,0	462	0,156
5,5	454	0,149
Вермишель диаметром 1,5 мм	1938	0,15
Вермишель диаметром 2,5 мм	1122	0,062
Лапша размером, мм:		
5,0×1,0	436	0,02
4,0×1,0	1140	0,079

Диаметр матрицы D , м
а) для круглых матриц

$$D = \frac{4F}{\pi} . \quad (2.20)$$

б) длина прямоугольных матриц L , м,

$$L = \frac{F}{B} , \quad (2.21)$$

где B - ширина прямоугольной матрицы, м ($B = 0,1$ м).

Скорость течения (выпрессовывания) теста по формующим каналам в зависимости от формы сечения канала v_n , м/с

а) для трубчатых изделий (макарон)

$$v_n = v_0 + \frac{1}{4\mu} \Delta p + \rho_m \cdot g \ln \frac{R_H}{R_B}^{-1} R_H^2 - R_B^2 \ln \frac{r}{R_B} - r^2 - R_B^2 \ln \frac{R_H}{R_B} , \quad (2.22)$$

где v_0 - скорость скольжения (принимается $v_0 = 0$);

μ - динамическая вязкость, зависит от влажности макаронного теста, Па·с; ($\mu = 0,4 \cdot 10^4 - 0,3 \cdot 10^6$ Па·с);

Δp - перепад давления по длине формующего канала, Па·с,
 $\Delta p = (2-6)10^6$ Па;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

R_H и R_B - соответственно наружный и внутренний радиус отверстия трубки макарон (рисунок 2.2), м;

r - радиус от оси кольцевого канала, м.

$$r = \frac{R_H - R_B}{2} + R_B . \quad (2.23)$$

б) для вермишели

$$v_n = v_0 + \frac{R^2}{4\mu} (\Delta p + \rho_m \cdot g) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] , \quad (2.24)$$

где R - радиус сечения формующего отверстия, м; $r = R/2$, м;

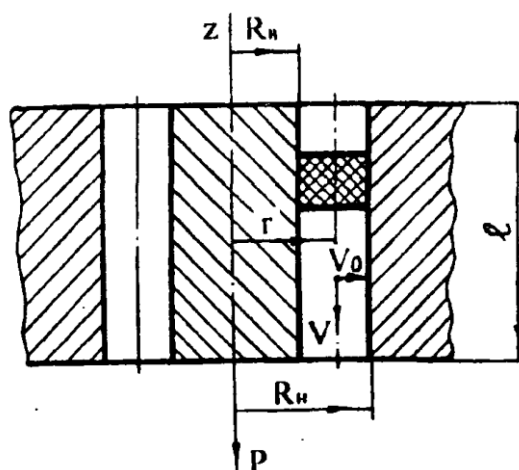


Рисунок 2.2 - Схема течения теста в кольцевом канале

в) для лапши

$$v_n = v_0 + \frac{1}{4\mu} (\Delta p + \rho_m \cdot g) \left(\frac{l^2 - a^2}{2} \right), \quad (2.25)$$

где l и a - соответственно длина и ширина формирующего отверстия, м.

Подставив в формулу (2.15) рассчитанные величины, получим производительность матрицы по готовым изделиям.

Расчет на прочность проводят с целью определения допустимой нагрузки (давление прессования) на матрицу, и для прямоугольных матриц толщина матрицы δ , м

$$\delta = B \sqrt{\frac{A \cdot P}{\sigma}}, \quad (2.26)$$

где B - ширина матрицы, м;

A - коэффициент, который, в зависимости от диаметра отверстий и числа продольных рядов в матрице, составляет 1,40-13,7;

P - расчетное давление прессования, Па;

σ - допустимое напряжение материала матрицы, Па
($\sigma = 140-160$ МПа).

2.3 Расчет экструдера

2.3.1 Задание

Выполнить расчет экструдера по заданным вариантам (таблица 2.7), если заданы: μ - динамическая вязкость продукта ($\mu = 1,03 \cdot 10^{-6}$ Па·с); R, r - радиусы сечений отверстий в матрице, мм; L_1 - длина канала в матрице, мм; ω - угловая скорость вращения шнека, рад/с; S - шаг шнека, мм; D_k - диаметр внутренней поверхности корпуса, мм; φ - угол подъема винтовой линии шнека, град; H - высота шнекового канала, мм.

Таблица 2.7 - Варианты индивидуальных заданий

№ Вар.	R , мм	r , мм	L_1 , мм	Форма отверстий	ω , рад/с	S , мм	D_k , мм	φ	H , мм	Марка экструдера
1	9,0	3,0	28	Кольцевая	1,0	13	88	19°27'44"	12,5	Б8-КХ-3П
2	8,5	3,0	27	Коническая	1,1	13	88	19°27'44"	12,5	
3	8,0	3,1	26	Щелевая	1,1	13	88	19°27'44"	12,5	
4	7,5	3,0	25	Прямоугольная	1,0	13	88	19°27'44"	12,5	
5	9,0	3,5	25	Овальная	1,2	13	88	19°27'44"	12,5	
6	8,5	3,4	26	Эллиптическая	0,9	13	88	19°27'44"	12,5	
7	8,0	3,1	27	Корытообразная	1,3	13	88	19°27'44"	12,5	
8	7,5	3,3	28	Кольцевая	1,2	13	88	19°27'44"	12,5	
9	8,4	3,2	29	Коническая	1,4	13	88	19°27'44"	12,5	Р3-КЭД-88
10	8,2	3,0	30	Щелевая	1,3	13	88	19°27'44"	12,5	
11	8,0	2,9	28	Прямоугольная	0,9	16	91	18°01'12"	15,5	
12	8,1	3,0	27	Овальная	1,3	16	91	18°01'12"	15,5	
13	8,2	3,1	26	Эллиптическая	1,1	16	91	18°01'12"	15,5	
14	8,3	3,2	25	корытообразная	1,2	16	91	18°01'12"	15,5	
15	8,4	3,3	28	Кольцевая	1,2	16	91	18°01'12"	15,5	
16	8,5	3,4	29	Коническая	1,1	16	91	18°01'12"	15,5	
17	8,6	3,5	30	Щелевая	1,3	16	91	18°01'12"	15,5	Р3-КЭД-88
18	8,7	3,5	31	Прямоугольная	1,0	16	91	18°01'12"	15,5	
19	8,8	3,6	30	Овальная	1,3	16	91	18°01'12"	15,5	
20	8,9	3,6	29	Эллиптическая	1,2	16	91	18°01'12"	15,5	
21	9,0	3,7	28	Корытообразная	1,2	16	91	18°01'12"	15,5	
22	8,9	3,2	27	Кольцевая	1,3	16	91	18°01'12"	15,5	
23	8,8	3,3	26	Коническая	1,4	16	91	18°01'12"	15,5	
24	8,7	3,4	28	Щелевая	1,5	16	91	18°01'12"	15,5	
25	8,6	3,1	30	Прямоугольная	1,5	16	91	18°01'12"	15,5	

2.3.2 Методика расчета

[2] Расходно-напорная характеристика формирующей части (головки) Q_{ϕ} , м³/с

$$Q_{\phi} = \frac{k_{\phi}}{\mu} \Delta p \cdot 10^{-9}, \quad (2.27)$$

где k_{ϕ} - коэффициент геометрии формирующего органа (матрицы).
Для кольцевого отверстия k_{ϕ} , м³ (рисунок 2.3а)

$$k_{\phi} = \frac{(\pi D + h)h^3 \cdot 10^{-9}}{12L_1}, \quad (2.28)$$

где D - средний диаметр кольцевого отверстия $D = 2R - h$;

h - ширина кольцевого зазора $h = R - r$.

