

# **ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Учебно-методическое пособие  
по практическим занятиям для студентов специальности  
1-48 01 05 «Химическая технология переработки древесины»  
специализации 1-48 01 05 04 «Технология целлюлозно-  
бумажных производств» очной и заочной форм обучения**

Минск БГТУ 2007

УДК 676(075.8)  
ББК 35.77я7  
О-22

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета

Составители:

*Н. В. Черная, Н. В. Жолнерович*

Рецензенты:

доктор химических наук, заведующий лабораторией органического катализа Института физико-органической химии НАН Беларуси

*Н. Г. Козлов;*

кандидат технических наук, доцент кафедры редакционно-издательских технологий БГТУ *А. А. Губарев*

**Оборудование предприятий целлюлозно-бумажных О-22 производств** : учеб.-метод. пособие по практическим занятиям для студентов специальности 1-48 01 05 «Химическая технология переработки древесины» специализации 1-48 01 05 04 «Технология целлюлозно-бумажных производств» очной и заочной форм обучения / сост. Н. В. Черная, Н. В. Жолнерович. – Минск : БГТУ, 2007. – 55 с.

ISBN 978-985-434-726-4.

Издание содержит методические указания по технологическому расчету оборудования древесно-подготовительного и размольно-подготовительного отделов, оборудования для получения древесной массы, а также по определению основных параметров массонапускных устройств бумагоделательных машин, соответствующих профилю будущих специалистов. Даны практические рекомендации по обоснованию выбора оборудования для конкретных условий его эксплуатации.

**УДК 676(075.8)**  
**ББК 35.77я7**

**ISBN 978-985-434-726-4**

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель изучения дисциплины «Оборудование предприятий целлюлозно-бумажных производств» – профессиональная подготовка и формирование у студентов комплекса знаний, навыков и умений, необходимых для правильного выбора оборудования, его установки и рациональной эксплуатации.

Основной задачей дисциплины является освоение современного оборудования, используемого в целлюлозно-бумажном производстве, базовых положений его проектирования, перспектив развития и технической эксплуатации. В результате изучения дисциплины у будущих инженеров-химиков-технологов формируется комплекс теоретических знаний и приобретаются практические навыки. Студент должен знать современное состояние и перспективы развития основного оборудования целлюлозно-бумажной промышленности, конструкцию, технологическое назначение и возможности оборудования, методы подготовки к работе и рациональной эксплуатации оборудования; уметь выбирать типовое оборудование для производства различных видов целлюлозы, бумаги и картона; иметь представление о методах исследования работы оборудования, экономической эффективности его применения, а также режимах его работы.

Настоящее пособие содержит методику и примеры расчета оборудования для окорки балансовой древесины, рубительных машин для измельчения древесного сырья в технологическую щепу, оборудования для получения древесной массы, а также оборудования для размола волокнистых полуфабрикатов и подготовки бумажной массы к отливу на бумагоделательной машине.

Данное пособие способствует закреплению теоретических знаний, а также развитию практических навыков по разработке современных технологических схем и обоснованному выбору оборудования для производства целлюлозы, бумаги и картона с использованием различных видов волокнистых полуфабрикатов и вспомогательных химических добавок.

## 1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОКОРКИ ДРЕВЕСИНЫ

Необходимость снятия коры с древесины в целлюлозно-бумажном производстве объясняется ее строением и химическим составом. Содержание коры на древесине составляет от 6 до 30% по объему, при этом часть коры имеет неволокнутое строение, что снижает механические свойства готового продукта при использовании неокоренной древесины.

Требования к качеству окорки древесины определяются видом вырабатываемой продукции, техническим оснащением предприятия и применяемым способом варки. При грубой окорке снимается корка и частично луб, при чистой – корка и луб. Чистой окорке подвергаются балансы, предназначенные для выработки высококачественной растворимой целлюлозы, целлюлозы для электроизоляционных бумаг. Газетная бумага допускает содержание луба до 10–15% от первоначального объема. При выработке крафт-целлюлозы для мешочной бумаги, полуцеллюлозы, бурой древесной массы могут использоваться балансы с полностью оставленным лубом.

Качество окорки древесины характеризуется процентом окоренной поверхности, т. е. степенью окорки, вычисляемой по следующей формуле:

$$M = \frac{S - S_1}{S} \cdot 100,$$

где  $M$  – степень окорки, %;  $S$  – площадь всей боковой поверхности баланса,  $m^2$ ;  $S_1$  – неокоренная площадь боковой поверхности баланса,  $m^2$ .

Степень окорки зависит от назначения древесины и определяется показателями засоренности щепы корой, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

### Показатель засоренности щепы корой

Назначение древесины	Степень засоренности щепы корой, % по массе
1. Сульфитная целлюлоза и древесная масса для бумаг с регламентируемой сорностью	1,0

2. Сульфитная целлюлоза и древесная масса для бумаг с нерегламентируемой сорностью, сульфатная и бисульфитная целлюлоза для бумаги и картона с регламентируемой сорностью	1,5
---	-----

Окончание табл. 1

Назначение древесины	Степень засоренности щепы корой, % по массе
3. Сульфатная целлюлоза и различные виды полуцеллюлозы для бумаги и картона с нерегламентируемой сорностью	3,0
4. Спирт, дрожжи, глюкоза, фурфурол	11,0
5. Древесно-волокнистые и древесно-стружечные плиты	15,0

Степень окорки в зависимости от засоренности щепы может быть рассчитана по формуле

$$M = \frac{k_n - k_k}{k_n} \cdot 100,$$

где  $k_n$  – содержание коры на древесине, %;  $k_k$  – содержание коры в щепе, %.

Содержание коры на древесине зависит от породы, возраста и условий произрастания дерева. Средние данные по содержанию коры приведены в табл. 2 [6].

Таблица 2

**Содержание коры на древесине**

Порода древесины	Содержание коры на древесине, %	
	по объему	по массе
Сосна	9,1–9,2	6,3–6,5
Ель	9,7–14,2	8,1–11,5
Береза	12,6	13,5
Осина	14,4	15,5
Лиственница	16,4–19,9	12,6–13,4

Процесс окорки древесины зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются: порода древесины, ее температура и влажность. С понижением температуры силы сцепления коры с древесиной возрастают в 3–5 раз. В летнее время значительное

влияние на силы сцепления оказывает влажность древесины. При ее увеличении существенно снижается предел прочности коры на скалывание по камбиальному слою вдоль волокон. Прочность сцепления коры с древесиной зависит от времени года. Сопротивление окорки резко снижается в период вегетации, а затем снова возрастает.

### 1.1. Классификация окорочных барабанов

По характеру воздействия на балансы различают следующие основные способы окорки древесины: механический (основанный на удалении коры при помощи ножевых, фрезерных или кулачковых механизмов), фрикционный (основанный на трении балансов друг о друга и о специальные окориваемые механизмы) и струйный (основанный на действии струи воды или воздуха высокого давления).

Из всего многообразия механизмов наибольшее распространение получили окорочные барабаны, представляющие собой полый цилиндр, при вращении которого каждый из находящихся в нем балансов подвергается разнообразным динамическим воздействиям, приводящим к отделению коры. На процесс окорки решающее влияние оказывают силы сцепления коры с древесиной, зависящие от камбиального слоя, способа транспортировки и длительности хранения, температуры в момент подачи на окорку. Сокращение продолжительности обработки сырья в барабане достигается интенсификацией окорки.

По способу интенсификации окорки окорочные барабаны разделяются на четыре типа: барабаны мокрой, полусухой, сухой окорки и комбинированные барабаны.

В барабанах *мокрой окорки* в качестве интенсификатора используется горячая вода. Водой заполняется корпус барабана. Кора удаляется вместе с потоком воды и выходящими из барабана балансами. Барабаны полусухой окорки разделены на две равные части. В первой части окорка осуществляется в водной среде, а во второй – без применения воды.

Барабаны *полусухой окорки* вследствие меньшего расхода воды и более высокой производительности практически вытеснили барабаны мокрой окорки.

В барабанах *сухой окорки* используют механические интенсификаторы в виде ножей для предварительного разрушения коры или пар. Барабаны с механическими интенсификаторами получили распространение для окорки низкокачественного древесного сырья.

В *комбинированных барабанах* в зависимости от влажности сырья может производиться как сухая окорка с использованием пара, так и полусухая окорка. В первой секции барабана, составляющей одну треть его длины, обеспечивается увлажнение сырья, достаточное для осуществления эффективной окорки в перфорированных секциях.

Основные технические характеристики окорочных барабанов приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Технические характеристики окорочных барабанов

Показатель	Барабаны								
	полусухой окорки			сухой окорки с паром		сухой окорки с механическими интенсификаторами			комбинированной окорки
	КБ-40К	КБ-60	КБ-100-01	КБС-420	КБС-425	КБ-3	КБ-6А	КБ-12	КБ-530М
Внутренний диаметр, м	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,0	3,0	3,0	5,0
Длина корпуса, м	15,0	20,5	24,0	20,5	24,0	3,5	7,5	15,0	30,0
Число секций, шт.	2	2	2	2	2	1	1	2	3
В том числе перфорированных	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	6,3	6,3	6,3	9,0	9,0	10,5	10,5	10,5	До 8,0
Установленная мощность, кВт	220	244	352	375	375	42	57	112	953
Производительность при 95%-ной окорке еловой талой свежесрубленной древесины, м <sup>3</sup> /ч, не менее	45	75	95	60	75	3	7,5	15	175
Масса, т	165	190	205	233	245	26	39	58	453
Габаритные размеры, м:	14,8	21,4	25,5	23,0	26,5	14,3	12,3	27,0	36,5
длина	6,3	6,5	6,5	6,5	6,5	4,2	5,5	5,5	8,1
ширина	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,2	5,5	5,5	7,5

ВЫСОТА									
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## 1.2. Расчет производительности окорочных барабанов

Различают транспортную и технологическую производительности окорочных барабанов непрерывного действия.

**Транспортная производительность** определяется средней скоростью продвижения балансов или эквивалентным углом наклона плоскости обрушения (рисунок) и задается интенсивностью загрузки барабана:

$$Q_T = \frac{300 \cdot D^3 \cdot \omega \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \left(1 - \frac{\sin 2\alpha \cdot 180}{\pi \cdot 2\alpha}\right) \cdot k \cdot k_1}{\left(\frac{180 \cdot \omega}{\pi \cdot 2\alpha} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot D \cdot \sin \alpha}{3g \cdot (\sin \beta - f \cdot \cos \beta)}} + 1\right) \cdot \operatorname{tg} \beta},$$

где  $Q_T$  – транспортная производительность окорочного барабана, м<sup>3</sup>/ч;  $D$  – внутренний диаметр барабана, м;  $\omega$  – угловая частота вращения барабана, с<sup>-1</sup>;  $\alpha$  – половина центрального угла сегмента

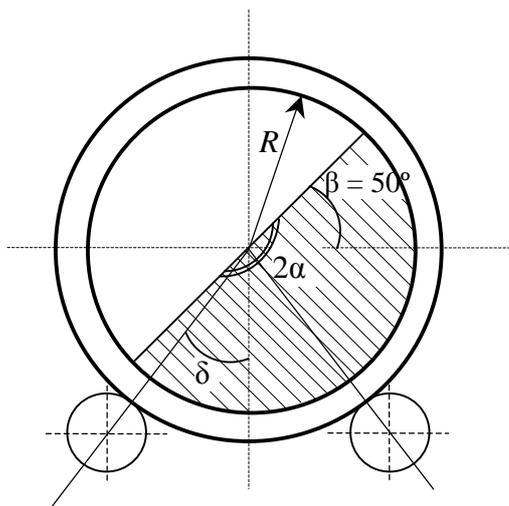


Рисунок. Схема окорочного барабана балансов друг о друга ( $f = 0,4$ ).

заполнения, град;  $\gamma$  – угол наклона поверхности обрушения в продольной плоскости сечения барабана ( $\gamma = 2,5^\circ$ ), град;  $k$  – коэффициент полндревесности укладки балансов в барабане, определяемый по табл. 4;  $k_1$  – коэффициент использования машинного времени ( $k_1 = 0,90-0,95$ );  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );  $\beta$  – угол динамического обрушения балансов ( $\beta = 50^\circ$ ), град;  $f$  – усредненный коэффициент трения

Таблица 4

**Значение коэффициента полндревесности**

Значение параметра $d/D$	Значение коэффициента полндревесности в зависимости от отношения $l/D$			
	0,13	0,26	0,39	0,52
0,035	0,46	0,44	0,36	0,33
0,057	0,48	0,45	0,38	0,35

0,077	0,50	0,47	0,41	0,37
-------	------	------	------	------

*Примечание.*  $d$  и  $l$  – соответственно диаметр и длина окариваемых балансов.

Для барабанов с механическими интенсификаторами значения  $k$  принимаются с коэффициентом 0,85.

**Технологическая производительность** барабанов непрерывного действия определяется средней продолжительностью пребывания балансов в барабане, необходимой для обеспечения требуемой средней степени окорки. Вследствие большой изменчивости сырьевых факторов (породы, размеров, состояния древесины) и вероятностного характера процесса перемещения балансов в барабане технологическая производительность колеблется в широких пределах и не поддается теоретическому расчету. Для ориентировочных расчетов технологической производительности барабанов непрерывного действия может быть использована эмпирическая формула, значения коэффициентов которой установлены на основе анализа результатов исследований барабанов:

$$Q = k_w \cdot k_l \cdot k_s \cdot k_n \cdot Q_0 \cdot L,$$

где  $Q$  – технологическая производительность окорочных барабанов непрерывного действия, м<sup>3</sup>/ч;  $k_w$ ,  $k_l$ ,  $k_s$  – эмпирические коэффициенты, учитывающие соответственно состояние древесины, ее размеры и требуемую степень окорки (табл. 5–7);  $k_n$  – коэффициент, учитывающий частоту вращения барабана;  $Q_0$  – удельная базовая производительность, м<sup>3</sup>/(ч · м) (табл. 8–9);  $L$  – длина барабана, м.

Коэффициент, учитывающий частоту вращения барабана, находится из соотношения

$$k_n = \frac{n}{0,3 \cdot n_k} = \frac{n \cdot 2\pi \cdot \sqrt{D}}{0,3 \cdot 60 \cdot \sqrt{2g}} = 0,079 \cdot n \cdot \sqrt{D},$$

где  $n$  – частота вращения барабана, мин<sup>-1</sup>;  $n_k$  – критическая частота вращения барабана, т. е. минимальная скорость, при которой прекращается обрушение балансов, мин<sup>-1</sup>.

Таблица 5

**Значения коэффициента  $k_w$**

Температура коры	Относительная влажность, %		
	75–90	45–70	30–40
Положительная	1,3	1,1	0,6*

Отрицательная	0,7	1,0	0,5 *
---------------	-----	-----	-------

\* Для полусухой окорки.

