

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра машин автоматизированных систем**

**ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ БУМАЖНОЙ МАССЫ
КЛЮЧЕВЫЕ ПОНЯТИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ
БУМАЖНОЙ МАССЫ**

Самостоятельная работа

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составители:
А. А. Гаузе
М. В. Колычев

Санкт-Петербург
2026

Утверждено
на заседании кафедры МАС
26.01.2026 г., протокол № 7

Рецензент И. В. Ключкин

Методические указания соответствуют учебным планам и рабочим программам дисциплины «Теория и конструкция оборудования для подготовки бумажной массы» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

В методических указаниях приведены в краткой и доступной форме ключевые теоретические понятия, которые должны быть усвоены студентами при изучении принципа действия, конструкции и особенностей функционирования оборудования для окорки балансовой древесины, производства технологической щепы, для изготовления дефибрерной древесной массы и машин для массного размола волокнистой массы на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 03.03.2026 г. Рег. № 5085/26

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
1. Окорка древесины. Корообдирочные барабаны.....	5
2. Дефибрирование древесины. Дефибреры.	9
3. Производство технологической щепы. Рубительные машины.....	13
4. Массный размол. Ножевые размалывающие машины.	17
5. Вопросы для самопроверки.....	25
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	29

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проверка остаточных знаний студентов по различным дисциплинам образовательной программы показывает, что в долговременной памяти остается, как правило, небольшая часть материала, который был дан на лекциях, отрабатывался на практических занятиях и был зачтен при сдаче экзамена или зачета. Большой объем информации, воспринимаемой современным студентом, позволяет удерживать в памяти лишь небольшую часть материала, при этом обучающийся зачастую становится сам себе экспертом и определяет, что запомнить основательно, а что только донести до промежуточной аттестации, поэтому остаточные знания не всегда содержат все ключевые теоретические понятия данной дисциплины, необходимые для освоения последующих дисциплин и формирования общего каркаса знаний будущего специалиста.

К ключевым теоретическим понятиям могут быть отнесены как общие понятия, которые используются при изучении ряда дисциплин учебного плана (например, теория размерностей, основополагающие законы физики, механики, гидравлики и др.), так и понятия, имеющие конкретное отношение к данной дисциплине и имеющие существенное значение для обеспечения общего уровня подготовки специалиста. Ключевые теоретические понятия можно рассматривать как один из элементов, обеспечивающих формирование у студентов общепрофессиональных и специальных компетенций.

Экспертами для выбора ключевых теоретических понятий должны быть соответствующие кафедры (преподаватели), согласующие свои выводы с выпускающей кафедрой по данной специальности. Количество таких понятий для каждой дисциплины должно быть предельно минимальным.

Ключевые теоретические понятия следует доводить до сведения студентов. Знание этих понятий должно рассматриваться как обязательное условие допуска к экзамену или зачету. Контроль может осуществляться разными способами, но должен исключить время на дополнительную подготовку к ответу или письменному тестированию. Представляется наиболее целесообразным диалог в режиме «преподаватель – студент».

Усвоение ключевых теоретических понятий должно выполняться в течение всего периода обучения, осуществляться в ходе подготовки к сдаче государственного экзамена, при выполнении выпускной квалификационной работы.

Изложенная ниже методика освоения учебного материала является особо актуальной в настоящее время в связи с активным внедрением в учебный процесс компьютерных технологий. У обучающихся возникает ошибочная точка зрения, что учить и запоминать ничего не нужно, легко найти ответ на любой вопрос в интернете. Такой подход ухудшает память, ослабляет мыслительную деятельность и в дальнейшем снижает способность к самостоятельному решению инженерно-технических задач.

В этом пособии мы рассмотрим ключевые теоретические понятия, необходимые при изучении основных видов оборудования для подготовки бумажной массы. Наиболее важные из ключевых понятий, которые должны остаться в долговременной памяти, выделены **жирным шрифтом**. Работа с предлагаемым пособием должна проводиться параллельно с изучением литературных источников [1–4], указанных в библиографическом списке.