Для конического отверстия, м³ (рисунок 2.3б)

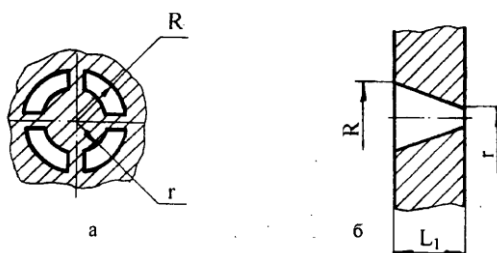


Рисунок 2.3 - Матрица с кольцевым (а) и с коническим (б) отверстием

$$k_{\phi} = \frac{3\pi R^3 \cdot r^3 (R - r) \cdot 10^{-9}}{8L_1 (R^3 - r^3)}. \quad (2.29)$$

Для суживающегося или расширяющегося мелкого (щелевого) канала k_{ϕ} , м³

$$k_{\phi} = \frac{B \cdot h_1^2 \cdot h_2^2 \cdot \tan \gamma}{3(h_1^2 - h_2^2)}, \quad (2.30)$$

где B - ширина канала, м ($B = 0,014$ м);

γ - угол наклона стенки к осевой плоскости, град ($\gamma = 45^\circ$);

h_1, h_2 - высота крайних сечений, м.

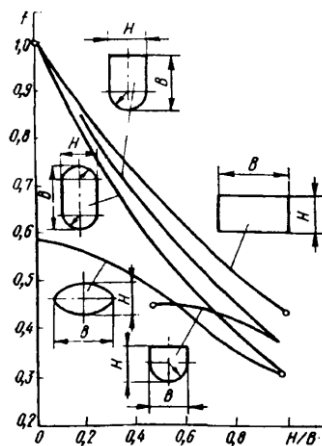
Для канала произвольного постоянного по длине сечения (рисунок 2.4)

$$k_{\phi} = \frac{F}{2LP}, \quad (2.31)$$

где F - площадь сечения, м;
 L - длина канала, м;
 P - периметр сечения. м.

$$k_{\phi} = \frac{BH^3}{12L} f, \quad (2.32)$$

где B и H - соответственно максимальный и минимальный размер сечения, м;
 f - характеристика потока, зависящая от формы и размеров сечения (принимается $B = R$ и $H = r$).



1-прямоугольная; 2 - корытообразная; 3 - овальная; 4 - эллиптическая.

Рисунок 2.4 - Графики для определения характеристики потока f каналов различных поперечных сечений

Скорость продукта вдоль винтового канала v_z , м/с

$$v_z = \frac{\Delta p}{4\mu L_2} R^2 - r^2, \quad (2.33)$$

где Δp - перепад давления, создаваемый экструдером, Па, рассчитываемый по формуле (2.38);

R, r - радиусы сечений отверстий в матрице, м;

μ - динамическая вязкость продукта, Пас ($\mu = 1,03 \cdot 10^{-6}$ Па с);

L_2 - длина шнекового канала, м.

Расходно-напорная характеристика нагнетающей части, м³/с

$$Q_n = \left(k_{n1} \omega - \frac{k_{n2}}{\mu} \Delta p \right) 10^{-9}, \quad (2.34)$$

где k_{n1} и k_{n2} - коэффициенты геометрии шнекового нагнетателя, м^3 .

$$k_{n1} = 10^{-9} \pi D_k \frac{BH}{2} \cos \varphi. \quad (2.35)$$

$$k_{n2} = 10^{-9} \frac{BH^3}{12L_2}, \quad (2.36)$$

где L_2 - длина шнекового канала,

$$L_2 = 10^{-3} \sqrt{S^2 + [\pi(D_k - H)]^2}, \quad (2.37)$$

где $B = 14$ мм - ширина шнекового канала.

Перепад давления, создаваемый экструдером, Δp , Па

$$\Delta p = \frac{k_{n1}}{k_{n1} + k_\phi} \mu \cdot \omega. \quad (2.38)$$

Производительность экструдера Q_3 , $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q_3 = \frac{k_{n1} \cdot k_\phi}{k_{n1} + k_\phi} \cdot \omega. \quad (2.39)$$

Построить совмещенные расходно-напорные характеристики нагнетающего и формующего рабочих органов для анализа выбора пары нагнетатель - формующий орган.

По результатам анализа графических зависимостей $Q_n = f(\Delta p)$ и $Q_\phi = \varphi(\Delta p)$ (рисунок 2.5) определить величину оптимального перепада давления и соответствующей производительности экструдера.[2]

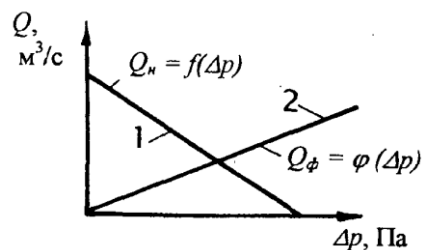


Рисунок 2.5 - Расходно-напорные характеристики нагнетающего и формирующего рабочих органов экструдера

3 Практическая работа №3 Технологическое оборудование для сушки пищевых продуктов

Цель работы: изучение теоретических основ процесса сушки; знакомство с классификацией сушилок; устройством и принципом их работы; выполнение расчета барабанной и ленточной сушилок.

3.1 Ленточные сушилки

Используются для сушки растительного сырья, полуфабрикатов и т.п.

Ленточная сушилка представляет собой коридор, в котором размещен ленточный транспортер, несущий высушиваемый материал. Ленточные сушилки могут работать с циркуляцией и промежуточным подогревом воздуха. В качестве агента сушки используются воздух, топочные газы или перегретый пар [2].

3.2 Барабанные сушилки

К барабанным относятся горизонтальные цилиндрические сушилки с вращающимся или неподвижным корпусом. В первом случае вместе с барабаном вращается внутренняя насадка (рисунок 3.1), обеспечивающая перемешивание материала, во втором - специальное перемешивающее устройство. По способу подвода теплоты барабанные сушилки делятся на конвективные (прямого действия), контактные (непрямого действия) и комбинированные (смешанного действия).

Интенсификация барабанных конвективных сушилок обеспечивается усо-

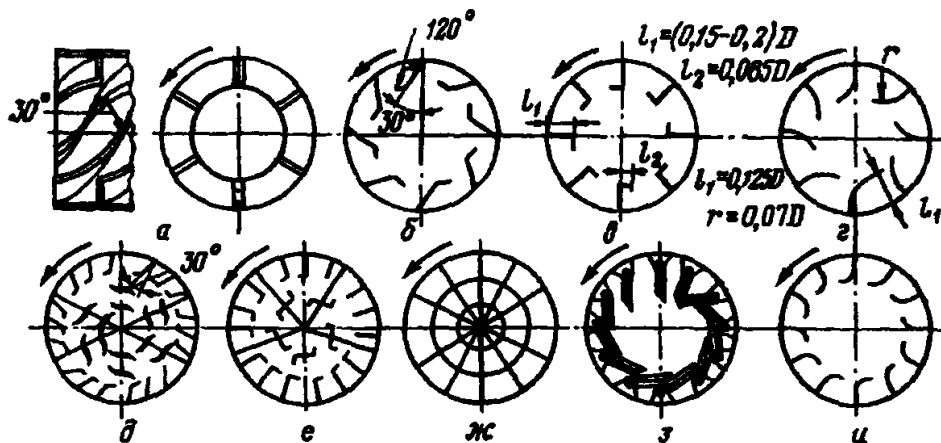
вершенствованием конструкции внутренней насадки, увеличивающей количество сыпи.

Для оценки эффективности насадки предложена приближенная зависимость [2]

$$K_{эф} = 0,45n \bar{h} , \quad (3.1)$$

где n - частота вращения, об/мин;

h - средняя высота слоя, м.



а - винтовая распределительная (приемно-винтовая); б, в, г, и - подъемно-лопастная; д, е - лопастная секторная; ж - секторная (перевалочная); з - самоочищающиеся лопатки.