Таблица 6

**Значения коэффициента  $k_l$**

Средний диаметр балансов, м	Диаметр барабана, м		$k_l$
	4	5	
	Средняя длина балансов		
0,14	1,0	1,5	1,07
	1,5	2,0	0,86
	2,0	2,5	0,81
0,22	1,0	1,5	1,10
	1,5	2,0	0,93
	2,0	2,5	0,86
0,30	1,0	1,5	1,14
	1,5	2,0	1,00
	2,0	2,5	0,95

Таблица 7

**Значения коэффициента  $k_s$**

Степень окорки, %	Порода древесины		
	ель, пихта	сосна, осина	береза, лиственница
98	0,88	0,80	0,85
95	1,00	1,00	1,00
90	1,12	1,15	1,20
80	1,25	1,25	1,53

Таблица 8

**Удельная базовая производительность  $Q_0$  барабанов с механическими интенсификаторами окорки,  $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м})$**

Диаметр барабана, м	Порода древесины	Период заготовки древесины		
		весна, лето	осень	зима
3	Ель, сосна, осина	1,5	1,1	0,3

	Береза, лиственница	1,4	1,1	0,5
4	Ель, сосна, осина	2,0	1,4	0,4
	Береза, лиственница	1,8	1,5	0,7

Таблица 9

**Удельная базовая производительность  $Q_0$  барабанов с интенсификацией окорки водой и паром,  $m^3/(ч \cdot м)$**

Диаметр барабана, м	Вид теплоносителя	Температура теплоносителя, °С	Порода древесины		
			ель, пихта	сосна, осина	береза, лиственница
4	Вода	20	3,5	3,6	2,3
		40	3,8	4,1	2,5
		60	4,1	4,4	2,8
	Пар	140	3,6	4,0	2,4
5	Вода	20	6,7	6,8	4,4
		40	7,2	7,8	4,8
		60	7,8	8,4	5,3
	Пар	140	7,0	8,0	5,0

Наилучший результат эксплуатации барабанов непрерывного действия достигается тогда, когда транспортная и технологическая производительности совпадают. Превышение транспортной производительности над технологической влечет за собой снижение степени окорки, а занижение ее значения увеличивает потери древесины и, естественно, уменьшает объем окоренного сырья.

### 1.3. Расчет мощности привода окорочных барабанов

Мощность привода окорочного барабана складывается из мощности, расходуемой на преодоление трения в опорно-приводных устройствах, и полезной мощности, затрачиваемой на окорку и перемещение балансов. Полезная мощность определяется работой сил динамического взаимодействия балансов и практически не зависит от их состояния и продолжительности пребывания в барабане, т. е. с производительностью связана лишь косвенно. При этом должно выполняться следующее условие:

$$N_{\text{уст}} > N = \frac{1}{\eta} \cdot (N_{\text{тр}} + N_{\text{пол}}),$$

где  $N_{\text{уст}}$  – установленная мощность привода, кВт;  $N$  – потребляемая мощность, кВт;  $\eta$  – коэффициент полезного действия привода;  $N_{\text{тр}}$  – мощность, расходуемая на преодоление трения, кВт;  $N_{\text{пол}}$  – полезная мощность, кВт.

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения, рассчитывается по формуле

$$N_{\text{тр}} = \frac{n \cdot v \cdot \sum G}{9,81 \cdot 975 \cdot d_p \cdot \cos \delta} \cdot \left[ (D_6 + d_p) \cdot \mu + f \cdot D_6 \cdot \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right],$$

где  $n$  – частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $v$  – коэффициент, учитывающий точность сборки и монтажа барабана ( $v = 1,05$ );  $\sum G$  – общий вес корпуса секций и древесины (сумма массы металлоконструкций окорочного барабана, вес древесины в секции и при окорке в присутствии воды масса воды в секции барабана), Н;  $D_6$ ,  $d_p$ ,  $d_{\text{ц}}$  – диаметры соответственно банджа, опорного ролика и цапфы оси опорного ролика, м;  $\mu$  – коэффициент трения качения банджа по роликам ( $\mu = 0,0015$ );  $f$  – коэффициент трения в подшипниках опорных роликов ( $f = 0,0125$ );  $\delta$  – угол между вертикальной осью сечения барабана и осью опорного ролика ( $\delta = 30\text{--}35^\circ$ ), град.

Диаметр банджа принимается в зависимости от внутреннего диаметра окорочного барабана и составляет 4,5 м в случае, если диаметр окорочного барабана равен 3,85 м; при внутреннем диаметре барабана 5,0 м диаметр банджа равен 5,9 м. Диаметр опорного ролика составляет  $d_p = (0,20\text{--}0,33) \cdot D_6$ . Диаметр цапфы опорного ролика принимается равным 0,15–0,18 м.

Полезная мощность, расходуемая на окорку и перемещение балансов, находится из следующего соотношения:

$$N_{\text{пол}} = \frac{0,88 \cdot 10^{-2} \cdot k \cdot \rho \cdot n \cdot D^3 \cdot L \cdot \sin^3 \alpha \cdot \sin \beta}{g},$$

где  $\rho$  – плотность окашиваемой древесины,  $\text{кг/м}^3$  (табл. 10).

Таблица 10

**Плотность основных древесных пород при влажности 50%**

Порода древесины	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Ель	780
Пихта	650
Сосна	840
Осина	750
Береза	1060
Лиственница	940

#### 1.4. Пример расчета основных параметров окорочного барабана

**Задача.** Определить транспортную и технологическую производительности окорочного барабана марки КБ-60 в летний период при 50%-ной степени заполнения объема барабана. Температура воды в барабане составляет 60°C. Окорке подвергаются сосновые балансы диаметром 18 см, длиной 2 м и влажностью 80%. Требуемая степень окорки составляет 98%. Плотность древесины при 80%-ной влажности равна 760 кг/м<sup>3</sup>. Рассчитать мощность, затрачиваемую на вращение барабана при условии, что масса воды, одновременно находящейся в барабане, составляет 40 т.

**Решение.** В соответствии с технической характеристикой окорочного барабана его диаметр составляет 3,85 м, частота вращения – 6,3 мин<sup>-1</sup>. Угловая частота вращения барабана соответственно равна

$$\omega = \frac{6,3 \cdot 2\pi}{60} = 0,66 \text{ с}^{-1}.$$

При условии 50%-ного заполнения объема барабана половина центрального угла сегмента заполнения составит  $\alpha = 90^\circ$ . Коэффициент полнодревесности в соответствии с табл. 4 ( $d/D = 0,18/3,85 = 0,047$  и  $l/D = 2/3,85 = 0,52$ ) равен 0,34. Коэффициент использования машинного времени примем 0,93.

Следовательно, транспортная производительность равна

$$Q_{\tau} = \frac{300 \cdot 3,85^3 \cdot 0,66 \cdot \sin 90^\circ \cdot \sin 2,5^\circ \cdot \left(1 - \frac{180 \cdot \sin 2 \cdot 90^\circ}{3,14 \cdot 2 \cdot 90^\circ}\right) \cdot 0,34 \cdot 0,93}{\left(\frac{180 \cdot 0,66}{3,14 \cdot 2 \cdot 90^\circ} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 3,85 \cdot \sin 90^\circ}{3 \cdot 9,81 \cdot (\sin 50^\circ - 0,4 \cdot \cos 50^\circ)}} + 1\right) \cdot \text{tg } 50^\circ} =$$

$$= 107,8 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для расчета технологической производительности коэффициенты примем в соответствии с заданными условиями по табл. 5–7:  $k_w = 1,3$ ;  $k_l = 0,84$ ;  $k_s = 0,80$ . Определим коэффициент, учитывающий частоту вращения барабана

$$k_n = 0,079 \cdot n \cdot \sqrt{D} = 0,079 \cdot 6,3 \cdot \sqrt{3,85} = 0,98.$$

По табл. 9 выберем удельную базовую производительность окорочного барабана, которая равна  $4,4 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м})$ .

Таким образом, технологическая производительность составляет

$$Q = 1,3 \cdot 0,84 \cdot 0,80 \cdot 0,98 \cdot 4,4 \cdot 20,5 = 77,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Мощность привода найдем по формуле

$$N = \frac{1}{\eta} \cdot (N_{\text{тр}} + N_{\text{пол}}).$$

Для расчета мощности, расходуемой на преодоление трения, примем диаметр бандажа, опорного ролика и цапфы оси опорного ролика соответственно равными  $4,5$ ;  $1,3$  и  $0,15 \text{ м}$ .

Определим массу древесины, одновременно находящейся в барабане

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot 0,5 \cdot k \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 3,85^2}{4} \cdot 20,5 \cdot 0,5 \cdot 0,34 \cdot 760 = 30\,818 \text{ кг}.$$

Следовательно, суммарная масса металлоконструкций барабана, древесины и воды, одновременно находящихся в барабане, равна

$$\Sigma G = 190 + 40 + 30,8 = 260,8 \text{ т}.$$

Отсюда рассчитаем мощность, затрачиваемую на преодоление трения

$$N_{\text{тр}} = \frac{6,3 \cdot 1,05 \cdot 260,8}{975 \cdot 1,3 \cdot \cos 34,25^\circ} \cdot \left[ (4,5 + 1,3) \cdot 0,0015 + 0,0125 \cdot 4,5 \cdot \frac{0,18}{2} \right] =$$

$$= 22,7 \text{ кВт}.$$

Полезная мощность барабана составит

$$N_{\text{пол}} = 0,88 \cdot 10^{-2} \cdot 0,34 \cdot 760 \cdot 0,105 \cdot 3,85^3 \cdot 20,5 \cdot \sin^3 90^\circ \cdot \sin 50^\circ =$$

$$= 214 \text{ кВт.}$$

Таким образом, потребляемая мощность окорочного барабана при коэффициенте полезного действия привода, равном 0,9, составляет

$$N = \frac{1}{0,9} \cdot (22,7 + 214) = 263 \text{ кВт.}$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Определить оптимальную производительность окорочного барабана марки КБС-420 в зимний период, чтобы достичь степени окорки 94%, и мощность, расходуемую на преодоление трения. Окорке подвергаются еловые балансы со средним диаметром 30 см, длиной 2 м и влажностью 50%. Степень заполнения барабана 50%. Плотность древесины ели при 50%-ной влажности равна  $750 \text{ кг/м}^3$ .

2. Рассчитать технологическую производительность и потребляемую мощность окорочного барабана марки КБ-100-01 при степени окорки 90%. Степень заполнения барабана 50%. Окорке подвергаются еловые балансы со средним диаметром 22 см и длиной 1,8 м. Влажность балансов равна 60%, плотность –  $780 \text{ кг/м}^3$ . Масса воды, одновременно находящейся в барабане, составляет 30 т.

3. Вычислить транспортную производительность и мощность окорочного барабана марки КБС-425, затрачиваемую на окорку балансов в зимний период, чтобы достичь степени окорки 90%. Окорке подвергаются еловые балансы со средним диаметром 25 см и длиной 2,0 м. Влажность балансов составляет 60%, плотность –  $780 \text{ кг/м}^3$ .

4. Определить количество окорочных барабанов марки КБС-425 необходимых для окорки 500 т/сут еловой древесины в летний период при влажности ее 50% (плотность  $750 \text{ кг/м}^3$ ), которая предназначена для производства сульфитной целлюлозы для бумаг с регламентируемой сорностью. Окорке подвергаются балансы со средним диаметром 30 см и длиной 2,0 м. Степень заполнения барабана принять равной 50%.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В ЩЕПУ

К этой группе древесно-подготовительного оборудования относятся рубительные машины и дезинтеграторы. Рубительные машины предназначены для производства щепы из балансов, технологических дров, отходов лесозаготовок, лесопиления и деревообработки.

Дезинтеграторы используются для измельчения крупной щепы после сортирования и кусковых отходов деревообработки.

### 2.1. Классификация дисковых рубительных машин

По кинематике процесса резания и форме рабочего органа рубительные машины делятся на барабанные, конические и дисковые. В *барабанных и конических рубительных машинах* подача древесного сырья осуществляется в направлении, перпендикулярном оси рабочего органа. Вследствие циклического изменения углов встречи ножей с древесиной в процессе рубки щепы, вырабатываемая на этих машинах, имеет разный угол среза, большое содержание слишком крупных и мелких фракций и очень неоднородна по длине. Поэтому барабанные и конические машины не получили широкого распространения. Первые используются в основном для приготовления топливной щепы и щепы для производства древесно-волоконистых и древесно-стружечных плит. Конические машины привлекают внимание специалистов лесопильной и деревообрабатывающей промышленности возможностью одновременного получения на них бруса заданных размеров и щепы.

Наиболее высокий выход технологической щепы и лучшие энергетические показатели обеспечивают *дисковые рубительные машины*, что и обусловило их преимущественное распространение для приготовления щепы в производстве волоконистых полуфабрикатов.

Классификационные признаки дисковых рубительных машин определяются технологической схемой древесно-подготовительного производства, т. е. способом подачи сырья и способом удаления щепы.

В зависимости от способа подачи древесины различают машины с наклонным и горизонтальным направляющим патроном. В *машинах с наклонным патроном*, предназначенных для измельчения короткомерных сортиментов, подвод их к диску осуществляется под действием силы тяжести. *Машины с горизонтальным патроном* используются преимущественно для длинномерного сырья, которое к диску подводится конвейером или специальным загрузочным устройством.

По способу удаления щепы выделяют машины с верхним и нижним выбросом. Первый осуществляется принудительно лопатками, установленными на ободу диска, второй – за счет силы тяжести щепы.

*Машины с верхним выбросом* проще и экономичнее komponуются со смежным сортирующим оборудованием, но из-за дополнительного дробления дают меньший выход технологической щепы. В то же время в машинах с верхним выбросом при дроблении отпадают не полностью отделившиеся в процессе щепообразования волокна, и качество щепы после сортирования меньше подвержено изменениям при хранении и последующей транспортировке.

Применение *машин с нижним выбросом* предпочтительно при выработке высококачественных видов целлюлозы, где особенно нежелательно повреждение щепы. Достоинство этого метода состоит в снижении на 15–20% необходимой мощности по сравнению с машинами для верхнего выброса. Недостатком является большая запыленность помещения. При нижнем выбросе необходим глубокий приямок для конвейера щепы и дополнительный конвейер для подачи щепы к сортировкам.

В зависимости от конструкции число ножей на диске составляет в старых машинах 3–5 (малоножевые), в современных – 8–16 (многоножевые). Для обеспечения лучших условий резания кромки ножей на диске чаще всего расположены не по радиусу, а являются касательными к некоторой начальной окружности. Принципиальное отличие многоножевой машины от малоножевой заключается в том, что бревно при рубке находится одновременно под действием двух соседних ножей. В результате процесс рубки протекает непрерывно и устраняется подсакивание баланса в патроне.

Для более надежного и равномерного резания одновременно двумя ножами в некоторых конструкциях многоножевых машин

поверхности диска в пространстве между ножами придают геликоидальную форму, что повышает качество получаемой щепы.

Технические характеристики дисковых рубительных машин представлены в табл. 11–12.