1. ОКОРКА ДРЕВЕСИНЫ. КОРООБДИРОЧНЫЕ БАРАБАНЫ

Первым технологическим процессом переработки древесины в волокнистую массу является процесс окорки древесины. Окорка осуществляется до определенной степени окорки M [1, стр. 6]. На современных предприятиях основным оборудованием для окорки древесины является корообдирочный барабан. Теория и конструкция корообдирочного барабана изложена в учебном пособии [1]. В дальнейшем, выявляя ключевые теоретические понятия для этого оборудования, будем ссылаться на указанное учебное пособие.

В поперечном сечении барабана масса балансов образует **сегмент заполнения** AmB (рис. 1.1). При вращении барабана сегмент заполнения поворачивается на **угол подъема** α , при котором происходит обрушение балансов под **углом обрушения** β . При этом образуется две зоны, **зона подъема** A_1mC и **клин обрушения** A_1CB_1 . Процесс окорки происходит при взаимодействии балансов в зоне обрушения. Наличие двух зон является обязательным условием технологического процесса окорки в барабане.

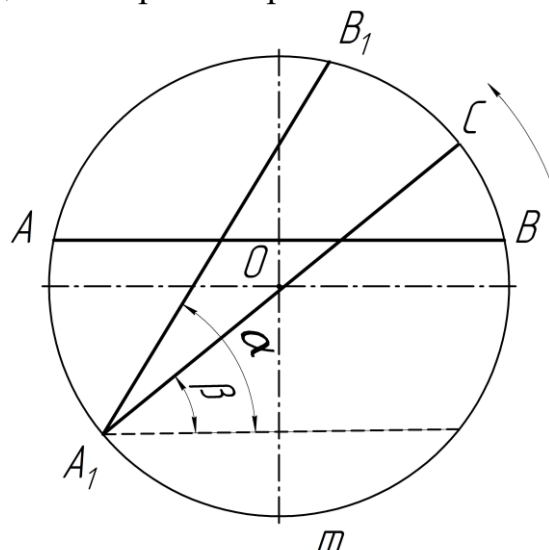


Рисунок 1.1. Положение сегмента заполнения:

AmB – до начала обрушения; A_1mB_1 – при установившемся движении

Рассмотрение силовых факторов, действующих на материальную точку на свободной поверхности в месте перехода из зоны подъема в зону обрушения (рис. 1.2), позволяет получить выражение для **допускаемой скорости вращения барабана** [1]. Под допускаемой скоростью вращения барабана понимается скорость, при которой существуют зона подъема и зона обрушения. При скорости, меньшей допускаемой, обрушение не происходит, сегмент заполнения находится в колебательном движении. При достижении определенного угла подъема α происходит соскальзывание балансов в направлении, противоположном вращению, и новый цикл подъема повторяется. При этом процесс окорки не происходит.

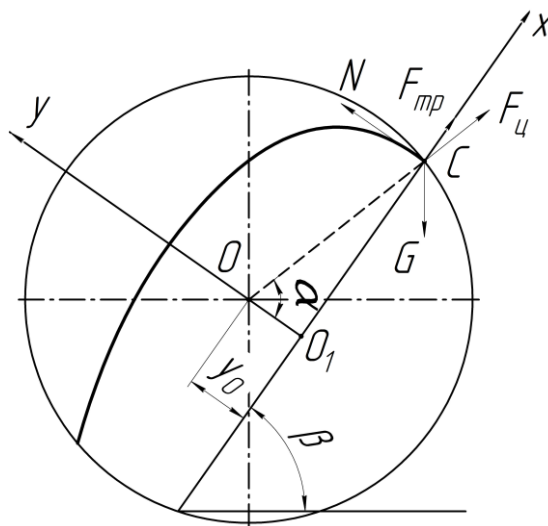


Рисунок 1.2. Схема к определению допускаемой скорости вращения барабана

При превышении допускаемой скорости теоретически возможен случай, при котором угол подъема составит $\frac{\pi}{2}$ и обрушение балансов не произойдет. Содержимое барабана будет вращаться в виде кольца, прижатого к внутренней поверхности барабана. При этом процесс окорки не происходит. Такая скорость называется **критической скоростью**. Величина этой скорости определяется из условий равенства центробежной силы F_c , прижимающей материальную точку С к внутренней поверхности барабана и силы тяжести G (рис. 1.3), т. е.:

$$m \cdot \omega_{кр}^2 \cdot R = m \cdot g, \quad (1.1)$$

где m – масса материальной точки;

$\omega_{кр}$ – критическая угловая скорость барабана;

R – радиус барабана;

g – ускорение свободного падения.