Рисунок 3.1 - Схемы некоторых внутренних насадок барабанных сушилок

3.3 Оборудование для сушки коротких макаронных изделий

Сушка коротких макаронных изделий, как правило, включает две стадии - предварительную и окончательную. Сушка протекает в непрерывном потоке в двух последовательно установленных сушилках.

Предварительная сушилка ленточного типа обеспечивает за сравнительно непродолжительный период удаление из полуфабриката до 8 % влаги. Внутри сушильной камеры размещаются 9 горизонтальных ленточных конвейеров.

Окончательная сушилка ленточного типа снижает влажность сырых короткорезанных изделий до стандартных значений и по сравнению с предварительной сушилкой имеет следующие отличия.

Сушка изделий производится на 11 ленточных конвейерах, которые имеют различную скорость движения. Это достигается за счет различного числа зубьев на звездочках ведущих барабанов и ступенчатого регулирования (четыре диапа-

зона) привода с помощью клиноременной передачи. Максимальная продолжительность окончательной сушки 10,5 ч, минимальная - 6,8 ч.

3.4 Оборудование для сушки длинных макаронных изделий

В зависимости от способа размещения изделий внутри сушилки оборудование для сушки длинных макаронных изделий можно разделить на три основные группы:

- первая объединяет группу сушилок, в которых применяется способ сушки макарон в лотковых кассетах. Это шкафные сушилки периодического действия и механизированные туннельные сушилки. Сушильное оборудование этой группы применяется на предприятиях средней и малой мощности, где ввиду недостатка производственных площадей нет возможности установить автоматизированные линии;

- вторая группа конвейерных сушилок непрерывного действия применяется в автоматизированных линиях, где используется подвесной способ сушки на бастунах;

- третья группа конвейерных сушилок непрерывного действия представлена в автоматизированных линиях с комбинированным способом сушки в предварительной сушилке - на рамках, в окончательной - в цилиндрических кассетах. Эти сушилки получили ограниченное применение.

3.5 Расчет ленточной сушилки

3.5.1 Задание

Выполнить расчет ленточной сушилки по заданным вариантам (таблица 3.1), если заданы: производительность $G_{м.к.}$, кг/ч; влагосодержание высушиваемого продукта, кг/кг (таблица 3.2): начальное U_o , критическое $U_{кр}$, конечное U_k , равновесное U_p ; допустимая температура нагрева продукта $\theta_{доп} = (120-125)^\circ\text{C}$; вид высушиваемого продукта; продолжительность сушки τ , мин. [2]

3.5.2 Методика расчета

Рассчитаем производительность сушилки, кг/ч:
по абсолютно сухому продукту G_m

$$G_m = \frac{G_{м.к.}}{1 + U_k}. \quad (3.2)$$

Таблица 3.1 - Варианты индивидуальных заданий

Вар.	Производительность $G_{м.к.}$, кг/ч	Вид высушиваемой крупы	Время сушки τ , мин	Начальная температура продукта θ_0 , °C
1	2	3	4	5
1	530	Овсяная	45	23
2	735	Рисовая	45	22
3	540	Гречневая	45	21
4	545	Перловая	45	20
5	550	Пшеничная	45	19
6	555	Гороховая	45	18
7.	560	Пшеничная	45	19
8	870	Овсяная	47	20
9	1075	Рисовая	47	21
10	880	Гречневая	47	22
11	885	Перловая	47	23
12	890	Пшеничная	47	24
13	895	Гороховая	47	25
14	900	Пшеничная	47	23
15	1740	Овсяная	49	22
16	1990	Рисовая	49	21
17	1760	Гречневая	49	20
18	1770	Перловая	49	19
19	1780	Пшеничная	49	18
20	1790	Гороховая	49	19
21	1795	Пшеничная	49	20
22	550	Гречневая	51	21
23	755	Рисовая	51	22
24	560	Перловая	51	23
25	565	Пшеничная	51	24

по исходному продукту $G_{мо}$

$$G_{мо} = G_{м.к.} + W. \quad (3.3)$$

по испаряемой влаге W

$$W = G_m \cdot \Delta U, \quad (3.4)$$

где ΔU - изменения влагосодержания продукта, кг/кг

$$\Delta U = U_0 - U_k. \quad (3.5)$$

Температурный режим сушилки выберем по фактору термообработки из условия $\Phi_m \leq 1$. Учитывая, что $\tau \geq \tau^*$ и обеспечивается высокая степень перемешивания воздуха, воспользуемся формулой

$$\Phi_m = \frac{t_0 + t_k}{2\theta_{\text{доп}}} \leq 1, \quad (3.6)$$

где t_k - конечная температура продукта, °С, $t_k = 40$ °С.
Тогда из формулы (3.6) определим t_0 , °С

$$t_0 = 2\theta_{\text{доп}} - t_k. \quad (3.7)$$

Температура продукта на выходе из сушилки θ_k , °С

$$\theta_k = 0,9t_k. \quad (3.8)$$

Удельный расход теплоты на нагрев материала q_m , кДж/кг

$$q_m = c_m + c_b U_k \theta_k - \theta_0 \Delta U, \quad (3.9)$$

где c_m - удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К) (таблица 3.2);

$c_b = 4,187$ кДж/(кг·К) - удельная теплоемкость воды.

Средняя удельная теплота связанной влаги q_c , кДж/кг

$$q_c = \frac{a U_{\text{кр}} - U_k^2}{2\Delta U}, \quad (3.10)$$

где $a = 4200$ кДж/кг - постоянная величина.

Принимаем удельные тепловые потери $q_{\text{пм}} = 250$ кДж/кг. При установившемся процессе расход теплоты на нагрев транспортных средств отсутствует.

Изменение энтальпии сушильного агента Δi , кДж/кг

$$\Delta i = c_b \theta_0 - q_m - q_c - q_{\text{пм}}, \quad (3.11)$$

где θ_0 - начальная температура материала, °С;

$c_b = 4,187$ кДж/(кг·К) - удельная теплоемкость воды.

Таблица 3.2 - Некоторые характеристики вареных круп

Наименование крупы	Удельная теплоемкость продукта c_m , кДж/(кг·К)	Насыпная плотность продукта $\rho_{нс}$, кг/м ³	Плотность частиц продукта $\rho_{м.к.}$, кг/м ³	Влагосодержание, кг/кг			
				начальное U_0	критическое $U_{кр}$	конечное U_k	равновесное U_p
Овсяная	1,40-1,80	700	1320	0,36-0,42	0,21-0,23	0,10	0,114
Рисовая	1,57-1,78	872	1430	0,28-0,31	0,19-0,20	0,10	0,113
Гречневая	1,17-1,38	825	1220	0,40-0,43	0,21-0,22	0,10	0,114
Перловая	1,75-2,01	824	1410	0,38-0,42	0,20-0,21	0,10	0,114
Пшеничная	1,38-1,78	734	1380	0,39-0,44	0,21-0,22	0,10	0,114
Горох	1,30-1,76	745	1390	0,32-0,36	0,22-0,23	0,10	0,116
Пшенная	1,50-1,70	770	1500	0,36-0,41	0,20-0,21	0,10	0,114

Энтальпия воздуха в начале процесса I_0 , кДж/кг

$$I_0 = c_r t_0 + r_0 + c_n t_0 X_0, \quad (3.12)$$

где c_r - удельная теплоемкость наружного воздуха, кДж/(кг·К),

$c_r = 1,006$ кДж/(кг·К);

r_0 - удельная теплота парообразования при 0 °С, кДж/кг

($r_0 = 2495$ кДж/кг);

$c_n = 1,965$ кДж/(кг·К) - удельная теплоемкость пара;

X_0 - начальное влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер, кг/кг ($X_0 = 0,01$ кг/кг).