Таблица 11

**Технические характеристики дисковых рубительных машин марок МРН-10, МРН-30, МРН-30Н, МРН-50, МРН-100**

Параметр	МРН-10	МРН-30, МРН-30Н	МРН-50	МРН-100
Диаметр диска, мм	1270	1270	2140	2440
Число ножей, шт.	16	16	10	10
Частота вращения диска, мин <sup>-1</sup>	590	740	365	365
Угол примыкания патрона, град: в вертикальной плоскости	52	52	52	52
в горизонтальной плоскости	18	18	18	18
Максимальный размер перерабатываемого сырья, см: диаметр балансов	22	22	35	50
ширина обапола	–	–	–	–
Расчетная длина щепы, мм	18	18	20	20
Расчетные размеры сырья, см: диаметр	12	12	20	22
длина	220	220	220	220
Установленная мощность, кВт	55	90	320	500
Производительность, м <sup>3</sup> /ч, при рубке свежесрубленного елового сырья: расчетного диаметра	10	30	50	100
максимального диаметра	3,5	10,4	18	30
Масса, т	5,7	5,7; 5,4	32,8	40
Габаритные размеры, м: длина	2,7	2,7	6,0	6,1
ширина	1,7	1,7	3,4	3,4
высота	1,8	1,8; 1,5	4,2	4,4

Таблица 12

**Технические характеристики дисковых рубительных машин марок МРН-150, МРН-300, МРГ-20Н, МРГ-40, МРГ-40Н, МРГ-100Н**

Параметр	МРН-150	МРН-300	МРГ-20Н	МРГ-40, МРГ-40Н	МРГ-100Н
1	2	3	4	5	6
Диаметр диска, мм	3000	3000	1270	1600	2440
Число ножей, шт.	12	16	12	10	10
Частота вращения диска, мин <sup>-1</sup>	375	250	740	590	365

Окончание табл. 12

1	2	3	4	5	6
Угол примыкания патрона, град: в вертикальной плоскости в горизонтальной плоскости	52 15	53 18	– 52	– 49	– 52
Максимальный размер перерабатываемого сырья, см: диаметр балансов ширина обапола	70 –	70 –	20 42	30 50	50 –
Расчетная длина щепы, мм	20	18	18	18	20
Расчетные размеры сырья, см: диаметр длина	27 220	30 220	12 220	20 220	22 220
Установленная мощность, кВт	1600	1600	90	160	500
Производительность, м <sup>3</sup> /ч, при рубке свежесрубленного елового сырья: расчетного диаметра максимального диаметра	250 75	300 80	20 7,3	40 15	100 30
Масса, т	55	50	5,5	14,0; 13,5	40
Габаритные размеры, м: длина ширина высота	6,8 3,6 6,8	9,8 4,2 6,4	2,7 1,7 1,4	3,6 4,3 2,2; 2,1	6,0 3,4 2,4

## 2.2. Расчет производительности дисковых рубительных машин

Наиболее высокий выход технологической щепы и лучшие энергетические показатели имеют дисковые рубительные машины, рабочим органом которых является ножевой диск. Ножи закреплены на лицевой стороне диска радиально или под некоторым углом к радиусу таким образом, что режущие лезвия несколько выступают над диском. К лицевой стороне диска с некоторым зазором примыкает направляющий патрон, по которому баланс подводится к ножам.

На стенках, образующих днище патрона, установлены контрножи. В теле диска вдоль режущей кромки каждого ножа выполнены сквозные подножевые щели. Диск огражден кожухом. Балансы по направляющему патрону подаются к ножам вращающегося диска. Каждый нож отрубает шайбу толщиной, равной величине выступа ножа. При этом подача сырья под следующий нож осуществляется затягивающим усилием предыдущего ножа. Под действием скалывающих или сдвигающих усилий на передней грани ножа отрубаемая шайба распадается на отдельные элементы – щепу. Через подножевую щель щепа поступает на приводную сторону диска и затем удаляется из корпуса.

По способу подачи древесины различают машины с наклонным и горизонтальным направляющим патроном; по способу удаления щепы – с верхним и нижним выбросом.

Производительность рубительной машины может быть найдена по формуле

$$Q = 47,1 \cdot d_p^2 \cdot n_{cp} \cdot l_{щ} \cdot z \cdot k_n \cdot k_l,$$

где  $Q$  – производительность рубительной машины, пл. м<sup>3</sup>/ч;  $d_p$  – среднеквадратичный диаметр перерабатываемых балансов, м;  $n_{cp}$  – средняя частота вращения вала рубительной машины, мин<sup>-1</sup>;  $l_{щ}$  – длина получаемой щепы, м;  $z$  – количество ножей на диске, шт.;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий эффективность использования машинного времени (для тихоходных малоножевых машин принимается равным 0,7–1,0; для быстроходных многоножевых – 0,4–0,7 [6]);  $k_l$  – коэффициент неравномерности длины щепы (для малоножевых – 0,80–0,85; для многоножевых – 0,93–1,00).

Измельчению часто подвергаются балансы различного диаметра. Поэтому вводится понятие среднеквадратичного, или эквивалентного, диаметра. Среднеквадратичный (эквивалентный) диаметр перерабатываемых балансов определяется из выражения

$$d_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot d_i^2},$$

где  $\lambda_i$  – относительное содержание балансов диаметром  $d_i$ .

Средняя частота вращения вала рубительной машины рассчитывается по формуле

$$n_{\text{ср}} = \frac{n_{\text{н}} + n_{\text{к}}}{2},$$

где  $n_{\text{н}}$  – номинальная (начальная) частота вращения вала до начала рубки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $n_{\text{к}}$  – конечная частота вращения вала после рубки ( $n_{\text{к}} = 0,9 \cdot n_{\text{н}}$ ),  $\text{мин}^{-1}$ .

При этом начальная частота вращения вала до начала рубки вычисляется из следующего соотношения:

$$n_{\text{н}} = \frac{V_{\text{р}}}{\pi \cdot D_{\text{р}}},$$

где  $V_{\text{р}}$  – окружная скорость резания на среднем диаметре, проходящем через середину ножа (для малоножевых машин составляет 15–18 м/с, для многоножевых – 20–30 м/с), м/с;  $D_{\text{р}} = 0,6 \cdot D$  – средний диаметр резания (диаметр центра ножей), м.

Длина получаемой щепы рассчитывается как

$$l_{\text{щ}} = \frac{h}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2},$$

где  $h$  – расстояние от плоскости диска до режущей кромки ножа, м;  $\alpha_1$  – угол наклона загрузочного патрона в вертикальной плоскости, град;  $\alpha_2$  – угол наклона загрузочного патрона в горизонтальной плоскости, град.

Продолжительность рубки одного баланса  $\tau_{\text{р}}$ , с, длиной  $L$  находится по формуле

$$\tau_{\text{р}} = \frac{L}{k_l \cdot n_{\text{ср}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot z}.$$

При получении щепы из отходов деревообработки или при одновременной рубке нескольких балансов малого диаметра рекомендуется задаваться площадью поперечного сечения измельчаемой древесины. В этом случае производительность определяется как

$$Q = 60 \cdot F_{\text{р}} \cdot n_{\text{ср}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot z \cdot k_{\text{п}} \cdot k_l,$$

где  $F_{\text{р}}$  – площадь поперечного сечения измельчаемой древесины,  $\text{м}^2$ .

В случае переработки нескольких балансов площадь поперечного сечения измельчаемой древесины рассчитывается из следующего уравнения:

$$F_p = 0,785 \cdot m \cdot d_p^2,$$

где  $m$  – число одновременно измельчаемых балансов.

### 2.3. Расчет мощности привода рубительных машин

Мощность привода рубительной машины складывается из мощности холостого хода и полезной мощности. Мощность холостого хода расходуется на преодоление трения качения в роликоподшипниках, а в машинах с верхним выбросом щепы – и на создание вентиляционного напора. Полезная мощность затрачивается на рубку древесины, а в машинах с верхним выбросом щепы – и на механическое выбрасывание щепы. Таким образом, мощность привода рубительной машины рассчитывается по формуле

$$N = \frac{M_c \cdot n_n}{9554} = \frac{(M_x + M_{пол}) \cdot n_n}{9554},$$

где  $N$  – мощность привода рубительной машины, кВт;  $M_c$  – полный момент сил сопротивления, Н · м;  $n_n$  – номинальная частота вращения диска, мин<sup>-1</sup>;  $M_x$  – мощность холостого хода, кВт;  $M_{пол}$  – полезная мощность, кВт.

Полный момент сил сопротивления находится из следующего уравнения:

$$M_c = M_{тр} + M_v + M_p + M_m,$$

где  $M_{тр}$  – крутящий момент на преодоление сил трения в опорах, Н · м;  $M_v$  – крутящий момент на создание вентиляционного напора, Н · м;  $M_p$  – крутящий момент на преодоление сил сопротивления резанию, Н · м;  $M_m$  – крутящий момент, затрачиваемый на механический выброс щепы, Н · м.

Крутящий момент на преодоление сил трения в опорах вычисляется по формуле

$$M_{тр} = f \cdot G \cdot g \cdot \frac{d_k}{2},$$

где  $f$  – коэффициент трения качения,  $f = 0,02$ ;  $G$  – вес ротора рубительной машины, кг;  $d_k$  – диаметр окружности качения роликов, м.

Крутящий момент на создание вентиляционного напора определяется по следующей формуле

$$M_{\text{в}} = 1,8 \cdot z_{\text{л}} \cdot F_{\text{л}} \cdot D_{\text{л}}^3 \cdot \left( \frac{n_{\text{н}}}{100} \right)^2 \cdot \chi,$$

где  $z_{\text{л}}$  – количество лопаток на ободе диска, шт.;  $F_{\text{л}}$  – площадь одной лопатки, м<sup>2</sup>;  $D_{\text{л}}$  – диаметр, описываемый при вращении центром тяжести лопатки, м;  $\chi$  – коэффициент сопротивления, учитывающий радиальное расположение лопаток ( $\chi = 0,7$ ).

Крутящий момент на преодоление сил сопротивления резанию рассчитывается из соотношения

$$M_{\text{р}} = \frac{d_{\text{р}}^2 \cdot z \cdot R_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{8 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2},$$

где  $d_{\text{р}}$  – среднеквадратичный диаметр перерабатываемых балансов, м;  $z$  – число ножей, шт.;  $R_0$  – удельное сопротивление резанию, определяемое по табл. 13, Н/м;  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, учитывающие соответственно степень затупления ножей, влажность и температуру древесины (для острых ножей  $k_1 = 1$ , для затупленных –  $k_1 = 1,25$ ; при влажности древесины 50–60%  $k_2 = 1$ , при влажности древесины 20–30%  $k_2 = 1,1$ ; при переработке в щепу незамороженной древесины  $k_3 = 1$ ; при переработке в щепу замороженной древесины  $k_3 = 1,4$ ) [6].

Таблица 13

**Значение удельного сопротивления резанию  $R_0$**

Порода древесины	Удельное сопротивление резанию, Н/м
Сосна	85 000–105 000
Ель	70 000–90 000
Береза	110 000–140 000
Осина	70 000–90 000
Бук	150 000–165 000

Крутящий момент, затрачиваемый на механический выброс щепы, находится по формуле

$$M_m = 0,27 \cdot 10^{-3} \cdot d_p^2 \cdot z \cdot l_{щ} \cdot \rho_{щ} \cdot D_{л}^2 \cdot n_H^2 \cdot \frac{1}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2},$$

где  $\rho_{щ}$  – плотность щепы (древесины), кг/м<sup>3</sup>[6].

## 2.4. Пример расчета основных параметров рубительных машин

**Задача.** Определить производительность дисковой рубительной машины марки МРН-100, если она перерабатывает сосновые балансы следующего диаметра: 20 см (в количестве 10%); 22 см (40%); 24 см (30%); 28 см (20%). Выступ ножей над плоскостью диска равен 20 мм. Рассчитать мощность привода рубительной машины (вес ротора составляет 13 т) при условии, что древесина перерабатывается в летний период при затупленных ножах и влажности 80%.

**Решение.** Для нахождения производительности необходимо определить среднеквадратичный (эквивалентный) диаметр перерабатываемых балансов из уравнения

$$d_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n 0,1 \cdot 20^2 + 0,4 \cdot 22^2 + 0,3 \cdot 24^2 + 0,2 \cdot 28^2} = 23,7 \text{ см.}$$

Длина получаемой щепы составит

$$l_{щ} = \frac{20}{\cos 52^\circ \cdot \cos 18^\circ} = 34 \text{ мм.}$$

Примем окружную скорость резания на среднем диаметре равной 28 м/с. Следовательно, начальная частота вращения вала рубительной машины при  $D_p = 0,6 \cdot D = 0,6 \cdot 2440 = 1464$  мм составит

$$n_H = \frac{28}{3,14 \cdot 1,464} = 6,09 \text{ с}^{-1}.$$

Средняя частота вращения вала рубительной машины равна

$$n_{cp} = \frac{n_H + n_K}{2} = \frac{n_H + 0,9 \cdot n_H}{2} = \frac{365 + 0,9 \cdot 365}{2} = 347 \text{ мин}^{-1}.$$

Таким образом, производительность дисковой рубительной машины составляет

$$Q = 47,1 \cdot 0,237^2 \cdot 347 \cdot 0,034 \cdot 10 \cdot 0,4 \cdot 0,93 = 116 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для расчета мощности привода рубительной машины необходимо определить полный момент сил сопротивления, который состоит из суммы крутящего момента на преодоление сил трения в опорах, крутящего момента на создание вентиляционного напора, крутящего момента на преодоление сил сопротивления резанию и крутящего момента, затрачиваемого на механический выброс щепы. Найдем все эти составляющие.

Крутящий момент на преодоление сил трения в опорах при диаметре окружности качения роликов, равном 0,3 м, вычислим из выражения

$$M_{\text{тр}} = 0,02 \cdot 13\,000 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,3}{2} = 383 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При площади лопаток для выброса щепы, равной 0,0816 м<sup>2</sup>, крутящий момент на создание вентиляционного напора определим как

$$M_{\text{в}} = 1,8 \cdot 10 \cdot 0,0816 \cdot 2,44^3 \cdot \left(\frac{347}{100}\right)^2 \cdot 0,7 = 180 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По табл. 13 примем удельное сопротивление резанию для сосновых балансов равным 95 000 Н/м. Отсюда при заданных условиях переработки балансов имеем

$$M_{\text{р}} = \frac{0,237^2 \cdot 10 \cdot 95\,000 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 1}{8 \cdot \cos 52^\circ \cdot \cos 18^\circ} = 14\,239 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, крутящий момент, затрачиваемый на механический выброс щепы (плотность щепы при 80%-ной влажности примем 880 кг/м<sup>3</sup>), будет равен

$$M_{\text{м}} = 0,27 \cdot 10^{-3} \cdot 0,237^2 \cdot 10 \cdot 0,034 \cdot 880 \cdot 2,44^2 \cdot 347^2 \cdot \frac{1}{\cos 52^\circ \cdot \cos 18^\circ} = 5555 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким образом, полный момент сил сопротивления составляет

$$M_{\text{с}} = 383 + 180 + 14\,239 + 5555 = 20\,357 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, мощность привода рубительной машины равна

$$N = \frac{M_c \cdot n_H}{9554} = \frac{20357 \cdot 347}{9554} = 739 \text{ кВт.}$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Определить производительность дисковой рубительной машины марки МРН-150, если она перерабатывает сосновые балансы следующего диаметра: 15 см (в количестве 20%); 20 см (30%); 25 см (40%); 30 см (10%). Выступ ножей над плоскостью диска равен 20 мм.