Преобразуя выражение (1.1), получим:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R}}. \quad (1.2)$$

Рабочая скорость корообдирочных барабанов практически составляет:

$$\omega = (0,2 \div 0,3) \cdot \omega_{кр}. \quad (1.3)$$

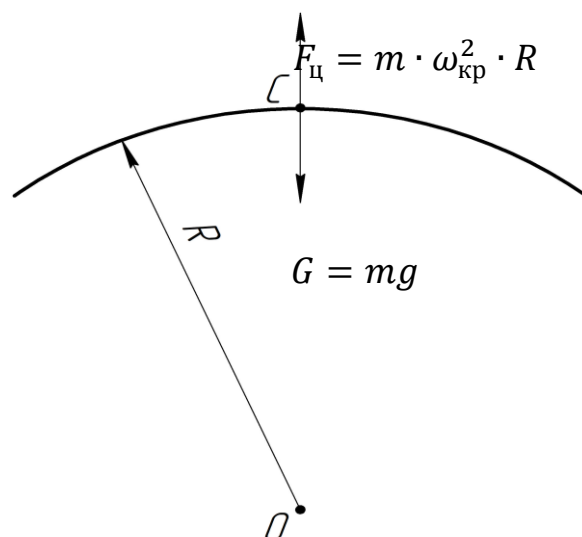


Рисунок 1.3. Действующие силы при угле подъема $\alpha = \frac{\pi}{2}$

В барабанах непрерывного действия происходит перемещение балансов от входного отверстия барабана к выходному. Перемещение балансов при вращении барабана обеспечивается разностью уровней заполнения на входе и выходе. Время транспортирования балансов через барабан $t_{\text{тр}}$ зависит от скорости вращения барабана и угла обрушения β . Время $t_{\text{тр}}$ может быть определено на основании анализа кинематики движения балансов в барабане [1, 2].

При известном времени $t_{\text{тр}}$ **транспортная производительность корообдирочного барабана** определяется объемом древесного сырья (балансов), который может быть пропущен через барабан в единицу времени:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{V}{t_{\text{тр}}}, \quad (1.4)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – транспортная производительность, $\frac{\text{пл. м}^3}{\text{час}}$;

V – объем древесины в барабане, м^3 .

Технологическая производительность корообдирочного барабана представляет собой объем древесного сырья, окоряемого в барабане, в единицу времени до требуемой степени окорки M :

$$Q_{\text{м}} = \frac{V}{t_{\text{м}}}, \quad (1.5)$$

где V – объем древесины в корообдирочном барабане, пл. м^3 ;

$t_{\text{м}}$ – время обработки древесины в барабане, необходимое для достижения требуемой степени окорки M .

В технологической литературе имеется значительный статистический материал определения $t_{\text{м}}$ для различных технологических условий, что позволяет определить $Q_{\text{м}}$ по вышеприведенной формуле. Для более точного расчета технологической производительности можно воспользоваться методикой, основанной на анализе кинематики движения балансов в барабане и

использовании величины удельной рабочей деформации, необходимой для достижения заданной степени окорки древесины M при различных технологических параметрах процесса [1, с. 10–11; с. 29–30].

Мощность P , необходимая для привода барабана, состоит из полезной мощности для обеспечения процесса обрушения балансов и мощности для преодоления потерь на трение в опорах и приводе:

$$P = \frac{1}{\eta} \cdot (P_{\text{пол}} + P_{\text{тр}}), \quad (1.6)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, необходимая для обеспечения процесса окорки;

$P_{\text{тр}}$ – мощность, необходимая для преодоления потерь в опорах;

η – КПД привода.