Энтальпия пара, содержащегося в воздухе, в конце процесса $I_{п.к.}$, кДж/кг

$$I_{п.к.} = r_0 + c_n t_{к.} \quad (3.13)$$

Энтальпия воздуха в конце процесса I_k , кДж/кг

$$I_k = \frac{c_r t_{к.} \Delta i + I_{п.к.} (X_0 \Delta i - I_0)}{\Delta i - I_{п.к.}}. \quad (3.14)$$

Влагосодержание воздуха в конце процесса X_k , кг/кг

$$X_k = \frac{I_k - I_0}{\Delta i + X_0}. \quad (3.15)$$

Изменение влагосодержания воздуха ΔX , кг/кг

$$\Delta X = X_k - X_0. \quad (3.16)$$

Удельный расход воздуха σ , кг/кг

$$\sigma = \frac{\Delta U}{\Delta X}. \quad (3.17)$$

Расход воздуха L , кг/ч

$$L = \sigma G_m. \quad (3.18)$$

Масса сухого материала в сушилке g_m , кг

$$g_m = G_m \cdot \tau, \quad (3.19)$$

где τ - продолжительность сушки, ч.

Требуемая площадь поверхности ленты $S_{л}$, м²

$$S_{л} = \frac{g_m}{g_m^*}, \quad (3.20)$$

где $g_m^* = 25-35$ кг/м² - нагрузка сухого материала на ленту.

Нагрузка на ленту в начале процесса $g_{м0}^*$, кг/м²

$$g_{м0}^* = g_m^* (1 + U_0). \quad (3.21)$$

Нагрузка на ленту в конце процесса $g_{м.к}^*$, кг/м²

$$g_{м.к}^* = g_m^* (1 + U_k). \quad (3.22)$$

Высота слоя материала на ленте h , м

$$h = \frac{g_{м.к}^*}{\rho_{нс}}, \quad (3.23)$$

где $\rho_{нс}$ - насыпная плотность продукта, кг/м³ (таблица 3.2).

3.6 Расчет барабанной сушилки

3.6.1 Задание

Выполнить расчет прямоточной барабанной сушилки по заданным вариантам (таблица 3.3), если заданы: производительность по готовому продукту $G_{мк}$, кг/ч; температура продукта, °С: начальная θ_0 , конечная θ_k ; температура теплоносителя, °С: начальная t_0 , конечная t_k ; температура наружного воздуха $t_{вх} = 18$ °С - 23 °С; вид высушиваемого продукта; вид насадки.

3.6.2 Методика расчета

Для удобства расчетов переведем относительную влажность W , %, материала в абсолютное влагосодержание U_0 , кг/кг

$$U_0 = \frac{W_0}{100 - W_0}, \quad (3.24)$$

где W_0 - начальная влажность продукта, %;

Таблица 3.3 - Варианты индивидуальных заданий

Вар.	Вид продукта	Производительность $G_{МК}$, кг/ч	Температура продукта, °С		Температура теплоносителя, °С		Вид насадки
			начальная θ_0	конечная θ_k	начальная t_0	конечная t_k	
1	Сахар	16000	47	34	120	60	Подъемно-лопастная
2	Соль	3500	21	80	350	80	
3	Пшеница	5000	20	55	150	70	
4	Ячмень	4800	20	54	135	62	
5	Подсолнечник	3600	19	75	150	90	
6	Зерна кофе	1500	18	120	135	120	
7	Рожь	4300	21	53	250	68	Лопастная секторная
8	Сахар	15800	46	33	280	58	
9	Соль	7800	19	85	148	75	
10	Пшеница	4600	17	50	118	66	
11	Ячмень	3800	21	52	320	63	
12	Подсолнечник	3200	20	73	150	85	
13	Зерна кофе	700	19	110	144	150	Подъемно-лопастная
14	Рожь	4100	20	51	220	58	
15	Сахар	15500	45	34	290	59	
16	Соль	2900	20	90	140	110	
17	Подсолнечник	3400	21	65	119	70	
18	Сахар	15700	46	36	121	61	
19	Соль	3100	18	120	280	60	Лопастная секторная
20	Пшеница	6100	17	50	128	54	
21	Ячмень	3800	17	50	134	55	
22	Подсолнечник	4800	22	68	210	75	
23	Зерна кофе	650	20	140	250	130	
24	Рожь	4700	19	50	138	58	
25	Зерна кофе	850	21	155	270	145	

$$U_k = \frac{W_k}{100 - W_k}, \quad (3.25)$$

где W_k - конечная влажность продукта, %
 Рассчитаем производительность сушилки, кг/ч:
 по абсолютно сухому продукту

$$G_m = \frac{G_{m.k.}}{1 + U_k}. \quad (3.26)$$

по исходному продукту G_{m0}

$$G_{m0} = G_{m.k.} + W. \quad (3.27)$$

по испаряемой влаге W

$$W = G_m \cdot \Delta U, \quad (3.28)$$

где ΔU - изменения влагосодержания продукта, кг/кг

$$\Delta U = U_0 - U_k. \quad (3.29)$$

Унос материала из сушилки с отработанным воздухом, кг/ч

$$G_{yH} = K_{yH} \cdot G_{m.k.}, \quad (3.30)$$

где K_{yH} - коэффициент уноса высушенного материала из барабана
 (таблица 3.4), %.

Рабочий объем барабана V_{ap} , м³

$$V_{ap} = \frac{W}{A_v}, \quad (3.31)$$

где A_v - напряжение рабочего объема барабана по испарившейся
 влаге, кг/(м³·ч) (таблица 3.5).

Таблица 3.4 - Некоторые характеристики высушиваемых продуктов

Наименование продукта	Средняя плотность продукта ρ_M , кг/м ³ ;	Насыпная плотность продукта $\rho_{НС}$, кг/м ³ ;	Удельная теплоемкость продукта c_M , кДж/(кг·К)	Начальная влажность продукта W_0 , %	Конечная влажность продукта W_K , %	Коэффициент уноса продукта из барабана $K_{ун}$, %
Сахар	1580	800-900	0,712	0,5-0,55	0,06-0,07	3-8
Соль	2160	1025-1260	0,921	3	0,1	2-9
Пшеница	1430-1530	700-830	1,5-1,6	16-18	10-12	2-3
Ячмень	1400-1500	550-750	1,49-1,51	16-19	10-12	2-3
Подсолнечник	940	420	2,26-3,85	14-19	7	1-2
Зерна кофе	1420	500-620	3,24-3,68	11	4	1
Рожь	1440-1550	650-690	1,5	15-18	11-12	2-3

Таблица 3.5 - Значения напряжения рабочего объема барабана по испарившейся влаге, кг/(м³·ч)

Температура сушильного агента на входе в барабан t_o , °С	Влажность материала W_o , %		
	<10	10-40	>40
80-150	1-8	6-15	10-20
150-250	10-20	15-40	30-50
150-400	15-30	25-60	50-75
400-650	20-40	30-90	80-120
650-1000	30-60	50-100	80-180

Поперечное сечение барабана $S_{\text{ап}}, \text{ м}^2$

$$S_{\text{ап}} = \frac{V_{\text{ап}}}{1 - \beta_{\text{м}} \nu}, \quad (3.32)$$

где ν - максимально допустимая скорость газов в аппарате, зависящая от насыпной плотности материала, м/с (таблица 3.6);

$\beta_{\text{м}}$ - коэффициент заполнения барабана материалом ($\beta_{\text{м}} = 0,15-0,35$).