2. Рассчитать мощность привода рубительной машины марки МРГ-100Н, если влажность перерабатываемой древесины 60%, а ножи затуплены. Рубка осуществляется в летний период. Масса ротора рубительной машины составляет 14 т. Рубке подвергаются еловые балансы следующего диаметра: 22 см (в количестве 30%); 25 см (25%); 28 см (35%); 31 см (10%). Выступ ножей над плоскостью диска равен 18 мм.

3. Найти время, за которое дисковая рубительная машина марки МРГ-40 перерабатывает в щепу бревна, длиной 4,5 м, если выступ ножа над плоскостью диска равен 18 мм.

4. Определить время, за которое дисковая рубительная машина марки МРН-30, перерабатывает в щепу бревна длиной 2,5 м, если выступ ножа над плоскостью диска равен 20 мм.

### 3. ОБОРУДОВАНИЕ ДРЕВЕСНО-МАССНЫХ ЗАВОДОВ

Дефибреры предназначены для производства древесной массы – одного из наиболее распространенных полуфабрикатов, входящих в композицию массовых видов бумаг и картона. Дефибрер состоит из камня, шахты и ванны. В шахту подаются определенной длины балансы, которые размещаются в ней параллельно оси вала. Древесина прижимается механизмами подачи к вращающемуся камню с абразивной поверхностью, частично погруженному в ванну с массой и орошаемому оборотной водой.

#### 3.1. Классификация дефибреров

Сущность процесса дефибрирования заключается в расщеплении древесины на волокна и размоле волокон. По принципу действия дефибреры бывают периодического и непрерывного действия. В зависимости от способа прижима древесины к камню дефибреры делятся на гидравлические (прижим осуществляется с помощью гидропрессов); винтовые (прижим производится вращающимся винтом); цепные (прижим выполняется движущимися цепями); кольцевые (прижим осуществляется вращающимся зубчатым колесом). Из них прессовые относятся к дефибрерам периодического действия, остальные – к дефибрерам непрерывного действия.

Конструкции дефибреров характеризуются большим разнообразием и принципиально отличаются в части организации подачи балансов к рабочему органу – камню. Однако в ходе технического прогресса наибольшее развитие и распространение в промышленности получили только два типа дефибреров – цепные и двухпрессовые (табл. 14–15).

Таблица 14

Технические характеристики дефибреров

Параметр	ДЦ-06	ДЦ-03А	ДЦ-04-1	ДП-03
1	2	3	4	5
Производительность по воздушно-сухой белой древесной массе при степени помола 65–70°ШР и разрывной длине 2900 м, т/сут	20	40	55	100
Ширина шахты, мм	1350	1270	1220	1220
Мощность главного двигателя, кВт	1250	2500	3200	6300

Частота вращения вала, мин <sup>-1</sup>	300	250	300	300
--	-----	-----	-----	-----

Окончание табл. 14

1	2	3	4	5
Диаметр камня, м	1,5	1,8	1,8	1,8
Размеры балансов, мм: длина диаметр	1200 ± 20 60–230	1200 ± 20 60–350	1200 ± 20 60–350	1500 ± 20 60–400
Давление воды для sprысков, МПа	0,3–0,4	0,3–0,4	0,5–0,6	0,8–0,9
Габаритные размеры, м: длина (по оси вала) ширина высота (от уровня пола)	7,85 4,40 4,08	8,74 6,82 9,61	8,86 6,82 9,61	13,34 9,45 4,40
Масса, т	60,0	123,8	125,0	152,0

Таблица 15

**Технические характеристики дефибреров,  
изготовленных фирмой «Тампелла» (Финляндия)**

Параметр	Марка дефибрера						
	1510	1512	1515	1810	1812	1815	1816
Частота вращения камня, мин <sup>-1</sup>	250; 300	250; 300	250; 300	250; 300	250; 300	250; 300; 375	375
Диаметр камня, м	1575	1575	1575	1800	1800	1800	1800
Наибольшая окружная скорость камня, м/с	20,6; 24,7	20,6; 24,7	20,6; 24,7	23,5; 28,2	23,5; 28,2	23,5; 28,2; 35,3	35,3
Длина баланса, м	1,0	1,2	1,5	1,0	1,2	1,5	1,6
Площадь дефибрирования, м <sup>2</sup>	1,79	2,18	2,68	2,10	2,55	3,15	3,35
Мощность двигателя, кВт	1690; 2060	2060; 2430	2430; 2950	2500; 2950	2950; 3540	3700; 4800; 5900	7400

### 3.2. Расчет дефибреров.

#### Определение производительности дефибреров

Исходной величиной для определения производительности дефибрера является удельный съем, который показывает количество древесной массы в граммах, снимаемой с 1 см<sup>2</sup> поверхности камня при его перемещении на 1 см. При повышении температуры в зоне

дефибрирования и, следовательно, удельного расхода энергии удельный съём уменьшается в соответствии с уравнением

$$q = \alpha - 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot (U - 800),$$

где  $q$  – удельный съём древесной массы, г/(см<sup>2</sup> · см);  $\alpha$  – опытный коэффициент, зависящий от условий дефибрирования (для цепного дефибрера в зимних условиях  $\alpha = 0,00276$ ; для двухпрессового дефибрера в зимний период  $\alpha = 0,0031$ , в летний –  $\alpha = 0,00285$ );  $U$  – удельный расход энергии на дефибрирование (для белой древесной массы  $U = 1100–1300$  кВт · ч/т; для бурой древесной массы  $U = 700–800$  кВт · ч/т), кВт · ч/т воздушно-сухой древесной массы.

С учетом геометрии поверхности камня производительность дефибрера составит

$$Q = 0,864 \cdot 10^5 \cdot q \cdot F_r \cdot V_k \cdot l \cdot m \cdot D_k \cdot \arcsin\left(\frac{B}{D_k}\right),$$

где  $Q$  – производительность дефибрера, т/сут;  $F_r$  – удельная радиальная проекция площади контакта абразивных зерен с древесиной, см<sup>2</sup>/см<sup>2</sup>;  $V_k$  – окружная скорость камня, м/с;  $l$  – длина балансов, м;  $m$  – количество подающих устройств;  $D_k$  – диаметр камня, м;  $B$  – ширина шахты дефибрера, м;  $\arcsin(B/D_k)$  – дуга контакта балансов и камня, рад.

Используя данную формулу, можно также по заданной производительности определить необходимую длину перерабатываемых балансов.

Процесс дефибрирования зависит от формы и размеров абразивных зерен, распределения их на поверхности камня, свойств камня, характера обработки его поверхности – насечки.

Размеры абразивных зерен определяют зернистость дефибрерного камня. Под *зернистостью* понимается средний размер (диаметр) преобладающей фракции абразивных зерен.

Кварцево-цементные камни различают по зернистости следующим образом: мелкозернистые (0,25–0,35 мм), среднезернистые (0,40–0,50 мм), крупнозернистые (0,60–1,20 мм). Керамические камни относят к крупнозернистым с зернистостью 0,3 мм и выше, к среднезернистым – 0,25 мм и к мелкозернистым – 0,20 мм. Зернистость камней подбирается в зависимости от вида древесной массы с учетом длины дуги истирания и удельного давления, применяемого при дефибрировании [6].

Абсолютная величина  $F_r$  может быть рассчитана с помощью табл. 16 в зависимости от относительной глубины погружения ( $z$ ) абразивных зерен в древесину ( $z/r$ ) с учетом параметров насечки камня, где  $r$  – средний радиус абразивных зерен:

– для спиральной шарошки

$$F_r = \left( \frac{F_r}{r^2 \cdot i_p} \right) \cdot 0,205 \cdot (1 - 0,326 \cdot h \cdot N_n);$$

– для пирамидальной шарошки

$$F_r = \left( \frac{F_r}{r^2 \cdot i_p} \right) \cdot 0,205 \cdot (1 - 0,106 \cdot h^2 \cdot N_n^2),$$

где  $\left( \frac{F_r}{r^2 \cdot i_p} \right)$  – относительная величина проекции поверхности контакта абразивных зерен с древесиной;  $h$  – глубина насечки, см;  $N_n$  – номер шарошки.

Таблица 16

**Относительная величина проекции поверхности контакта абразивных зерен с древесиной в зависимости от глубины погружения зерна в древесину**

$z/r$	Относительная радиальная проекция $\left( \frac{F_r}{r^2 \cdot i_p} \right)$
0,067	0,00029
0,133	0,00086
0,200	0,00226
0,267	0,00472
0,333	0,00879
0,400	0,01558
0,467	0,02578
0,500	0,03200
0,533	0,04030

Окружная скорость камня определяется как

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n}{60},$$

где  $n$  – частота вращения вала электродвигателя,  $\text{мин}^{-1}$ .

Окружная скорость дефибрерного камня и его диаметр могут также приниматься из данных, представленных в табл. 17–18.

Таблица 17

**Зависимость диаметра камня от производительности дефибрера**

Производительность дефибрера по воздушно-сухому волокну, т/сут	Диаметр камня, мм
До 40	1500–1800
60–40	1800
60–100	1800–2200

Таблица 18

**Зависимость окружной скорости камня от производительности дефибрера**

Производительность дефибрера по воздушно-сухому волокну, т/сут	Окружная скорость нового камня, м/с, не менее
20	20,0
40	23,5
40–100	28,0

Для дефибреров периодического действия при расчете производительности необходимо учитывать периодичность его работы:

$$Q_{\text{пр}} = Q \cdot k_{\tau},$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – производительность дефибрера периодического действия, т/сут;  $k_{\tau}$  – коэффициент использования рабочего времени ( $k_{\tau} = 0,98$ ).

**3.3. Расчет мощности привода дефибрерного камня**

Эффективная мощность расходуется на преодоление сопротивления относительно перемещению абразивов в зоне дефибрирования. С учетом геометрии поверхности камня эффективная мощность находится по следующей формуле:

$$N_{\text{эф}} = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot k_{\text{д}} \cdot F_r \cdot V_{\text{к}} \cdot l \cdot m \cdot D_{\text{к}} \cdot \arcsin\left(\frac{B}{D_{\text{к}}}\right),$$

где  $N_{\text{эф}}$  – эффективная мощность, кВт;  $k_{\text{д}}$  – сопротивление дефибрированию, Н/м<sup>2</sup>.

Величина  $k_{\text{д}}$  определяется прочностными свойствами древесины и зависит от температуры в зоне дефибрирования. В летний период при более высокой температуре  $k_{\text{д}} = (900-950) \cdot 10^4$  Па, в зимний период  $k_{\text{д}} = (1010-1060) \cdot 10^4$  Па.

Мощность дефибрирования может рассчитываться также с использованием удельного расхода энергии, затрачиваемой на производство 1 т древесной массы:

$$N_{\text{эф}} = \frac{Q \cdot U}{24} \cdot \eta,$$

где  $Q$  – суточная производительность дефибрера, т воздушно-сухой древесной массы/сут;  $U$  – удельный расход энергии на дефибрирование, кВт · ч/т;  $\eta$  – коэффициент потерь мощности ( $\eta = 0,94-0,96$ ).

### 3.4. Пример расчета основных параметров работы дефибреров

**Задача.** Определить производительность и мощность привода двухпрессового дефибрера марки ДП-03 в летний период, если он вырабатывает белую древесную массу. Для насечки камня используется шарошка № 10, глубина насечки составляет 0,04 см. Отношение  $z/r$  принять равным 0,5.

**Решение.** Вначале рассчитаем удельный съем древесной массы с 1 см<sup>2</sup> поверхности камня при условии, что удельный расход энергии на дефибрирование воздушно-сухой белой древесной массы равен 1200 кВт · ч/т:

$$q = 0,00285 - 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot (1200 - 800) = 0,00215 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{см}).$$

Далее необходимо определить величину удельной радиальной проекции площади контакта абразивных зерен с древесиной. Примем, что насечка камня осуществляется с помощью спиральной шарошки. Тогда при условии, что относительная величина проекции

поверхности контакта абразивных зерен с древесиной (из табл. 16) равна 0,032, получим

$$F_r = 0,032 \cdot 0,205 \cdot (1 - 0,326 \cdot 0,04 \cdot 10) = 0,0057 \text{ см}^2/\text{см}^2.$$

Для данного типа дефибрера диаметр камня составляет 1,8 м, частота вращения вала –  $300 \text{ мин}^{-1}$ , максимальная длина перерабатываемых балансов – 1,5 м. Следовательно, окружная скорость камня равна

$$V_k = \frac{3,14 \cdot 1,8 \cdot 300}{60} = 28,26 \text{ м/с}.$$

Отсюда производительность дефибрера составит

$$Q = 0,864 \cdot 10^5 \cdot 0,00215 \cdot 0,0057 \cdot 28,26 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 1,8 \cdot \arcsin\left(\frac{1,22}{1,8}\right) = 120 \text{ т/сут}.$$

Эффективная мощность привода дефибрерного камня равна

$$N_{\text{эф}} = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 925 \cdot 10^4 \cdot 0,0057 \cdot 28,26 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 1,8 \cdot \arcsin\left(\frac{1,22}{1,8}\right) = 5393 \text{ кВт}.$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Определить производительность и мощность привода цепного дефибрера марки ДЦ-04-01 в летний период, вырабатывающего бурую древесную массу. Для насечки камня используется спиральная шарошка № 8, глубина насечки составляет 0,05 см. Для дефибрирования применяется среднезернистый кварцево-цементный камень. Отношение  $z/r$  принять равным 0,35.

2. Вычислить производительность и мощность привода цепного дефибрера марки ДЦ-06 в зимний период, вырабатывающего бурую древесную массу. Для насечки камня используется спиральная шарошка № 12, глубина насечки составляет 0,05 см. Отношение  $z/r$  принять равным 0,4.

3. Рассчитать основные параметры работы двухпрессового дефибрера с индивидуальным приводом производительностью

150 т/сут при производстве белой древесной массы для газетной бумаги.

#### **4. РАСЧЕТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ**

В настоящее время для размола бумажной массы широко применяются аппараты непрерывного действия – дисковые и конические мельницы. Непрерывное продвижение массы по каналам между ножами в мельницах обусловлено как давлением, создаваемым на входе в мельницу насосом или винтом, так и центробежными силами, вызываемыми ротором самой мельницы. Необходимая степень обработки волокон на выходе из мельницы регулируется величиной присадки ротора к статору и продолжительностью пребывания массы в мельнице, которая регулируется дросселированием потока с помощью задвижки, расположенной за мельницей.

До недавнего времени конические мельницы были одним из основных видов размалывающего оборудования, используемого на целлюлозно-бумажных предприятиях при непрерывном процессе размола волокнистых материалов.

В мировой практике встречаются различные по конструкции конические мельницы, отличающиеся друг от друга расположением вала, углом конуса, направлением движения массы, присадкой ротора или статора и другими признаками. Наибольшее распространение получили конические мельницы с горизонтальным расположением вала, малым углом конуса ( $16\text{--}22^\circ$ ), присадкой ротора и направлением движения массы от малого диаметра ротора к большому.