Полезная мощность привода барабана в общем виде определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{пол}} = \frac{T \cdot n}{9550}, \quad (1.7)$$

где T – момент силы тяжести балансов, заполняющих барабан, относительно оси вращения, Н · м (рис. 1.4):

$$T = F \cdot a, \quad (1.8)$$

где n – частота вращения, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

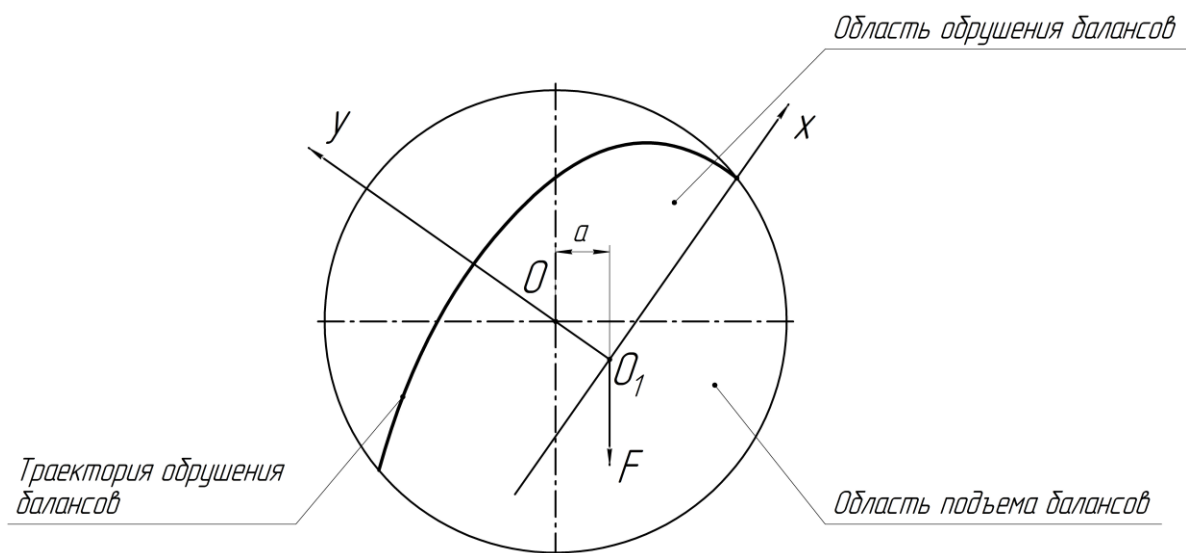


Рисунок 1.4. Определение момента силы тяжести

Формула для определения потерь на трение в опорах барабана приведена в [1, формула 1.24]. Потери на трение складываются из потерь на трение качения в зонах контакта опорных роликов с бандажами и потерь на трение в подшипниках опор.

Итак, при рассмотрении теории корообдирочного барабана мы выявили следующие ключевые теоретические понятия:

- степень окорки балансов, M ;
- угол подъема балансов, α ;
- угол обрушения балансов, β ;
- зона подъема и зона обрушения (в поперечном сечении барабана);
- допустимая скорость вращения барабана;
- критическая скорость вращения барабана, $\omega_{кр} = \sqrt{\frac{v}{R}}$;
- транспортная производительность барабана, $Q_{тр} = \frac{V}{t_{тр}}$;
- технологическая производительность барабана, $Q_m = \frac{V}{t_m}$;
- полезная мощность привода барабана, $P_{пол} = \frac{T \cdot n}{9550}$;
- мощность для преодоления потерь на трение в опорах барабана [1, 1.24].

2. ДЕФИБРИРОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ. ДЕФИБРЕРЫ

Окоренная древесина направляется по двум направлениям технологического потока: на производство целлюлозы и (или) производство древесной массы. При производстве целлюлозы древесина измельчается в щепу и подвергается варке в варочных котлах периодического действия или в установках непрерывной варки.

При производстве механической древесной массы древесина в виде балансов определенных размеров подвергается дефибрированию на специальных машинах (аппаратах) – дефибрерах. Полученная волокнистая масса после сортирования и очистки является готовым полуфабрикатом для производства бумаги и картона. Дефибрирование древесины – процесс превращения древесины в волокнистую массу под воздействием абразивных зерен дефибрерного камня в присутствии воды. Происходит в зоне контакта древесины с дефибрерным камнем в, так называемой, зоне дефибрирования (рис. 2.1).

Площадь зоны дефибрирования $A_{деф}$ можно определить по формуле:

$$A_{деф} = l_6 \cdot \check{B}, \quad (2.1)$$

где l_6 – длина балансов;

$\check{B}$ – длина дуги зоны дефибрирования.

Абразивные зерна камня являются миниатюрными инструментами, обеспечивающими отделение и обработку волокон древесины.

Геометрия поверхности дефибрерного камня оказывает основное влияние на производительность дефибрера, свойства получаемой массы и удельные затраты энергии.