Длина барабана $l_{\text{ап}}, \text{ м}$

$$l_{\text{ап}} = \frac{V_{\text{ап}}}{S_{\text{ап}}}. \quad (3.33)$$

Таблица 3.6 - Максимально допустимая скорость газов V , м/с

Размер частиц, мм	Насыпная плотность материала, кг/м ³				
	350	1000	1400	1800	2200
Менее 0,3	0,5	2,0	3,0	4,0	5,0
От 0,3 до 2	0,5-1	2-5	3-7,5	4-10	5-12
Более 2	1,3	5,3	8,0	10,5	13

Диаметр барабана $D_{\text{ап}}, \text{ м}$

$$D_{\text{ап}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{ап}}}{\pi}}. \quad (3.34)$$

Влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер $X_{\text{вх}}, \text{ кг/кг}$

$$X_{\text{вх}} = \frac{0,622 \varphi_{\text{вх}} \cdot p_{\text{н}}}{p - \varphi_{\text{вх}} \cdot p_{\text{н}}}, \quad (3.35)$$

где $\varphi_{\text{вх}}$ - относительная влажность наружного воздуха, $\varphi_{\text{вх}} = 0,60-0,85$;

p - барометрическое давление воздуха; $p = 99,5 \text{ кПа}$;

$p_{\text{н}}$ - давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре наружного воздуха $t_{\text{вх}} = 18 \text{ }^\circ\text{C} - 23 \text{ }^\circ\text{C}$ (таблица 3.7).

Энтальпия наружного воздуха $I_{\text{вх}}, \text{ кДж/кг}$

$$I_{\text{вх}} = c_r t_{\text{вх}} + r_0 + c_n t_{\text{вх}} X_{\text{вх}}, \quad (3.36)$$

где c_r - удельная теплоемкость наружного воздуха, кДж/(кг·К),

$c_r = 1,006 \text{ кДж/(кг·К)}$;

$t_{\text{вх}}$ - температура наружного воздуха $t_{\text{вх}} = 18 \text{ }^\circ\text{C} - 23 \text{ }^\circ\text{C}$;

r_0 - удельная теплота парообразования при 0 °С, кДж/кг,
 $r_0 = 2495$ кДж/кг);
 c_n - удельная теплоемкость пара, кДж/(кг·К), $c_n = 1,965$ кДж/(кг·К).

Таблица 3.7 - Упругость водяных паров

$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{Па}$
0	610,5	40	7371,5
5	871,8	50	12330,2
10	1227,7	60	19861,7
14	1599,6	70	31192,2
16	1812,9	80	47321,5
18	2066,2	90	70115,8
20	2332,8	100	101308,0
25	3172,5	150	470880,0
30	4238,9	200	1500930,0

Учитывая, что $X_0 = X_{\text{вх}}$, найдем энтальпию нагретого воздуха на входе в сушилку, кДж/кг

$$I_0 = c_r t_0 + r_0 + c_n t_0 X_0. \quad (3.37)$$

Удельный расход теплоты на нагрев высушиваемого материала, кДж/кг,

$$q_m = c_m + c_{\text{ж}} U_{\text{к}} \theta_{\text{к}} - \theta_0 \Delta U, \quad (3.38)$$

где c_m - удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К);

$c_{\text{ж}}$ - удельная теплоемкость воды, $c_{\text{ж}} = 4,187$ кДж/(кг·К).

Удельный расход теплоты на компенсацию энергии связи влаги с материалом, кДж/кг

$$q_c = \frac{a \cdot \Delta U}{2}, \quad (3.39)$$

где a - постоянная величина, $a = 4200$ кДж/кг.

Удельные тепловые потери $q_{\text{пм}}$ примем равными 10 % от q_m .

$$q_{\text{пм}} = 0,1 \cdot q_m. \quad (3.40)$$

Тогда изменение потенциала воздуха относительно испарившейся влаги, кДж/кг

$$\Delta = c_{\text{ж}} \theta_0 - q_m - q_c + q_{\text{пм}}. \quad (3.41)$$

Энтальпия пара при конечной температуре t_k , кДж/кг

$$I_{п.к.} = r_0 + c_n t_k. \quad (3.42)$$

Конечная энтальпия влажного воздуха, кДж/кг

$$I_k = \frac{c_r t_k \Delta + I_{п.к.} (X_0 \Delta - I_0)}{\Delta - I_{п.к.}}. \quad (3.43)$$

Конечное влагосодержание воздуха, кг/кг

$$X_k = \frac{I_k - I_0}{\Delta i + X_0}. \quad (3.44)$$

Тогда

$$\Delta X = X_k - X_0. \quad (3.45)$$

Расход теплоты в калорифере, кДж/кг

$$Q_{кл} = q_u \cdot W = \frac{I_0 - I_{вх}}{X_k - X_0} W. \quad (3.46)$$

Расход воздуха, кг/ч

$$L = \frac{W}{\Delta X}. \quad (3.47)$$

Время сушки $\tau_{суш}$, мин

$$\tau_{суш} = \frac{120 \beta_M \cdot \rho_{нс} (W_0 - W_k)}{A_v 200 - (W_0 - W_k)}, \quad (3.48)$$

где β_M - коэффициент заполнения барабана материалом ($\beta_M = 0,15-0,35$).
Объем материала, находящегося в барабане, m^3

$$V_M^* = \frac{\tau_{суш} (G_{мо} + G_{м.к.} - G_{уш})}{120 \rho_{нс}}. \quad (3.49)$$

Время пребывания материала в аппарате (проверка), мин

$$\tau = \frac{V_M^*}{V_M} = \frac{2V_M^* \cdot \rho_{нс}}{G_{мо} + G_{м.к.} - G_{уш}}. \quad (3.50)$$

Уточним коэффициент заполнения барабана материалом, что близко к принятому в исходных данных.

$$\beta_m = \frac{V_m^*}{V_{ап}}, \quad (3.51)$$

Число оборотов барабана для сушилок с подъемно-лопастной и комбинированной насадкой n , об/мин

$$n = \frac{m \cdot k \cdot l_{ан}}{\tau \cdot D_{ап} \cdot tg\alpha}, \quad (3.52)$$

где m, k - коэффициенты, зависящие от типа насадки и направления движения теплоносителя (при насадке типов б - г, и (рисунок 3.1), $m = 0,6, k \geq 0,2$ (прямоток), $k = 0,5$ (противоток); при насадке типа д - ж $m = 0,75-1,0, k \geq 0,7$ (прямоток), $k \leq 2$ (противоток);

τ - время пребывания материала в барабане, мин;

α - угол наклона барабана ($\alpha = 3,5^\circ$).

Скорость воздуха в свободном сечении барабана, м/с,

$$\omega = \frac{V}{S_{ап}(1 - \beta_m - \beta_n)}, \quad (3.53)$$

где β_n - коэффициент заполнения барабана насадкой ($\beta_n = 0,05 - 0,1$). [2]

4 Практическая работа №4 Технологическое оборудование для выпечки и обжарки продуктов

Цель работы: изучение теоретических основ процесса выпечки хлебобулочных изделий; знакомство с классификацией хлебопекарных печей, устройством и принципом их работы; приобретение практических навыков по выполнению расчета хлебопекарных печей.

4.1 Назначение и классификация хлебопекарных печей

Печные агрегаты - ведущее оборудование в поточных линиях по выработке хлебных изделий. Под действием теплоты и влаги в рабочей камере печи происходит превращение тестовой заготовки в готовую продукцию. Таким образом, в печных агрегатах завершается весь комплекс теплофизических, микробиологических, биохимических и коллоидных процессов, связанных с производством хлебных изделий.

Хлебопекарные печи могут быть классифицированы по нескольким признакам:

- по технологическому назначению: печи универсальные - для выпечки широкого ассортимента и специализированные - для выпечки специальных сортов;

- по производительности: печи сверхмалой производительности (для пекарен), малой производительности (с площадью пода до 25 м²) и большой производительности (с площадью пода свыше 25 м²);

- по конструктивным особенностям: печи тупиковые и туннельные;

- по способу обогрева пекарной камеры: печи жаровые, печи с канальным обогревом, печи с рециркуляцией продуктов сгорания, печи с пароводяным обогревом, печи с электрообогревом, печи с комбинированным обогревом (каналы и пароводяные трубки).