Конические мельницы могут применяться при размолу полуфабрикатов с концентрацией не выше 6%. Они выпускаются с литой, сборной и базальтовой гарнитурой. Мельницы с базальтовой гарнитурой используются преимущественно в тех случаях, когда требуется достижение высокой степени помола при незначительном укорочении волокон. Базальтовая гарнитура не загрязняет обрабатываемый полуфабрикат механическими продуктами износа, что очень важно при производстве бумаг для электромеханических изделий.

Конические мельницы могут применяться на размолу волокнистых полуфабрикатов только при низкой концентрации. Присущие им конструктивные особенности не позволяют вести размол при концентрации более 4–6% или использовать их на горячем размолу под давлением и в других специфических условиях. Они могут применяться на массном размолу, размолу отходов сортирования, при выравнивании массы перед бумаго- и картоноделательными машинами, часто

используются на дороспуске и размоле макулатурной массы, сухого и мокрого брака.

Основные параметры конических мельниц приведены в [5, 6].

В последние годы наибольшее распространение получили дисковые мельницы. Они вытесняют другие виды размалывающего оборудования благодаря преимуществам, основными из которых являются возможность размола при высокой концентрации (до 40%), более низкий удельный расход энергии, большая единичная производительность и мощность, компактность, простота обслуживания.

#### **4.1. Классификация дисковых мельниц**

Размол в дисковых мельницах происходит между вращающимся и неподвижным дисками, или между вращающимися в разные стороны дисками, которые облицованы размалывающей гарнитурой. В зависимости от числа зон размола и вращающихся размалывающих поверхностей различают однодисковые, сдвоенные и двухдисковые мельницы.

**Однодисковые мельницы** имеют одну зону размола с одной вращающейся и одной неподвижной размалывающими поверхностями. По техническим возможностям эти мельницы – наиболее универсальное размалывающее оборудование. Основной недостаток однодисковых мельниц – значительные осевые усилия, возникающие при их работе, что приводит к усложнению конструкции.

**Сдвоенные мельницы** имеют две зоны размола с одной вращающейся и одной неподвижной размалывающими поверхностями в каждой зоне. Эти мельницы как бы объединяют в себе две однодисковые мельницы. В них отсутствуют осевые усилия на валу, что значительно упрощает конструкцию.

**Двухдисковые мельницы** имеют одну зону размола и две вращающиеся в противоположные стороны размалывающие поверхности. По конструктивным решениям двухдисковые мельницы значительно сложнее однодисковых, а по технологическим возможностям не имеют значительных преимуществ перед однодисковыми и сдвоенными.

**Размалывающая гарнитура** – основной рабочий орган мельницы, осуществляющий непосредственное воздействие на волокна. Рабочая поверхность гарнитуры характеризуется числом и размерами ножей и канавок, а также их расположением на поверхности. Совместно с частотой вращения роторного диска и потребляемой мощностью параметры гарнитуры определяют качество размола массы, транспортирующую способность мельницы, ее технико-экономические показатели. Несмотря на накопленный опыт, выбор оптимального варианта гарнитуры для данного процесса (на практике применяется большое число различных типов гарнитуры) осуществляется обычно эмпирическим путем.

Технические характеристики дисковых мельниц и применяемых видов гарнитуры приведены соответственно в табл. 19–20.

Таблица 19

**Некоторые характеристики дисковых мельниц  
для размола массы низкой концентрации**

Марка мельницы	Диаметр размалывающей гарнитуры, мм	Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Установочная мощность, кВт	Мощность холостого хода, кВт	Возможная полезная мощность, кВт	Условный коэффициент эффективности, %	Окружная скорость диска, м/с
<b>Однодисковые мельницы</b>							
МД-00	315	1500	45	10	35	77	24,8
МД-02	500	1000	110	30	80	73	26,1
МД-14	630	750	160	40	120	75	24,8
МД-25	800	750	315	115	200	63	31,4
МД-31	1000	600	500	175	325	65	31,4
<b>Сдвоенные мельницы</b>							
МДС-00	315	1500	90	20	70	77	24,8
МДС-02	500	1000	200	50	150	75	26,1
МДС-14	630	750	315	65	250	78	24,8
МДС-24	800	750	630	210	420	67	31,4
МДС-33	1000	600	1000	320	680	68	31,4
МДС-44	1250	500	1600	500	1100	69	32,7

Таблица 20

**Характеристика основных типов гарнитуры для дисковых мельниц**

Типо-размер мельницы	Обозначение гарнитуры	Ширина ножа, мм	Ширина канавки, мм	Наличие перегородок в канавке	Режущая длина за 1 оборот, км	Количество секторов в диске, шт.
1	2	3	4	5	6	7
00	МДС-00.00.002 (МДС-00.00.004) МДС-00.00.002-01	3	3	–	0,96	1
	(МДС-00.00.004-01)	4	4	–	0,56	1

Окончание табл. 20

1	2	3	4	5	6	7
0	P-500.001 (P-500.002)	3	4	+	2,46	4
	P-500.005	4	5	+	1,20	4
1	P-630.002 (P-630.004)	3	4,5	+	5,90	6
	P-630.007	4	6,3	+	2,00	6
2	P-800.003	3	4	+	7,10	6
	P-800.011 (P-800.012)	3	5	–	9,60	6
	Д-800.001	3	8	+	1,90	6
3	P-1000.002	3	5	+	18,00	8
	P-1000.0013 (P-1000.0014)	2,6	5,2	–	19,00	8
	МД-56.01.005 У1	3	8	+	4,00	8

#### 4.2. Расчет производительности и мощности привода машин для размола массы

К основным параметрам дисковых мельниц относятся диаметр дисков размалывающей гарнитуры, частота вращения ротора, мощность электродвигателя, производительность мельницы, степень обработки полуфабриката, масса мельницы.

Мощность на валу мельниц с ножевой гарнитурой, работающих с бумажной массой при концентрации до 6%, равна

$$N = N_p + N_n + N_{г.п} + N_{м.п},$$

где  $N$  – полная мощность, расходуемая на размол, кВт;  $N_p$  – полезная мощность размола, кВт;  $N_n$  – мощность, затрачиваемая на создание напора (насосный эффект), кВт;  $N_{г.п}$  – мощность

гидравлических потерь, расходуемая преимущественно на трение ротора о массу, являющаяся основной непроизводительной составляющей, кВт;  $N_{м.п}$  – мощность, затрачиваемая на преодоление механических потерь в сальниках и подшипниках, кВт ( $N_{м.п} = (0,05 \dots 0,07) \cdot N$ ).

Полезная мощность размола определяется по формуле

$$N_p = \frac{B_s \cdot L_s \cdot j}{10^3},$$

где  $B_s$  – удельная нагрузка на кромки ножей, Дж/м;  $L_s$  – секундная режущая длина, м/с;  $j$  – количество зон размола (для однодисковой мельницы  $j = 1$ ; для сдвоенной –  $j = 2$ ).

Удельная нагрузка на кромки ножей характеризует работу, производимую над размалываемыми волокнами ножом ротора длиной 1 м при прохождении им ножа статора, и определяется по табл. 21.

Таблица 21

**Удельная нагрузка при размоле некоторых видов волокнистых полуфабрикатов**

Вид размалываемого материала	Удельная нагрузка, Дж/км		
	максимальная	рекомендуемая для укорочения волокон	рекомендуемая для фибриллирования волокон
Сульфатная небеленая хвойная целлюлоза	2500–2700	1800–2700	1000–1200
Сульфатная беленая хвойная целлюлоза	1800–2000	1500–2000	800–1000
Сульфитная небеленая хвойная целлюлоза	1400–1600	1200–1600	600–800
Сульфитная беленая хвойная целлюлоза	800–1200	1000–1200	500–700
Сульфатная беленая лиственная целлюлоза	1100–1300	–	–
Хвойная полуцеллюлоза	1300–1500	–	–
Лиственная полуцеллюлоза	1000–1200	–	–
Отходы сортирования древесной массы	1500	–	–
Тростниковая сульфатная целлюлоза	800	–	–

Секундная режущая длина показывает общую длину пересечений ножей статора ножами ротора за одну секунду и косвенно характеризует количество одновременно обрабатываемых волокон, т. е. производительность мельницы:

$$L_s = \frac{n \cdot L_0}{60},$$

где  $n$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $L_0$  – режущая длина за один оборот, м.

Секундная режущая длина гарнитуры зависит от конструктивного исполнения ее рабочей поверхности и скорости вращения ротора. Ориентировочно секундная режущая длина может быть рассчитана по следующей формуле:

$$L_s = 350 \cdot D^3 \cdot n,$$

где  $D$  – диаметр размалывающей гарнитуры, м;  $n$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ .

В случае, если шаг ножей ротора и статора постоянен, секундная режущая длина гарнитуры определяется как

$$L_s = \frac{n \cdot D^3 \cdot (1+k)^2 \cdot (1-k)}{48 \cdot t_p \cdot t_c \cdot \sin \alpha},$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий отношение малого диаметра размалывающей зоны гарнитуры к большому  $k = d/D$  (для конической мельницы  $k = 0,55-0,65$ , для дисковой мельницы  $k = 0,35-0,60$ );  $t_p$ ,  $t_c$  – соответственно средний шаг между ножами гарнитур ротора и статора, м;  $\alpha$  – угол конусности мельниц (для дисковых мельниц  $\alpha = 90^\circ$ ), град.

Определенные затруднения представляет выбор частоты вращения ротора мельницы. В принципе можно задаться любым стандартным значением частоты вращения в пределах от 250 до 3000  $\text{мин}^{-1}$  (250, 275, 300, 375, 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000  $\text{мин}^{-1}$ ). Однако стремление к выбору большого числа оборотов хотя и приводит к некоторому уменьшению диаметра гарнитуры, но вместе с тем вызывает резкое возрастание непроизводительной мощности и снижает коэффициент эффективности мельницы. Опыт эксплуатации мельниц свидетельствует о том, что при размоле бумажной массы концентрацией до 6% необходимо выбирать такую частоту вращения ротора мельницы, чтобы окружная скорость на

большем диаметре не превышала для конической мельницы 18–21 м/с, для конической быстроходной мельницы (гидрофайнер) – 30–35 м/с; для дисковой 25–30 м/с (табл. 19). При этом частота вращения ротора мельницы определяется по формуле

$$n_n = \frac{v}{\pi \cdot D},$$

где  $v$  – окружная скорость на большем диаметре, м/с.

Для вычисления большего диаметра рекомендуется следующая формула:

$$D = \frac{10 \cdot (b + \delta)}{\pi \cdot (1 + k)} \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot \pi \cdot Q \cdot \Delta^\circ\text{ШР} \cdot A_0 \cdot \sin \alpha}{3 \cdot (1 - k) \cdot \psi \cdot B_s \cdot v}},$$

где  $b$  – средняя ширина канала между ножами (для конической мельницы  $b = 8–10$  мм, для дисковой мельницы  $b = 3–6$  мм), м;  $\delta$  – толщина ножей гарнитуры (для конической мельницы  $\delta = 4–6$  мм, для дисковой мельницы  $\delta = 3–5$  мм), м;  $Q$  – производительность мельницы, т/сут;  $\Delta^\circ\text{ШР}$  – прирост степени помола при прохождении массы через мельницу;  $A_0$  – удельный полезный расход энергии, МДж/(т · °ШР);  $\psi$  – отношение числа ножей на статоре к числу ножей на роторе (обычно  $\psi = 1$ ).

Удельный полезный расход энергии показывает, какая работа затрачивается в межножевом зазоре мельницы для того, чтобы увеличить степень помола 1 т абсолютно-сухого волокна на 1°ШР. Этот показатель при постоянном удельном давлении в зазоре между ножами ротора и статора не зависит от типа размалывающей машины и определяется видом волокна и его сопротивляемостью размолу (табл. 22).

Процесс размола характеризуется несколькими периодами размола. Начальный период (от 13–15 до 27–30°ШР) отмечается значительным удельным расходом энергии. В этот период происходит удаление первичной стенки волокна (что ускоряет его набухание), нарушение связей между фибриллами внутри волокна (внутреннее фибриллирование), повышение гибкости волокон, в результате чего резко возрастают механические показатели бумаги, сопротивление фильтрации и соответственно степень помола увеличивается медленно.

Средний период (от 27–30 до 65–70°ШР) характеризуется возрастанием внешнего фибриллирования, сопротивления фильтрации и

степени помола. Механическая прочность, определяемая разрывной длиной, достигает максимума в конце периода. Удельный расход энергии на этом участке наименьший.

Заключительный период (70–93°ШР) отличается замедлением процесса размола. Удельный расход энергии на этом участке размола достигает максимума. Прочность бумаги постепенно падает.

В сумме  $N_n$  и  $N_{г.п}$  составляют мощность, условно называемую гидравлической мощностью мельницы  $N_g$ , кВт. Гидравлическая мощность рассчитывается по следующим эмпирическим зависимостям:

$$- \text{ для конических мельниц } N_g = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot 60^{2,33} \cdot n^{2,33} \cdot D^{3,66};$$

$$- \text{ для дисковых мельниц } N_g = \xi \cdot 60^{2,57} \cdot n^{2,57} \cdot D^4,$$

где  $n$  – частота вращения ротора,  $c^{-1}$ ;  $D$  – большой диаметр ротора, м;  $\xi$  – коэффициент, равный для однодисковой мельницы  $12,5 \cdot 10^{-6}$ , для сдвоенной –  $23 \cdot 10^{-6}$ .

Таблица 22

**Средние значения удельных расходов энергии  $A_0$  при размоле некоторых видов волокнистых полуфабрикатов**

Вид размалываемого материала	Удельный полезный расход энергии, МДж/(т · °ШР)		
	начальный период	средний период	заклучительный период
Сульфатная хвойная небеленая целлюлоза	43–54	21–25	90–110 (до 96°ШР)
Сульфатная хвойная беленая целлюлоза	40–43	18–21	–
Сульфитная хвойная небеленая целлюлоза	25–32	15–18	–
Сульфитная хвойная беленая целлюлоза	21–25	11–14	50–58 (до 90°ШР)
Сульфатная лиственная беленая целлюлоза	–	36 (20–80°ШР)	–
Моносльфитная полуцеллюлоза	14–18	–	–
Отходы сортирования древесной массы	29–36	25–29	–

Затраты мощности на механические потери можно учесть, введя механический КПД мельницы  $\eta_m$ , равный 0,93–0,95. Тогда

$$N = \frac{1}{\eta_m} \cdot (N_p + N_r).$$

Обработка массы при высокой концентрации осуществляется в основном за счет трения волокон друг о друга. Ножи лишь предотвращают проскальзывание волокон относительно поверхности дисков. Поэтому при размоле массы высокой концентрации расчет мощности ведется не по удельной нагрузке на кромку ножа, а по среднему давлению между дисками.