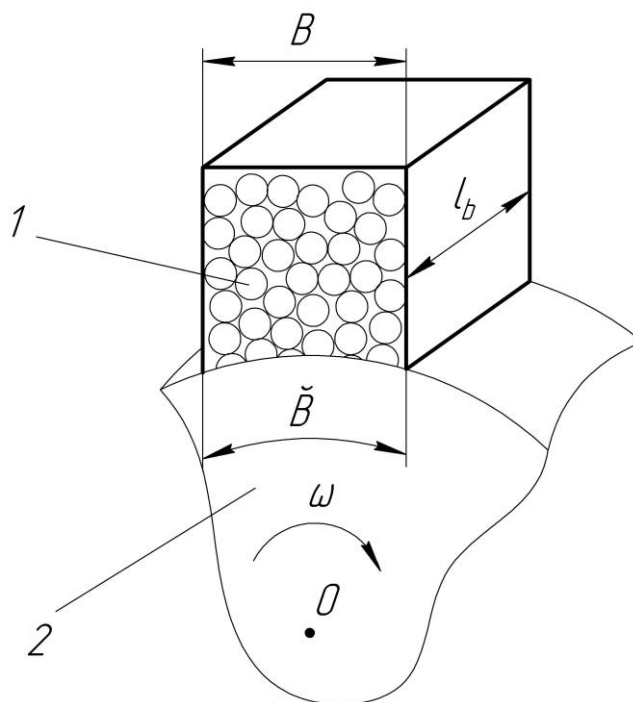


Рисунок 2.1. Схема контакта балансов с дефибрерным камнем:

1 – балансовая древесина; 2 – дефибрерный камень;

B – ширина зоны дефибрирования; $\check{B}$ – длина дуги дефибрирования

В процессе работы абразивные зерна выкрашиваются, затупляются, поверхность камня забивается мелким волокном и смолой. Это ведет к снижению производительности дефибрера, увеличению удельных затрат энергии и излишнему укорочению волокон получаемой древесной массы.

Для очистки поверхности камня и возобновления слоя абразивов периодически производится **насечка камня**, т. е. камень периодически обрабатывается специальным инструментом – **шарошкой**. Канавки, полученные в результате на поверхности камня, служат для предохранения отделившихся волокон от повторного дефибрирования и чрезмерного измельчения.

Шарошка представляет собой стальной цилиндр, на поверхности которого расположены рабочие зубья. Шарошки различаются по номерам или модулям, которые определяют размеры канавок, наносимых на поверхность камня. При современном методе дефибрирования применяется малая глубина насечки ($0,15 \div 0,20$ мм).

В процессе дефибрирования абразивное зерно внедряется в древесину на глубину z (рис. 2.2).

Из приведенного рисунка видно, что абразивные зерна с определенным допущением контактируют с древесиной по сферическим поверхностям. Проекция этой поверхности на вертикальную и горизонтальную плоскости образуют **радиальную A'_r и тангенциальную A'_t проекции поверхности контакта одного абразивного зерна с древесиной**. П. П. Добровольский [3] предложил зависимости, позволяющие определить **суммарные значения** этих величин для всех абразивных зерен **в зоне дефибрирования** с учетом глубины

относительного внедрения абразивных зерен z/r , распределения зерен по радиусу камня и площади канавок, создаваемых насечкой камня, A_r и A_τ .

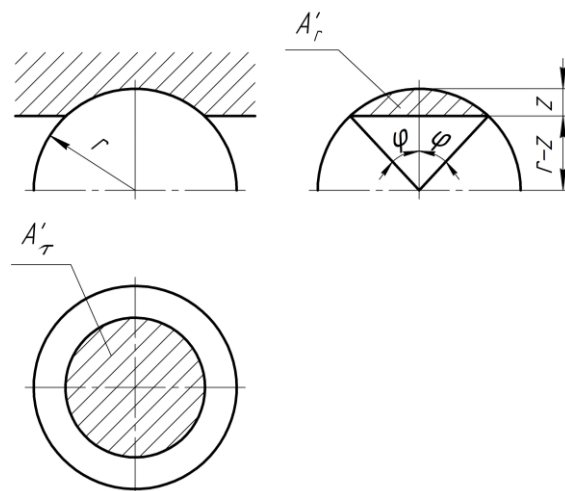


Рисунок 2.2. Проекция поверхности контакта абразивного зерна

Для удобства расчетов предложены удельные величины:

$$A_{r0} = \frac{A_r}{A_{\text{деф}}}; \quad (2.2)$$

$$A_{\tau 0} = \frac{A_\tau}{A_{\text{деф}}}, \quad (2.3)$$

где $A_{\text{деф}} = \check{B} \cdot l_{\check{B}}$ – площадь дефибрирования.