4.2 Расчет хлебопекарной печи

4.2.1 Задание

Выполнить расчет хлебопекарной печи по заданным вариантам (таблица 4.1), если заданы: τ - продолжительность выпечки, мин; g_x - масса одной буханки хлеба, кг; $W'_{исп}$ - уpek относительно горячего хлеба, %; $t'_{пк}$ - температура перегретого пара, °C; t_m - начальная температура теста, °C; $t_{ф}$ - температура формы

при выходе из печи, °С; t_b - температура окружающей среды в цехе, °С; δ - толщина стенки, м. [2]

4.2.2 Методика расчета

Расчет производительности печи. Производительность печного агрегата G_x , кг/ч, с люечно-подиковым конвейером [2]

$$G_x = \frac{60n_l \cdot n_\phi \cdot g_x}{\tau}, \quad (4.1)$$

где n_l - количество рабочих люлек конвейера ($n_l = 36$);

n_ϕ - количество форм с хлебом на люльке ($n_\phi = 24$);

g_x - масса одной буханки хлеба, кг;

τ - продолжительность выпечки, мин.

Суточная производительность хлебопекарной печи $P_{сут}$, кг/сутки

$$P_{сут} = 23P_\phi, \quad (4.2)$$

где 23 - время работы печи в сутки, ч.

Расчет теплового баланса пекарной камеры. Уравнение теплового баланса пекарной камеры для непрерывно работающей печи имеет следующий вид

$$q_{п.к} = q_1^{п.к} + q_2^{п.к} + q_3^{п.к} + q_4^{п.к} + q_5^{п.к} + q_6^{п.к} + q_7^{п.к} + q_8^{п.к}, \quad (4.3)$$

где $q_1^{п.к}$ - теоретический расход теплоты на выпечку 1 кг хлеба (полезная теплота), кДж/кг;

$q_2^{п.к}$ - теплота на перегрев пара, подаваемого для увлажнения среды пекарной камеры и тестовых заготовок, кДж/кг;

$q_3^{п.к}$ - расход теплоты на нагрев вентиляционного воздуха, кДж/кг;

$q_4^{п.к}$ - расход теплоты на нагрев транспортных устройств, кДж/кг;

$q_5^{п.к}$ - потери теплоты в окружающую среду через ограждения пекарной камеры, кДж/кг;

$q_6^{п.к}$ - потери теплоты через нижнюю стенку пекарной камеры, кДж/кг;

$q_7^{п.к}$ - потери теплоты излучением через посадочное окно пекарной камеры в окружающую среду, кДж/кг;

$q_8^{п.к}$ - расход теплоты на аккумуляцию, кДж/кг.

Таблица 4.1 - Варианты индивидуальных заданий

Вар.	g_x , кг	τ , мин	$W'_{исп}$, %	t_m , °C	t_{ϕ} , °C	$t'_{пк}$, °C	δ , м	t_B , °C
1	0,6	48	8,1	23	164	121	0,83	19
2	0,5	45	8,0	24	163	122	0,84	20
3	0,3	44	7,9	25	162	123	0,85	21
4	1,0	53	7,8	26	161	124	0,86	22
5	0,8	51	7,7	27	160	125	0,87	23
6	0,6	50	7,6	28	159	126	0,88	24
7	0,5	49	7,7	29	158	127	0,89	25
8	0,3	47	7,8	30	157	128	0,90	26
9	1,0	55	7,9	31	159	129	0,91	27
10	0,8	54	8,0	32	160	128	0,91	28
11	0,6	52	8,1	30	161	127	0,92	26
12	0,5	48	8,2	29	162	126	0,93	27
13	0,3	50	8,3	29	163	125	0,94	26
14	1,0	54	7,9	28	164	124	0,83	25
15	0,8	53	8,0	28	165	123	0,84	24
16	0,6	52	8,1	27	166	122	0,85	23
17	0,5	51	8,2	26	167	124	0,86	22
18	0,3	50	7,4	26	168	125	0,87	23
19	1,0	49	7,5	29	169	126	0,88	24
20	0,8	50	7,6	29	170	127	0,89	25
21	0,6	51	7,7	30	171	128	0,90	25
22	0,5	52	7,8	30	168	129	0,91	24
23	0,3	53	7,9	31	167	130	0,91	26
24	1,0	54	8,0	31	166	131	0,92	27
25	0,8	55	8,2	32	165	132	0,93	28

Теоретический расход теплоты на выпечку 1 кг хлеба $q_1^{\text{п.к}}$

$$q_1^{\text{п.к}} = W'_{\text{исп}} i_{\text{п.п}} - i_{\text{в}} + g_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} - t_{\text{м}} + g_{\text{см}} c_{\text{см}} + W_{\text{х}} c_{\text{в}} t_{\text{к}} - t_{\text{м}} , \quad (4.4)$$

где $W'_{\text{исп}}$ - упек относительно горячего хлеба (тогда массовая доля влаги, испарившейся на 1 кг хлеба, составит $W'_{\text{исп}} = 0,081$ кг на 1 кг горячего хлеба);

$i_{\text{п.п}}$ - энтальпия перегретого пара при температуре $t'_{\text{пк}}$ и атмосферном давлении $p = 100$ кПа (таблица 4.2), $i_{\text{п.п}} = 2727$ кДж/кг;

$i_{\text{в}}$ - энтальпия воды в тесте при температуре теста $t_{\text{м}}$, °С, (таблица 4.3), $i_{\text{в}} = 125$ кДж/кг;

$g_{\text{к}}$ - содержание корки в 1 кг горячего изделия, $g_{\text{к}} = 0,285$ кг/кг;

$c_{\text{к}}$ - удельная теплоемкость корки, $c_{\text{к}} = 1,47$ кДж/(кг·К);

$t_{\text{к}}$ - средняя температура корки, °С, принимается равной среднеарифметической температур поверхности корки и подкорочного слоя, $t_{\text{к}} = 120$ °С;

$t_{\text{м}}$ - температура теста, °С;

$g_{\text{см}}$ - содержание сухого вещества мякиша в 1 кг хлеба, кг/кг;

$W_{\text{х}}$ - содержание влаги в 1 кг хлеба в момент выхода его из пекарной камеры, кг влаги на 1 кг горячего хлеба, $W_{\text{х}} = 0,45$ кг/кг;

$c_{\text{см}}$ - удельная теплоемкость сухого вещества мякиша хлеба, $c_{\text{к}} = c_{\text{см}} = 1,47$ кДж/(кг·К);

$c_{\text{в}}$ - удельная теплоемкость воды, $c_{\text{в}} = 4,187$ кДж/(кг·К);

$t_{\text{м}}$ - средняя температура мякиша горячего хлеба, $t_{\text{м}} = 98$ °С.

$$g_{\text{см}} = 1 - g_{\text{к}} + W_{\text{х}} . \quad (4.5)$$

Расход теплоты на нагрев транспортных устройств $q_4^{\text{п.к}}$ отсутствует, т.к. конвейер печи не выходит за пределы пекарной камеры. Потеря теплоты будет происходить только при охлаждении форм, выходящих из печи

$$q_4^{\text{п.к}} = g_{\text{мф}} c_{\text{м}} t''_{\text{ф}} - t'_{\text{ф}} , \quad (4.9)$$

где $g_{\text{мф}}$ - масса металла форм, приходящаяся на 1 кг хлеба,

$$g_{\text{мф}} = 0,61 \text{ кг/кг};$$

$c_{\text{м}}$ - удельная теплоемкость стали, $c_{\text{м}} = 0,462$ кДж/(кг·К);

$t''_{\text{ф}}$ - температура формы при выходе из печи, $t''_{\text{ф}} = 166$ °С;

$t'_{\text{ф}}$ - температура формы при входе в пекарную камеру, $t'_{\text{ф}} = 30$ °С.