В общем случае мощность, затрачиваемая на размол массы высокой концентрации, может быть определена по формуле

$$N_p = C_p \cdot p \cdot n \cdot D^3 \cdot (1 - k^3),$$

где  $C_p$  – коэффициент размола (при давлении 200–300 кПа находится в пределах 5,0–7,5);  $p$  – давление между дисками, составляющее 200–300 кПа;  $k$  – коэффициент, характеризующий отношение малого диаметра размалывающей зоны гарнитуры к большому.

Коэффициент размола зависит от типа гарнитуры и имеет большие значения в пределах 6,5–7,5 для мельниц первой ступени размола щепы, а также для мельниц, используемых для размола грубых отходов (щепы после молотковых мельниц, сучков непровара и т. д.), и массы при очень высокой концентрации (25% и выше). В остальных случаях  $C_p = 5,0–6,5$ .

Часто возникает задача определить производительность существующей мельницы и рассчитать число таких мельниц для обеспечения производительности данного потока. Производительность одной мельницы с известной секундной режущей длиной гарнитуры находится из соотношения

$$Q = \frac{86,4 \cdot N_p}{A_0 \cdot \Delta^\circ \text{ШР}} = \frac{0,0864 \cdot B_s \cdot L_s \cdot j}{A_0 \cdot \Delta^\circ \text{ШР}}.$$

#### 4.3. Пример расчета основных параметров машин для размола массы

**Задача.** Определить мощность, потребляемую сдвоенной дисковой мельницей марки МДС-24, которая оснащена размольной гарнитурой

P–800.003, при размоле сульфатной беленой хвойной целлюлозы с концентрацией 5%.

**Решение.** Мощность, потребляемую мельницей, найдем по формуле

$$N = \frac{1}{\eta_m} \cdot (N_p + N_r).$$

Для определения полезной мощности размола необходимо рассчитать секундную режущую длину, которая в соответствии с заданными условиями составит

$$L_s = \frac{750 \cdot 7100}{60} = 88750 \text{ м/с.}$$

Отсюда при условии, что удельная нагрузка на кромки ножей размалывающей гарнитуры равна 1,9 Дж/м, полезная мощность размола определяется как

$$N_p = \frac{1,9 \cdot 88750 \cdot 2}{10^3} = 337,3 \text{ кВт.}$$

Гидравлическая мощность для сдвоенной дисковой мельницы равна

$$N_r = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 60^{2,57} \cdot \left(\frac{750}{60}\right)^{2,57} \cdot 0,8^4 = 230,9 \text{ кВт.}$$

Таким образом, мощность, потребляемая мельницей, при  $\eta_m = 0,94$  составляет

$$N = \frac{1}{0,94} \cdot (337,3 + 230,9) = 605 \text{ кВт.}$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Определить различными способами секундную режущую длину размольной гарнитуры P–630.007, используемой для оснащения мельницы марки МД-14.

2. Рассчитать количество мельниц марки МД-31, оснащенных размольной гарнитурой P–1000.002, чтобы обеспечить производительность потока 250 т/сут при переработке сульфатной и

сульфитной хвойной небеленой целлюлозы. Мельницы должны обеспечить степень помола волокнистых полуфабрикатов до 20°ШР при условии максимального фибриллирования волокон.

3. Найти производительность дисковой мельницы марки МД-3Ш7, оснащенной размольной гарнитурой Р-1000.013, при размоле отходов сортирования древесной массы с высокой концентрацией от степени помола 15 до 30°ШР.

4. Определить производительность дисковой мельницы марки МДС-24, оснащенной размольной гарнитурой Р-800.011, при домалывании с укорочением волокон сульфатной хвойной небеленой целлюлозы от степени помола 30 до 35°ШР.

## 5. МАССОНАПУСКНЫЕ УСТРОЙСТВА

Массонапускные устройства (напорные ящики) предназначены для напуска волокнистой суспензии на движущуюся сетку бумагоделательной машины. Распределяя волокнистую суспензию по всей ширине напуска на сетку, массонапускное устройство должно обеспечивать одинаковый расход, скорость и концентрацию массы по ширине потока, причем бумагообразующие волокна массы должны быть беспорядочно ориентированы.

Для предотвращения образования сгустков (флокул) волокон и их оседания поток массы должен быть бурным, вихревым, или, точнее говоря, вектор скорости в разных точках потока должен быть неодинаковым как по величине, так и по направлению. Такой поток с нерегулярным изменением его гидродинамических характеристик называется **турбулентным**. Турбулентность потока волокнистой суспензии достигается за счет конструкции массонапускного устройства. Стремятся получить так называемую мелкомасштабную турбулентность, характеризующуюся малым размером вихрей в потоке массы. Только в этом случае обеспечивается ликвидация сгустков волокон и достигается равномерный просвет бумаги.

### 5.1. Классификация массонапускных устройств

Для тихоходных машин, имеющих скорость до 200 м/мин, применяются **открытые массонапускные устройства**. Важным элементом такого устройства является потокораспределитель, позволяющий равномерно распределить массу по ширине ящика. Наибольшее распространение получили конические многотрубные потокораспределители. В них масса подается в широкую часть коллектора потокораспределителя и проходит в полость устройства (ящика) по множеству трубок или по отверстиям в перфорированной плите. Перемещаясь по коллектору, часть массы по трубкам поступает в ящик, а оставшаяся уменьшающаяся по количеству часть массы следует дальше вдоль коллектора к более узкой его части.

Благодаря уменьшению сечений коллектора по ходу массы достигается постоянство скорости по длине коллектора, т. е. по ширине машины. Для предотвращения застойных явлений в узком конце коллектора предусмотрена циркуляция массы из узкого конца коллектора в широкий. Имеющийся на циркуляционном трубопроводе вентиль

позволяет регулировать степень циркуляции, чем достигается изменение скорости массы в коллекторе и обеспечивается равномерность скорости и расхода ее в трубках, соединяющих коллектор и ящик. На этих трубках также устанавливаются вентили для регулирования расхода через каждую трубку. В массонапускных устройствах открытого типа на тракте движения массы предусматриваются поперечные перегородки, при огибании которых поток массы становится турбулентным.

Передняя стенка массонапускного устройства выполняется подвижной. Перемещая стенку, регулируют высоту выпускной щели, а также изменяют зону встречи струи массы и сетки. На передней стенке имеется верхняя губа, которая снабжена устройствами для местного регулирования высоты щели, предназначенными для поддержания одинакового значения  $1 \text{ м}^2$  бумаги по ширине напуска. Для равномерного распределения массы и устранения сгустков устанавливается вращающийся перфорированный валик.

Скорость истечения струи массы из устройства характеризуется высотой столба массы в нем, или уровнем. При увеличении скорости машин эта высота становится значительной, поэтому при скоростях больше 400 м/мин используют *закрытые массонапускные устройства*, в которых скорость выхода струи определяется суммой статического напора столба массы в самом устройстве и избыточного давления воздушной подушки над слоем массы. Понятно, что закрытые массонапускные устройства должны быть герметичными.

Закрытое массонапускное устройство включает корпус, коллекторную камеру с двухступенчатой коллекторной плитой, перфорированные валы. Передняя стенка устройства снабжена механизмом для изменения ее положения. Имеются механизмы для регулирования положения верхней губы. В устройствах закрытого типа предусматривается сложная траектория движения массы, поскольку повороты потока способствуют турбулизации и уменьшению флокуляции. Этой же цели, а также обеспечению равномерной концентрации массы служат вращающиеся перфорированные валики. В некоторых конструкциях устанавливается 5–6 перфорированных валиков.

В связи с широким применением способа формирования полотна бумаги между двумя сетками начали использовать *массонапускные устройства гидродинамического типа*. В двухсеточных формующих устройствах формирование происходит значительно быстрее, чем в односеточных, при этом если на одной сетке благодаря медленному обезвоживанию и тряске

осуществляется выравнивание концентрации и улучшение просвета, т. е. равномерности распределения волокон по площади, то при двухсеточном формовании необходимо, чтобы поступающая на сетку струя имела высокую равномерность распределения волокон, так как это распределение уже практически не меняется при двустороннем обезвоживании на двухсеточных формующих устройствах. Поэтому для двухсеточного формования пришлось разрабатывать более совершенные массонапускные устройства, обеспечивающие повышенную равномерность концентрации массы по объему потока, а также высокую степень мелкомасштабной турбулентности (с малыми размерами вихрей), препятствующей флокуляции.

Для массонапускных устройств турбулентного типа характерны относительно малые размеры поперечных сечений и, соответственно, большие скорости движения массы (обычно 8–10 м/с). Мелкомасштабная турбулентность обеспечивается прохождением массы через множество каналов, создаваемых перфорированными плитами с каналами круглого сечения, набором трубок или пакетов пластин, образующих узкие каналы. В плитах выполняются иногда отверстия со ступенчато изменяющимися диаметрами. Небольшие размеры каналов обуславливают малый диаметр образующихся вихрей, т. е. мелкомасштабную турбулентность, которая возникает за счет трения массы о стенки каналов.

Следует отметить, что, несмотря на значительный объем теоретических работ в области разработки массонапускных устройств, их проектирование ведется в значительной степени на основе исследований многих вариантов опытных образцов. При конструировании массонапускных устройств особое значение придается жесткости и виброустойчивости корпуса, в связи с чем применяются в основном коробчатые конструкции. Внутренние поверхности облицовываются нержавеющей полированной сталью для предотвращения зависания волокон на стенках. Размеры поперечных сечений устройств и каналов в них выполняются с точностью до 0,10–0,01 мм для обеспечения стабильности гидродинамических процессов.

## **5.2. Расчет параметров массонапускных устройств**

Расчет массонапускных устройств включает в себя определение расхода бумажной массы, поступающей в потокораспределитель, установление конструктивных размеров потокораспределителя, вычисление потерь напора бумажной массы в напорном ящике и ширины выпускной щели.

Количество массы, подаваемой в напорный ящик, находится по формуле

$$Q_m = \left(1 + \frac{\zeta}{100}\right) \cdot \frac{Q \cdot T_k}{3600 \cdot (T_n - T_p)},$$

где  $Q_m$  – количество массы, подаваемой в напорный ящик, м<sup>3</sup>/с;  $\zeta$  – процент рециркулирующей в потокораспределителе массы ( $\zeta = 5–20\%$ ), %;  $Q$  – производительность бумагоделательной машины, т/ч;  $T_k$  – сухость бумажного полотна на накате, %;  $T_n$  – концентрация массы в напорном ящике, %;  $T_p$  – концентрация массы в регистровой воде, %.

Производительность бумагоделательной машины вычисляется как

$$Q = 0,06 \cdot B \cdot V \cdot q,$$

где  $B$  – ширина бумажного полотна на накате, м;  $V$  – скорость бумагоделательной машины, м/мин;  $q$  – масса 1 м<sup>2</sup> вырабатываемой бумаги, г.

При расчете конструктивных размеров потокораспределителя скорость поступающей бумажной массы стремятся поддерживать в пределах 2–4 м/с. Коллекторы потокораспределителей выполняются трубчатыми и прямоугольного поперечного сечения.

Площадь входного сечения коллектора прямоугольной формы определяется по формуле

$$F_0 = \frac{Q_m}{V_n},$$

где  $F_0$  – площадь входного сечения, м<sup>2</sup>;  $V_n$  – скорость массы, поступающей в потокораспределитель, м/с.

Ширина сечения коллектора (при постоянной высоте) устанавливается на основании табл. 23.

Таблица 23

**Ширина сечения коллектора в зависимости от отношения  $\frac{l}{\sqrt{F_0}}$**

$\frac{l}{\sqrt{F_0}}$	Ширина коллектора	
	на расстоянии $0,8 \cdot l$ от входа, $B_1$	на конечном сечении, $B_2$
5	$0,34 \cdot B_0$	$0,16 \cdot B_0$
10	$0,36 \cdot B_0$	$0,17 \cdot B_0$
15	$0,37 \cdot B_0$	$0,18 \cdot B_0$
20	$0,39 \cdot B_0$	$0,19 \cdot B_0$

*Примечание.*  $l$  – длина коллектора, м;  $B_0$  – ширина камеры потокораспределителя на входе, мм.

Определив отношение  $\frac{l}{\sqrt{F_0}}$ , по табл. 23 находят ширину коллектора в точке, соответствующей расстоянию  $0,8 \cdot l$  от входного сечения, а также ширину конечного сечения. При этом коллектор оказывается образованным двумя участками задней стенки коллектора, наклон которых к передней стенке не одинаков.

Потокораспределители могут выполняться с коллектором круглого сечения. В этом случае диаметр начального сечения коллектора определяется по формуле

$$D_0 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q_M}{V_{\Pi}}},$$

где  $D_0$  – диаметр начального сечения коллектора, м.

Круглый коллектор выполняется из трех конических участков, первый из которых проходит от начала коллектора до  $0,6$  его длины, второй – до  $0,9$  его длины, а третий – до конца коллектора. По величине начального диаметра определяется площадь начального сечения и затем рассчитывается отношение  $\frac{l}{\sqrt{F_0}}$ . Диаметр промежуточных сечений коллектора находится по табл. 24.

Таблица 24

**Диаметр сечения коллектора по длине в зависимости от отношения  $\frac{l}{\sqrt{F_0}}$**

$\frac{l}{\sqrt{F_0}}$	Диаметр коллектора в сечении по длине		
	на расстоянии $0,6 \cdot l$ от входа, $D_1$	на расстоянии $0,9 \cdot l$ от входа, $D_2$	на расстоянии $l$ от входа, $D_3$
5	$0,16 \cdot D_0$	$0,17 \cdot D_0$	$0,18 \cdot D_0$
10	$0,17 \cdot D_0$	$0,18 \cdot D_0$	$0,19 \cdot D_0$
15	$0,18 \cdot D_0$	$0,19 \cdot D_0$	$0,20 \cdot D_0$
20	$0,19 \cdot D_0$	$0,20 \cdot D_0$	$0,21 \cdot D_0$

5	$0,71 \cdot D_0$	$0,50 \cdot D_0$	$0,40 \cdot D_0$
10	$0,72 \cdot D_0$	$0,52 \cdot D_0$	$0,41 \cdot D_0$
15	$0,73 \cdot D_0$	$0,53 \cdot D_0$	$0,42 \cdot D_0$
20	$0,74 \cdot D_0$	$0,54 \cdot D_0$	$0,43 \cdot D_0$

Значительные потери напора наблюдаются при движении массы через перфорированную плиту и перфорированный валик.

Основными характеристиками перфорированных валов являются диаметр отверстий и живое сечение (отношение площади отверстий к площади цилиндрической наружной поверхности вала). Живое сечение определяется по следующей формуле

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{2 \cdot t_1 \cdot t_2},$$

где  $f$  – живое сечение перфорированного вала, мм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр отверстий, мм;  $t_1, t_2$  – шаг отверстий в окружном направлении и по длине вала соответственно, мм.

Потери напора при движении потока через перфорированный вал рассчитываются по формуле

$$\Delta P_1 = \xi_1 \cdot \frac{V_1^2 \cdot 10^4}{2 \cdot g},$$

где  $\Delta P_1$  – потери напора при движении потока бумажной массы через перфорированный вал, Па;  $\xi_1$  – коэффициент сопротивления, зависящий от живого сечения вала (табл. 25);  $V_1$  – скорость бумажной массы в зоне расположения перфорированного вала, м/с.

Таблица 25

**Значения коэффициента сопротивления  
в зависимости от живого сечения перфорированного вала**

Живое сечение, %	35	40	45	50	55
Коэффициент перфорации	10,3	6,9	4,8	3,2	2,3

Наибольшие потери напора возникают при движении волокнистой суспензии по отверстиям перфорированных плит, причем обычно учитываются только потери напора от местных сопротивлений при входе и выходе потока в отверстия плит, а также при движении потока по ступенчатым переходам трубок

перфорированной плиты. Потери напора с учетом местных сопротивлений составляют

$$\Delta P_2 = \xi_2 \cdot \frac{V_2^2 \cdot 10^4}{2 \cdot g},$$

где  $\Delta P_2$  – потери напора при движении потока бумажной массы через перфорированную плиту, Па;  $\xi_2$  – коэффициент местных сопротивлений;  $V_2$  – скорость бумажной массы в зоне входа в перфорированную плиту, м/с.

Коэффициент местных сопротивлений рассчитывается по следующей формуле

$$\xi_2 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_0}\right) + \left(1 + \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_3}\right)^2,$$

где  $\omega_0, \omega_3$  – площади поверхности входной и выходной сторон плиты соответственно, м<sup>2</sup>;  $\omega_1, \omega_2$  – площадь сечений отверстий перфорированной плиты для I и II ступеней соответственно, т. е. при разных диаметрах отверстий в I и во II ступенях плиты, м<sup>2</sup>.

Коэффициент местного сопротивления составляет обычно 0,85–1,00.

Суммарный напор, обеспечивающий напор массонапускного устройства равен

$$H = \Delta P_k + \Delta P_r,$$

где  $H$  – суммарный напор массонапускного устройства, Па;  $\Delta P_k$  – скоростной напор, Па;  $\Delta P_r$  – потеря напора в гидравлических сопротивлениях, Па.

При этом скоростной напор и потери напора в гидравлических сопротивлениях находятся по следующим формулам:

$$\Delta P_k = 0,136 \cdot V^2,$$

$$\Delta P_r = k \cdot \Delta P_\Sigma + \Delta P_h,$$

где  $V$  – скорость бумагоделательной машины, м/мин;  $k$  – коэффициент, учитывающий наличие гидравлических сопротивлений помимо перфорированной плиты и перфорированных валов ( $k = 1,1$ );  $\Delta P_\Sigma$  – сумма потерь напора на перфорированном валу и перфорированной плите, Па;

$\Delta P_h$  – потеря напора на подъем бумажной массы из коллектора до напускной щели, Па.

Выпускная щель образована верхней и нижней губами напорного ящика. Верхняя губа снабжена механизмом для регулирования ее положения относительно нижней губы, благодаря чему изменяется величина открывания щели. Величина открывания щели определяется по формуле

$$h = \frac{q}{11 \cdot (T_n - T_p) \cdot \beta},$$

где  $\beta$  – коэффициент сжатия струи (для щели с наклонной верхней стенкой  $\beta = 0,9$ ; для щели с вертикальной губой  $\beta = 0,8$ ).

### 5.3. Пример расчета основных параметров напорного ящика

**Задача.** Рассчитать секундный расход бумажной массы, подаваемой в напорный ящик бумагоделательной машины при выработке газетной бумаги массой  $51 \text{ г/м}^2$ . Определить конструктивные размеры потокораспределителя с прямоугольным сечением и величину открытия выпускной щели с наклонной верхней стенкой, если ширина бумажного полотна на накате составляет  $6,2 \text{ м}$ , скорость бумагоделательной машины равна  $700 \text{ м/мин}$ , сухость бумажного полотна на накате составляет  $95\%$ , концентрация массы, подаваемой в напорный ящик, равна  $0,66\%$ , концентрация регистровой воды составляет  $0,01\%$ , а процент рециркуляции массы в потокораспределителе –  $15\%$ .

**Решение.** Производительность бумагоделательной машины составит

$$Q = 0,06 \cdot 6,2 \cdot 700 \cdot 51 = 13\,280 \text{ кг/ч.}$$

Следовательно, количество массы, подаваемой в напорный ящик, равно

$$Q_m = \left(1 + \frac{15}{100}\right) \cdot \frac{13,28 \cdot 95}{3600 \cdot (0,66 - 0,01)} = 0,62 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Скорость поступающей бумажной массы в потокораспределитель примем  $3 \text{ м/с}$ . Тогда площадь входного сечения коллектора прямоугольной формы будет равна

$$F_0 = \frac{0,62}{3} = 0,207 \text{ м}^2.$$

Постоянная по величине высота камеры потокораспределителя принята равной  $b_0 = 300$  мм. Следовательно, ширина камеры на входе равна

$$B_0 = \frac{0,207}{0,3} = 0,69 \text{ м.}$$

При длине коллектора, равной  $6,2 + 0,25 = 6,45$  м, отношение  $\frac{l}{\sqrt{F_0}}$  составит  $\frac{6,45}{\sqrt{0,207}} = 14,2$ . В соответствии с табл. 23 найдем две величины ширины камеры:  $B_1 = 0,37 \cdot B_0 = 0,37 \cdot 690 = 255$  мм и  $B_2 = 0,18 \cdot B_0 = 0,18 \cdot 690 = 124$  мм.

Величина открытия выпускной щели равна

$$h = \frac{51}{11 \cdot (0,66 - 0,01) \cdot 0,9} = 7,9 \text{ мм.}$$

### ***Задачи для самостоятельного решения***

1. Рассчитать скорость массы, подаваемой в потокораспределитель, и конструктивные размеры потокораспределителя прямоугольного сечения, если его длина составляет 4,65 м, а высота равна 250 мм. При этом ширину на входе принять равной 1000 мм. Производительность бумагоделательной машины составляет 12 600 кг/ч, сухость бумаги на накате 95%. Концентрация бумажной массы, поступающей в напорный ящик, и концентрация регистровой воды соответственно равны 0,8 и 0,05%. Процент рециркулирующей массы принять равным 6%.

2. Определить суммарный напор, необходимый для работы массонапускного устройства, в конструкции которого предусмотрены перфорированный вал с живым сечением 42% и перфорированная плита шириной 6,5 м и высотой 600 мм. Общее количество отверстий в плите равно 1080 штук. Диаметр их на первой и второй ступенях составляет соответственно 12 и 18 мм. Скорость бумагоделательной машины принять равной 880 м/мин. Секундный расход массы равен

0,74 м<sup>3</sup>/с. Скорость массы в зоне перфорированного вала принять равной 4 м/с. Потерей напора на подъем бумажной массы пренебречь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников, В. Л. Бумага и картон из волокнисто-полимерных композиций / В. Л. Колесников. – Минск: БГТУ, 2004. – 274 с.
2. Черная, Н. В. Проклейка бумаги и картона в кислой и нейтральной средах / Н. В. Черная, А. И. Ламоткин. – Минск: БГТУ, 2003. – 345 с.
3. Колесников, В. Л. Математические основы компьютерного моделирования химико-технологических систем / В. Л. Колесников. – Минск: БГТУ, 2003. – 312 с.
4. Курсовое и дипломное проектирование оборудования предприятий целлюлозно-бумажной промышленности: учеб. пособие / под ред. А. Д. Зубец [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1989. – 175 с.
5. Оборудование целлюлозно-бумажного производства: в 2 т. / под ред. В. А. Чичаева [и др.]. – М.: Лесная промышленность, 1981–1982. – Т. 1: Оборудование для производства волокнистых полуфабрикатов. – 1981. – 368 с.
6. Гаузе, А. А. Оборудование для подготовки бумажной массы: учеб. для вузов / А. А. Гаузе, В. Н. Гончаров, И. Д. Кугушев. – М.: Экология, 1992. – 352 с.
7. Ласкеев, П. Х. Производство древесной массы / П. Х. Ласкеев. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 560 с.
8. Горскі, Г. М. Тэхналогія паперы і кардону / Г. М. Горскі. – Мінск: БДТУ, 2003. – 244 с.
9. Лаптев, В. Н. Практикум по технологии и оборудованию целлюлозно-бумажного производства: учеб. пособие / В. Н. Лаптев, М. В. Ванчаков. – М.: Экология, 1991. – 208 с.
10. Кугушев, И. Д. Сортирование бумажной массы / И. Д. Кугушев, К. А. Смирнов. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 200 с.
11. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. / под ред. П. С. Осипова. – Т. 1: Сырье и производство полуфабрикатов. – Ч. 1: Производство полуфабрикатов. – СПб.: Политехника, 2003. – 633 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
1. Оборудование для окорки древесины.....	4
1.1. Классификация окорочных барабанов.....	6
1.2. Расчет производительности окорочных барабанов....	8
1.3. Расчет мощности привода окорочных барабанов.....	11
1.4. Пример расчета основных параметров окорочного барабана.....	13
2. Оборудование для измельчения древесины в щепу.....	16
2.1. Классификация дисковых рубительных машин.....	16
2.2. Расчет производительности дисковых рубительных машин	19
2.3. Расчет мощности привода рубительных машин.....	21
2.4. Пример расчета основных параметров рубительных машин.....	23
3. Оборудование древесно-массных заводов.....	27
3.1. Классификация дефибреров.....	27
3.2. Расчет дефибреров. Определение производительности дефибреров.....	28
3.3. Расчет мощности привода дефибрерного камня.....	31
3.4. Пример расчета основных параметров работы дефибреров.....	32
4. Расчет оборудования для размола волокнистых полуфабрикатов.....	34
4.1. Классификация дисковых мельниц.....	35
4.2. Расчет производительности и мощности привода машин для размола массы.....	37
4.3. Пример расчета основных параметров машин для размола массы.....	42
5. Массонапускные устройства.....	44
5.1. Классификация массонапускных устройств.....	44
5.2. Расчет параметров массонапускных устройств.....	46
5.3. Пример расчета основных параметров напорного ящика	51
Литература.....	53



## 6. РАСЧЕТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СОРТИРОВАНИЯ БУМАЖНОЙ МАССЫ

### 6.1. Классификация оборудования для сортирования бумажной массы

Обеспечение необходимого качества продукции предполагает очистку целлюлозы и бумажной массы от разного рода загрязнений – минеральных и металлических включений, сучков, непровара, костры, сгустков и комков волокон. Существует множество видов и типоразмеров сортирующего оборудования. Для грубого сортирования массы, когда удалению подлежат включения большого размера типа сучков, непровара, а также сорные включения, применяют плоские сортировочные установки с вибрирующим ситом – сучко- и щеполовители, а также центробежные сортировочные установки (сучколовители) с цилиндрическим ситом. Тонкое сортирование массы имеет целью удаление пучков и узелков из бумагообразующих волокон, а также небольших частиц костры, луба. Тонкое сортирование осуществляется на центробежных, напорных и вибрационных цилиндрических сортировочных установках.

Для тонкого сортирования волокнистой массы выпускаются центробежные, напорные и вибрационные цилиндрические сортировки.

Центробежные сортировки типа СЦ обеспечивают высокую эффективность сортирования и применяются для тонкого сортирования практически всех видов волокнистой массы. Сортировки этого типа работают при относительно низком давлении на входе массы (0,015–0,030 МПа) и со свободным (без подпора) выходом сортированной массы и отходов. Поэтому регулирование работы центробежных сортировок может осуществляться только по потоку поступающей массы. Теническая характеристика центробежных сортировок представлена в табл. 26

Таблица 26

Технические характеристики центробежных сортировок

Наименование параметра	СЦ-0,4-01	СЦ-1,0-01	СЦ-1,6-01	СЦ-2,6-01
1	2	3	4	5
Площадь сита, м <sup>2</sup>	0,4	1,0	1,6	2,6

Окончание табл. 26

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:				
сульфитная целлюлоза при диаметре отверстий сита 2,2 мм (концентрация 1,2–1,4%)	25–30	60–80	90–125	150–200
древесная масса при диаметре отверстий сита 1,8 мм (концентрация 1,2–1,4%)	20–28	50–70	80–100	130–170
Максимальная концентрация сортируемой массы, %	2,5	2,5	2,5	2,5
Давление сортируемой массы, МПа	0,012–0,024	0,012–0,024	0,012–0,024	0,012–0,024
Давление разбавительной воды, МПа	0,035–0,040	0,035–0,040	0,035–0,040	0,035–0,040
Количество разбавительной воды, % от количества сортированной массы	10–30	10–30	10–30	10–30
Количество лопастей, шт.	6	8	8	10
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	1250	600	690	480
Мощность электродвигателя, кВт	22	30	75	100
Габаритные размеры, м				
длина	1,12	2,53	2,66	3,21
ширина	0,59	1,22	1,35	1,54
высота	1,04	1,70	2,05	2,28
Масса с электродвигателем, т	0,51	2,20	2,80	3,77

В напорных сортировках истечение суспензии через сито происходит под действием перепада давления на нем. Отходы и сортированная масса из напорных сортировок выходят под давлением. Отечественное машиностроение выпускает следующие конструкции напорных сортировок: односитовые типа УЗ-01 с гидродинамическими лопастями на роторе, расположенными в зоне сортируемой массы, эти сортировки используются в основном перед бумаго- и картоноделательными машинами и именуются узлоловителями; двухситовые типа УЗ-12 и СЗ-12 с гидродинамическими лопастями, расположенными в зоне сортируемой массы; односитовые типа УЗШ с гидродинамическими лопастями на роторе, расположенными в зоне сортированной массы, эти сортировки предназначены для сортирования загрязненной массы перед картоноделательной машиной и имеют ограниченное применение; односитовые типа-СЦН с цилиндрическим ротором, предназначенные для сортирования различных видов массы при

концентрации до 3%. Техническая характеристика сортировок представлена в табл. 27–30.