Таблица 4.2 - Термодинамические свойства перегретого пара при $p = 100$ кПа

Температура t , °С	Удельный объем пара v , м ³ /кг	Энтальпия пара i , кДж/кг
100	1,696	2676,5
110	1,745	2696,7
120	1,793	2716,8
130	1,841	2736,8
140	1,889	2756,6
150	1,937	2776,4
160	1,984	2796,2
170	2,031	2816,0
180	2,078	2835,7
190	2,125	2855,4
200	2,172	2875,2
210	2,219	2894,9
220	2,266	2914,7
230	2,313	2934,5
240	2,359	2954,3
250	2,406	2974,2
260	2,453	2994,1
270	2,499	3014,0
280	2,546	3034,0
290	2,592	3054,0
300	2,639	3074,1
310	2,685	3094,3

Таблица 4.3 - Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения

Температура t , °C	Давление p , кПа	Удельный объем, м ³ /кг		Энтальпия, кДж/кг		Скрытая теплота парообразования r , кДж/кг
		воды v'	пара v''	воды i'	пара i''	
1	2	3	4	5	6	7
80	47,3	0,00103	3,410	334,9	2643,8	2308,9
90	70,1	0,00103	2,362	376,9	2660,3	2283,4
100	101,3	0,00104	1,674	419,0	2676,3	2257,2
110	143,3	0,00105	1,211	461,3	2691,8	2230,5
120	198,5	0,00106	0,892	503,7	2706,6	2202,9
130	270,1	0,00107	0,668	546,3	2720,7	2174,4
140	361,4	0,00108	0,508	589,1	2734,0	2144,9
150	475,9	0,00109	0,392	632,2	2746,3	2114,1
160	618,0	0,00110	0,307	675,5	2757,7	2082,2
170	792,0	0,00111	0,242	719,1	2768,0	2048,9
180	1002,7	0,00112	0,194	763,1	2777,1	2014,0
190	1255,2	0,00114	0,156	807,5	2784,9	1977,4
200	1555,1	0,00115	0,127	852,4	2791,4	1939,0
210	1907,9	0,00117	0,0104	897,8	2796,4	1898,6
220	2320,1	0,00119	0,086	943,7	2799,9	1856,2

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7
230	2797,9	0,00121	0,071	990,3	2801,7	1811,4
240	3348,0	0,00123	0,059	1037,6	2801,6	1764,0
250	3977,6	0,00125	0,050	1085,8	2799,5	1713,7
260	4694,0	0,00127	0,042	1135,0	2795,2	1660,2
270	5505,1	0,00130	0,035	1185,4	2788,3	1602,8
280	6419,1	0,00133	0,030	1237,0	2778,6	1541,6
290	7444,8	0,00136	0,0255	1290,3	2765,4	1475,1
300	8591,7	0,00140	0,0216	1345,4	2748,4	1403,0
310	9869,7	0,00145	0,0183	1402,9	2726,8	1323,9
320	11290	0,00150	0,0154	1463,4	2699,6	1236,2
330	12865	0,00156	0,0129	1527,5	2665,5	1138,0
340	14608	0,00164	0,0108	1596,8	2622,3	1025,5
350	16537	0,00174	0,0088	1672,9	2566,1	893,2
360	18674	0,00189	0,0069	1763,1	2485,7	722,6
370	21053	0,00223	0,0049	1896,2	2335,7	439,5
374	22084	0,00283	0,0035	2039,2	2150,7	111,5

Таблица 4.4 – Влагосодержание влажного воздуха (г/кг сухого воздуха при $p = 100$ кПа)

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность воздуха $\varphi, \%$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0,77	1,54	2,31	3,09	3,87	4,65	5,43	6,21	7,00	7,78
20	1,47	2,94	4,42	5,91	7,41	8,91	10,42	11,94	13,46	15,00
25	1,99	3,99	6,01	8,04	10,08	12,14	14,21	26,29	18,39	20,50
30	2,67	5,36	8,08	10,82	13,59	16,37	19,19	22,03	24,89	27,78
35	3,55	7,13	10,76	14,43	18,14	21,90	25,70	29,54	33,43	37,37
40	4,66	9,40	14,20	19,07	24,03	29,95	34,16	39,35	44,62	49,98
45	6,07	12,27	18,58	25,03	31,60	38,31	45,15	52,14	59,28	66,57
50	7,84	15,88	24,13	32,60	41,29	50,21	59,30	68,79	78,47	88,42
55	10,05	20,43	31,15	42,24	53,70	65,57	77,86	90,69	103,80	117,5
60	12,78	26,10	39,98	54,48	69,61	85,44	102,00	119,35	137,54	156,6
65	16,14	33,15	51,06	70,02	89,96	111,26	133,71	157,69	183,15	210,3
70	20,27	41,90	65,03	89,83	116,33	145,16	176,15	209,73	246,27	286,0
75	20,30	52,74	82,60	115,21	150,99	190,31	233,85	282,25	335,37	397,3
80	28,84	66,15	104,77	147,96	196,55	251,62	314,53	387,06	471,60	571,3
85	38,84	82,83	133,07	190,95	258,35	337,78	432,75	584,25	691,72	874,7
90	47,81	103,54	169,34	248,12	344,15	463,62	615,33	814,24	1097,51	1509
95	58,68	129,55	216,75	326,60	469,12	661,27	934,27	1352,19	2071,68	3602
100-300	69,62	156,81	269,15	419,35	630,45	948,89	1484,49	2574,24	5998,07	-

Потери теплоты ограждениями пекарной камеры $q_5^{п.к}$

$$q_5^{п.к} = \frac{3,6Q_{oc}}{G_x}, \quad (4.10)$$

где G_x - производительность печи, кг/ч;

Q_{oc} - потеря теплоты ограждениями пекарной камеры в окружающую среду, Вт.

$$Q_{oc} = \alpha_k \cdot f_{п} \cdot t_{п} - t_{в} + C_0 \cdot \varepsilon_{п} \cdot f_{п} \cdot 0,01T_{п}^4 - 0,01T_{cm}^4, \quad (4.11)$$

где $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , Вт/(м²·К), от поверхности стенок пекарной камеры в окружающую среду

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n. \quad (4.12)$$

При теплоотдаче от вертикальных стенок в качестве определяющего размера принимается высота h_1 боковых стенок (рисунок 4.1).

Температура среды $t_{в}$ является определяющей. Средняя температура поверхности ограждений $t_{п} = 40$ °С. Средняя температура стен помещения t_{cm} принимается равной температуре воздуха в помещении $t_{в}$.

При $t_{в}$ для воздуха находим (таблица 4.5) следующие теплофизические характеристики: кинематическую вязкость ν , м²/с; коэффициент теплопроводности λ_1 , Вт/(м·К); число Прандтля Pr .