Таблица 27

**Технические характеристики односитовых напорных сортировок**

Наименование параметров	УЗ-01	УЗ-02
Площадь сита, м <sup>2</sup>	0,64	1,17
Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:	10–20	25–50
Максимальная концентрация сортируемой массы, %	1,3	1,3
Перепад давления, МПа	0,015–0,035	0,015–0,035
Наибольшее расчетное давление, МПа	0,5	0,5
Число лопастей ротора, шт.	2	2
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	300	300
Диаметр сита, мм	610	610
Высота сита, мм	335	610
Диаметр отверстий сита, мм	1,2–2,4	1,2–2,4
Мощность электродвигателя, кВт	5,5	10,0
Габаритные размеры, м		
длина	1,43	2,00
ширина	1,04	1,28
высота	1,50	1,99
Масса с электродвигателем, т	1,1	1,8

Таблица 28

**Технические характеристики двухситовых напорных сортировок**

Наименование параметров	УЗ-09	УЗ-12	УЗ-13	УЗ-15
1	2	3	4	5
Площадь сита, м <sup>2</sup>	0,90	1,60	2,92	5,60
Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:	30–60	45–110	60–200	100–400
Концентрация сортируемой массы, %	1,3	1,3	1,3	1,3
Перепад давления, МПа	0,02–0,05	0,02–0,05	0,02–0,05	0,02–0,05

Окончание табл. 28

1	2	3	4	5
Число лопастей ротора, шт.	4	4	4	6
Максимальное давление поступающей массы, МПа	0,5	0,5	0,5	0,5
Расход разбавительной воды, л/мин	–	–	–	–
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	478	424	310	210
Диаметр отверстий сит, мм	1,4–2,4	1,4–2,4	1,4–2,4	1,4–2,4
Мощность электродвигателя, кВт	10	17	30	75
Габаритные размеры, м				
длина	1,58	2,20	2,60	4,01
ширина	1,30	1,32	1,74	3,03
высота	1,38	1,42	1,74	2,65

Масса, т	0,88	1,87	3,00	8,30
----------	------	------	------	------

Таблица 29

### Технические характеристики двухситовых напорных сортировок

Наименование параметров	СЗ-09	СЗ-12	СЗ-13
Площадь сита, м <sup>2</sup>	0,90	1,60	2,92
Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:	30–70	50–120	150–250
Концентрация сортируемой массы, %	2,0	2,0	2,0
Перепад давления, МПа	0,02–0,05	0,02–0,05	0,02–0,05
Число лопастей ротора, шт.	6	8	8
Максимальное давление поступающей массы, МПа	0,5	0,5	0,5
Расход разбавительной воды, л/мин	до 500	до 750	до 1100
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	478	428	330
Диаметр отверстий сит, мм	1,4–3,0	1,4–3,0	1,4–3,0
Мощность электродвигателя, кВт	17	30	55
Габаритные размеры, м			
длина	1,58	2,21	2,61
ширина	1,30	1,34	1,79
высота	1,38	1,37	1,80
Масса, т	1,00	2,60	4,20

Таблица 30

### Технические характеристики напорных сортировок с цилиндрическим ротором

Наименование параметров	СЦН-0,4	СЦН-0,9	СЦН-2,0
1	2	3	4
Площадь сита, м <sup>2</sup>	0,45	0,9	2,00
Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:	30–160	75–300	150–600

Окончание табл. 30

1	2	3	4
Максимальная концентрация сортируемой массы, %	до 3,0	до 3,0	до 3,0
Перепад давления в сортировке, МПа	до 0,04	до 0,04	до 0,04
Давление поступающей массы, МПа	0,07–0,40	0,07–0,60	0,07–0,46
Расход разбавительной воды, л/мин	до 800	до 2000	до 1400
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	1460–1820	1035–1160	820–985
Диаметр ситового барабана, мм	380	530	800
Высота ситового барабана, мм	380	560	800
Размер отверстий сит, мм			
диаметр	1,2–3,0	1,2–3,0	1,2–3,0
ширина щелей	0,25–0,70	0,25–0,70	0,25–0,70
Мощность электродвигателя, кВт	55	100	250
Габаритные размеры, м			
длина	1,97	2,58	3,38
ширина	1,02	1,29	1,87
высота	1,42	1,87	2,84
Масса, т	1,70	2,79	6,27

Вибрационные цилиндрические сортировки типа СВЦ применяются, главным образом, для сортирования высококачественных видов целлюлозы (табл. 31).

Таблица 31

**Технические характеристики вибрационных цилиндрических сортировок**

Наименование параметров	СЦВ-04	СЦВ-05
1	2	3
Площадь сита, м <sup>2</sup>	2,34	3,14
Производительность по воздушно-сухому волокну, т/сут:	15–75	20–100
Максимальная концентрация сортируемой массы, %	1,5	1,5
Ширина щелей сита, мм	0,25–0,70	0,25–0,70
Частота вращения цилиндра, мин <sup>-1</sup>	5,8	5,8
Частота колебаний цилиндра, мин <sup>-1</sup>	1250	1250
Мощность электродвигателя привода цилиндра, кВт	1,1	1,1
Мощность электродвигателя привода вибрационного механизма, кВт	13	13

Окончание табл. 31

1	2	3
Габаритные размеры, м		
длина	2,85	2,83
ширина	3,56	3,70
высота	2,35	2,37
Масса, т	4,20	4,45

Одним из наиболее перспективных и широко распространенных видов сортирующего оборудования являются напорные сортировки с цилиндрическим ситом. Такие установки могут использоваться как для грубого, так и для тонкого сортирования массы. В напорных сортировках прохождение волокнистой суспензии через сито происходит под действием перепада давления по обеим его сторонам. Эти установки бывают с одним и двумя ситовыми барабанами, горизонтальные и вертикальные (по расположению барабана), с различными формами ротора и лопастей. Наиболее высокой производительностью характеризуются односитовые сортировки с цилиндрическим ротором, снабженным гидродинамическими лопастями. Особая форма лопастей обеспечивает пульсацию давления в волокнистой суспензии, под действием которой происходит прохождение массы сквозь сито, а также осуществляется эффективная очистка его поверхности. Рассматриваемые сортировочные установки могут с успехом использоваться для сортирования целлюлозы, древесной и макулатурной массы. Наибольшая эффективность работы установок достигается при концентрации массы 1,5–3,0%.

## 6.2. Определение производительности сортировочных машин

Производительность установки для сортирования бумажной массы определяется по формуле

$$Q = C_0 \cdot e^{-\omega k} \cdot k \cdot F \cdot a \cdot n \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\gamma}}, \text{ т/сут}$$

где  $Q$  – производительность сортировки, т/сут;  $C_0$  – концентрация исходной волокнистой массы, г/дм<sup>3</sup>;  $\omega$  – коэффициент пропорциональности;  $a$  – коэффициент, связывающий удельную производительность с частотой пульсаций, зависящий от концентрации и вида массы, с;  $k$  – коэффициент перфорации;  $F$  – площадь сита сортировки, м<sup>2</sup>;  $n$  – частота пульсаций массы создаваемая лопастными механизмами, с<sup>-1</sup>;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $\Delta P$  – перепад давления на сите сортировки, Па;  $\gamma$  – плотность сортируемой бумажной массы (для волокнистой суспензии концентрацией 0,3–2,0% плотность составляет 1000 кг/м<sup>3</sup>), кг/м<sup>3</sup>.

Значения коэффициентов  $a$  и  $\omega$  определяются с помощью табл. 32–33.

Таблица 32

### Значения коэффициента $a$

Вид волокнистого полуфабриката	Значение коэффициента $a$ при концентрации массы, г/л				
	3	6	9	12	15
Товарная древесная масса	0,54	0,63	0,84	1,07	1,27
Товарная сульфатная беленая целлюлоза марки Б-11	0,325	0,51	0,62	0,49	0,40

Таблица 33

### Значения коэффициента $\omega$

Вид массы	Сортирующие машины	При концентрации массы, г/л											
		3				6				9			
		при диаметре отверстий сит, мм											
		2,4	2,0	1,6	1,4	2,4	2,0	1,6	1,4	2,4	2,0	1,6	1,4
Товарная древесная масса	закрытого типа	4,55	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	центробежная сортировка	3,33	3,85	4,00	4,00	3,33	4,00	4,20	4,20	3,33	4,00	4,20	4,20
Товарная сульфатная целлюлоза	закрытого типа	5,56	6,25	12,5	12,5	5,90	6,25	12,5	12,5	6,20	6,25	12,5	12,5
	центробежная сортировка	–	–	–	–	4,16	4,16	5,00	5,00	3,60	3,60	5,00	5,00

Продолжение табл. 33

Вид массы	Сортирующие машины	При концентрации массы, г/л	
		12	15
		при диаметре отверстий сит, мм	

		2,4	2,0	1,6	1,4	2,4	2,0	1,6	1,4
Товарная древесная масса	закрытого типа	5,55	5,00	5,00	5,00	5,55	5,00	5,00	5,00
	центробежная сортировка	3,33	3,70	4,50	4,50	3,70	3,66	5,00	5,00
Товарная сульфатная целлюлоза	закрытого типа	6,70	6,25	12,5	12,5	6,25	6,70	12,5	12,5
	центробежная сортировка	3,85	3,85	5,00	5,56	3,33	3,85	5,00	5,00

Частота пульсаций создаваемых ротором определяется как

$$n = \frac{n_0 \cdot f}{60}, \text{ с}^{-1}$$

где  $n_0$  – частота вращения ротора сортировки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $f$  – количество лопастей у ротора

Коэффициент перфорации рассчитывается по формуле

$$k = \frac{\pi \cdot d^2}{2 \cdot t_1 \cdot t_2}$$

где  $d$  – диаметр отверстий сита сортировки, мм;  $t_1$  – шаг отверстий по горизонтали, мм; ;  $t_2$  – шаг отверстий по вертикали, мм.

Коэффициент расхода определяется из выражения

$$\mu = \frac{k^{0,98}}{\sqrt{0,27 \cdot g}}$$

При выборе параметров сита сначала задаются диаметром отверстий, обеспечивающим необходимое качество сортирования. После этого определяется коэффициент перфорации, обеспечивающий максимальную производительность сортировки.

Экспериментально установлено, что сто связь между оптимальной величиной коэффициента перфорации и диаметром отверстий определяется линейной зависимостью

$$k = \alpha d \pm \beta,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – опытные коэффициенты, зависящие от вида массы и определяемые по табл.34

Таблица 34

**Зависимость коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  от вида массы**

Вид массы	Значение коэффициента $\alpha$ для		Значение коэффициента $\beta$ для	
	сортировки закрытого типа	центробежной сортировки	сортировки закрытого типа	центробежной сортировки
Древесная масса	1,0	0,1	0	+0,06
Сульфитная	0,1	0,1	-0,06	+0,04

целлюлоза				
Сульфатная	0,1	0,05	-0,04	+0,16
целлюлоза				

### 6.3. Расчет мощности привода сортировочных машин

Расчет мощности привода сортировок производится с использованием теории подобия, при этом рассчитываемая сортировка сравнивается с известной, все параметры работы которой могут быть определены

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5, \text{ кВт}$$

где  $N_2$  – мощность двигателя проектируемой установки, кВт;  $N_1$  – мощность двигателя известной сортировки, кВт;  $l_2$  и  $l_1$  – длина перфорированной зоны ситового барабана у рассчитываемой и известной сортировки, м;  $n_1$  – частота вращения ротора известной сортировки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $n_2$  – частота вращения ротора проектируемой сортировки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D_1$  – внутренний диаметр ситового барабана существующей сортировки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D_2$  – внутренний диаметр ситового барабана проектируемой сортировки,  $\text{с}^{-1}$ .

### 6.4. Пример расчета оборудования для сортирования бумажной массы

**Задача.** На центробежной сортировке марки СЦ-1,0-0,1 сортируется древесная массы с концентрацией 1,5%. Перепад давления на сите сортировки составляет 22 кПа. В комплекте сортировки имеются сита с диаметром отверстий 1,4 мм и шагом отверстий (равным по горизонтали и вертикали) 2,0 мм; 2,5 мм и 3,5 мм. Определить оптимальный коэффициент перфорации и оптимальную производительность сортировки.

**Решение.** Оптимальная производительность сортировки для заданных условий достигается при установке сита с оптимальным коэффициентом перфорации. Следовательно,

$$k_1 = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{2 \cdot 2,0 \cdot 2,0} = 0,7693$$

$$k_2 = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{2 \cdot 2,5 \cdot 2,5} = 0,4924$$

$$k_3 = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{2 \cdot 3,5 \cdot 3,5} = 0,2512$$

Отсюда коэффициент расхода равен

$$\mu_1 = \frac{0,7693^{0,98}}{\sqrt{0,27 \cdot 9,81}} = 0,475$$

$$\mu_2 = \frac{0,4924^{0,98}}{\sqrt{0,27 \cdot 9,81}} = 0,307$$

$$\mu_3 = \frac{0,2512^{0,98}}{\sqrt{0,27 \cdot 9,81}} = 0,159$$

В соответствии с табл. коэффициенты  $\alpha$  и  $\omega$  составляют 1,27 и 5,0 соответственно. Для данной марки оборудования частота вращения ротора сортировки равна  $600 \text{ мин}^{-1}$ , количество лопастей у ротора составляет 8 штук, площадь сита сортировки равна  $1,0 \text{ м}^2$ .

Частота пульсаций массы, создаваемая лопастными механизмами

$$n = \frac{600 \cdot 8}{60} = 80 \text{ с}^{-1}$$

Отсюда производительность в зависимости от коэффициента перфорации равна

$$Q_1 = 15 \cdot e^{-5 \cdot 0,7693} \cdot 0,7693 \cdot 1,0 \cdot 1,27 \cdot 80 \cdot 0,475 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 22000}{1000}}$$

$$Q_1 = 78,9 \text{ т/сут}$$

$$Q_2 = 15 \cdot e^{-5 \cdot 0,4924} \cdot 0,4924 \cdot 1,0 \cdot 1,27 \cdot 80 \cdot 0,307 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 22000}{1000}}$$

$$Q_2 = 130,3 \text{ т/сут}$$

$$Q_3 = 15 \cdot e^{-5 \cdot 0,2512} \cdot 0,2512 \cdot 1,0 \cdot 1,27 \cdot 80 \cdot 0,159 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 22000}{1000}}$$

$$Q_3 = 115,0 \text{ т/сут}$$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что оптимальный коэффициент перфорации равен 0,4924 при шаге отверстий по вертикали и горизонтали 2,5 мм. Оптимальная производительность при этом составляет 130,3 т/сут.

#### *Задачи для самостоятельного решения:*

1. На центробежной сортировке марки СЦ-1,6-0,1 сортируется бумажная масса из сульфатной целлюлозы с концентрацией 1,2%. Перепад давления на сите сортировки составляет 20 кПа. В комплекте сортировки имеются сита с диаметром отверстий 1,6 мм и

шагом отверстий (равным по горизонтали и вертикали) 2,5 мм; 3,0 мм и 4,0 мм. Определить оптимальный коэффициент перфорации и производительность сортировки при установке каждого из этих сит.

2. Определить оптимальное значение коэффициента перфорации сита сортировки закрытого типа УЗ-02, которая сортирует сульфитную целлюлозу с концентрацией 0,9%. Перепад давления на сите сортировки равен 15 кПа. Определить производительность сортировки, если диаметр отверстий сита равен 2,4 мм.

3. Рассчитать мощность двигателя проектируемой сортировки со следующими техническими характеристиками: частота вращения ротора проектируемой установки равна  $1480 \text{ мин}^{-1}$ ; внутренний диаметр ситового барабана составляет 315 мм; длина перфорированной части ситового барабана равна 500 мм. При расчете ориентировать на существующую сортировку со следующими параметрами: мощность ротора сортировки равна 30 кВт; частота вращения ротора сортировки равна  $1522 \text{ мин}^{-1}$ ; внутренний диаметр ситового барабана составляет 305 мм; длина перфорированной части ситового барабана равна 300 мм.

4. Рассчитать мощность двигателя проектируемой напорной сортировки с цилиндрическим ротором серии СЦН, если у нее планируются следующие параметры: частота вращения ротора проектируемой установки равна  $985 \text{ мин}^{-1}$ ; внутренний диаметр ситового барабана составляет 850 мм; длина перфорированной части ситового барабана равна 1200 мм. Расчет вести относительно сортировки СЦН-2,0.