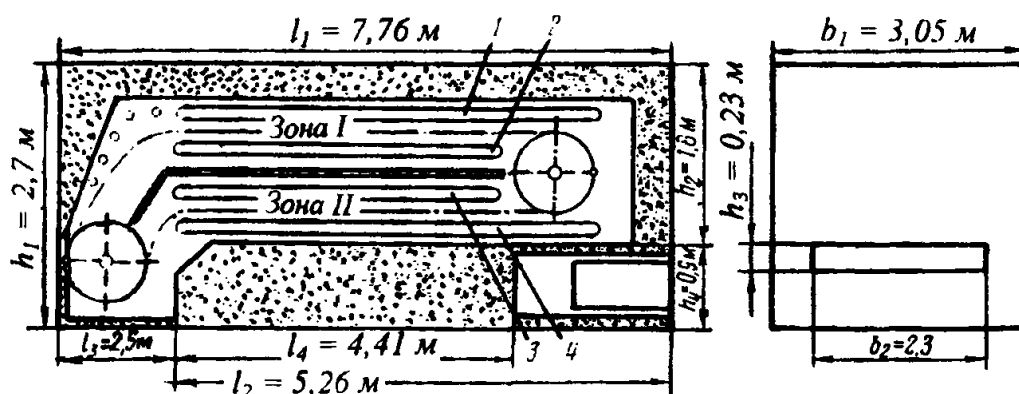


Рисунок 4.1 – Расчетная схема печи РЗ-ХПА

Таблица 4.5 - Физические характеристики воздуха при давлении 0,1 МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Pr
0	13,28	2,44	0,707
100	23,13	3,21	0,688
200	34,85	3,93	0,680
300	48,33	4,60	0,674
400	63,09	5,21	0,678
500	79,38	5,74	0,687
600	96,89	6,22	0,699
700	115,4	6,71	0,706
800	134,8	7,18	0,713
900	155,1	7,63	0,717
1000	177,1	8,07	0,719
1100	199,3	8,50	0,722
1200	233,7	9,15	0,724
1300	247	9,27	0,73
1400	273	9,65	0,73
1500	300	10,02	0,73
1600	327	10,38	0,74
1700	355	10,75	0,74
1800	384	11,10	0,74
1900	415	11,45	0,74
2000	448	11,86	0,74
2100	478	12,09	0,75
2200	511	12,44	0,75

Коэффициент объемного расширения воздуха

$$\beta = \frac{1}{273 + t_B}. \quad (4.13)$$

Число Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot h^3}{\nu^2}. \quad (4.14)$$

Вычислим произведение $Gr \cdot Pr$

При $Gr \cdot Pr > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33}. \quad (4.15)$$

Отсюда коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , Вт/(м²·К)

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{h}. \quad (4.16)$$

Для горизонтальной поверхности ограждения печи

$$\alpha_k = 1,3 \alpha. \quad (4.17)$$

Площадь вертикальных поверхностей ограждения, м², составляет (рисунок 4.1): $h_1 = 2,7$ м; $h_2 = 1,8$ м; $l_1 = 7,76$ м; $l_2 = 5,26$ м; $l_3 = 2,5$ м; $b_1 = 3,05$ м,

$$F_6 = F_1 + F_2 + 2F_3, \quad (4.18)$$

где F_1 - площадь переднего вертикального ограждения пекарной камеры, м²;
 F_2 - площадь заднего вертикального ограждения пекарной камеры, м²;
 F_3 - площадь вертикального ограждения боковой стенки пекарной камеры, м²

$$F_1 = h_1 \cdot b_1. \quad (4.19)$$

$$F_2 = h_2 \cdot b_1. \quad (4.20)$$

$$F_3 = h_1 \cdot l_3 + h_2 \cdot l_2. \quad (4.21)$$

Площадь верхнего горизонтального ограждения пекарной камеры, м²

$$F_{гор} = l_1 \cdot b_1. \quad (4.22)$$

Потеря теплоты пекарной камеры вертикальными поверхностями, Вт

$$Q_{осв} = \alpha_k \cdot f_{п} \cdot t_{п} - t_{в} + C_0 \cdot \varepsilon_{п} \cdot f_{п} \cdot 0,01T_{п}^4 - 0,01T_{см}^4. \quad (4.23)$$

Потеря теплоты пекарной камеры верхней горизонтальной поверхностью ограждения, Вт

$$Q_{осг} = \alpha_k \cdot f_{п} \cdot t_{п} - t_{в} + C_0 \cdot \varepsilon_{п} \cdot f_{п} \cdot 0,01T_{п}^4 - 0,01T_{см}^4. \quad (4.24)$$

Общая потеря теплоты ограждениями $Q_{ос}$, Вт

$$Q_{ос} = Q_{осв} + Q_{осг}. \quad (4.25)$$

Определяем потерю теплоты через нижнюю стенку пекарной камеры.

Производим расчет участка стенки длиной $l_4 = 4,41$ м (рисунок 4.1), в котором отсутствуют газоходы и другие тепловыделяющие устройства

$$q_6^{\text{п.к}} = \frac{3,6Q_{\text{нс}}}{G_x}. \quad (4.26)$$

$$Q_{\text{нс}} = \frac{\lambda_2}{\delta} f_{\text{нс}} t_{\text{см}} - t_{\text{пол}}, \quad (4.27)$$

где $Q_{\text{нс}}$ - потеря теплоты пекарной камеры через нижнюю стенку печи, Вт;
 λ_2 - коэффициент теплопроводности изоляционного материала (шлаковая вата), $\lambda_2 = 0,086$ Вт/(м·К);
 δ - толщина стенки, м;
 $f_{\text{нс}}$ - площадь поверхности нижней стенки, м², через которую теряется теплота пекарной камеры;
 $t_{\text{см}}$ - температура стенки со стороны передней камеры, принимаем равной температуре среды в нижней зоне печи, $t_{\text{см}} = 175$ °С;
 $t_{\text{пол}}$ - температура пола, $t_{\text{пол}} = 20$ °С.

$$f_{\text{нс}} = l_4 \cdot b_1. \quad (4.28)$$

Находим потери теплоты излучением через посадочное окно печи размерами $h_3 = 0,23$ м, $b_2 = 2,3$ м (рисунок 4.1).

Площадь окна f , м²

$$f = h_3 \cdot b_2. \quad (4.29)$$

Тепловой поток через окно можно определить по формуле

$$Q = C_0 \cdot \varepsilon \cdot f \cdot \varphi \left[(0,01T_{\text{н.к.}})^4 - (0,01T_{\text{см}})^4 \right], \quad (4.30)$$

где $\varepsilon = 1$ - коэффициент теплового излучения отверстия;
 φ - угловой коэффициент (рисунок 4.2);
 $T_{\text{н.к.}}$ - средняя температура пекарной камеры, К;
 $T_{\text{см}}$ - температура стен в печном зале, принимается равной температуре воздуха $t_{\text{в}}$, °С.

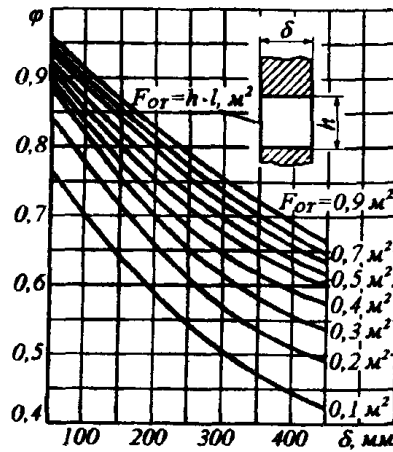


Рисунок 4.2 - Номограмма для определения углового коэффициента излучения для посадочного и разгрузочного окон пекарной камеры

$$T_{n.к.} = \frac{T_{n.к.1} + T_{n.к.2}}{2}. \quad (4.31)$$

Печь рассчитывается для непрерывной работы и при установившемся тепловом режиме, поэтому $q_8^{n.к.} = 0$.

Тепловой поток от системы обогрева в пекарную камеру, Вт

$$Q_{n.к.} = \frac{q_{n.к.} \cdot G_x}{3,6}. \quad (4.32)$$

Технологический КПД пекарной камеры, %

$$\eta_{n.к.} = \frac{q_1^{n.к.}}{q_{n.к.}} \cdot 100. \quad (4.33)$$

Список использованных источников

1. Хромеенков, В.М. Технологическое оборудование хлебозаводов и макаронных фабрик / В.М. Хромеенков. - Санкт-Петербург: ГИОРД, 2004. - 496 с.
2. Остриков, А.Н. Практикум по курсу «Технологическое оборудование» / А.Н. Остриков, М.Г. Парфенопуло, А.А. Шевцов; Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж: ВГТА, 1999. - 424 с.