Для расчетов можно использовать величины, приведенные в [1, табл. 2.2.],

Исходной величиной для определения производительности дефибрера является **удельный съём** q , $\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{см}}$. Под удельным съёмом понимается количество древесной массы в граммах, снимаемое с 1 см^2 радиальной проекции поверхности контакта абразивных зерен с древесиной при перемещении точки поверхности камня на 1 см . Удельный съём зависит от температуры в зоне дефибрирования и определяется по эмпирическим формулам [3].

С учетом геометрии поверхности камня и его размеров производительность дефибрера:

$$Q = K_p \cdot q \cdot A_r \cdot V_k, \frac{\text{т}}{\text{сутки}}, \quad (2.4)$$

где $K_p = 0,864 \cdot 10^5$ – коэффициент для перевода размерностей;

q – удельный съём, $\frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{см}}$.

A_r – суммарная радиальная проекция поверхности контакта абразивных зерен с древесиной в зоне дефибрирования, см^2 ;

V_k – окружная скорость камня, м/с .

Эффективная мощность привода дефибрерного камня, т. е. мощность, необходимая для преодоления сопротивления перемещению абразивов в зоне дефибрирования, в общем виде может быть выражена формулой (2.5) (рис. 2.3):

$$P_{\text{эф}} = T \cdot V_{\text{к}}, \quad (2.5)$$

где T – сила сопротивления в зоне дефибрирования;
 $V_{\text{к}}$ – окружная скорость камня.

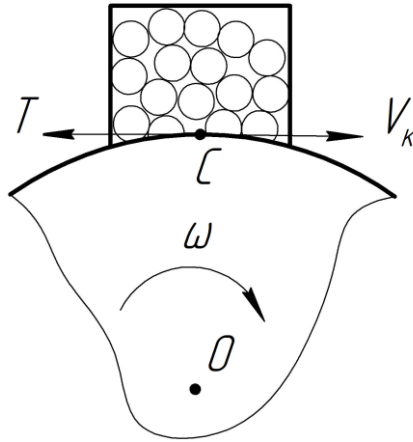


Рисунок 2.3. Схема к определению $P_{\text{эф}}$

Удельная касательная сила сопротивления равна:

$$P_{\tau} = \frac{T}{F_{\text{деф}}}. \quad (2.6)$$

В последующем используется понятие **сопротивление дефибрированию** $K_{\text{д}}$, равное удельной касательной силе сопротивления, отнесенной к удельной радиальной проекции контакта абразивных зерен с древесиной:

$$K_{\text{д}} = \frac{P_{\tau}}{A_{r0}}, \quad (2.7)$$

С учетом геометрии поверхность дефибрерного камня и его размеров

$$P_{\text{эф}} = K \cdot K_{\text{д}} \cdot A_r \cdot V_{\text{к}}, \text{ кВт}, \quad (2.8)$$

где K – коэффициент, учитывающий использование камня (0,9) и пересчета мощности из ватт в кВт (10^{-3}).

$K_{\text{д}}$ – сопротивление дефибрированию, Н/м²,

A_r – суммарная радиальная проекция поверхности контакта абразивных зерен в зоне дефибрирования;

$V_{\text{к}}$ – окружная скорость камня, м/с.

Эффективная мощность может быть определена и по развернутой формуле 2.73 [1].

Таким образом, при рассмотрении теоретических представлений о работе дефибрера мы выявили следующие ключевые теоретические понятия:

- площадь зоны дефибрирования, $A_{\text{деф}}$;
- насечка дефибрерного камня шарошкой;
- радиальная и тангенциальная проекции поверхности контакта абразивного зерна с древесиной (A'_r и A'_τ);

- суммарное значение этих величин для всех абразивных зерен в зоне дефибрирования (A_r и A_τ);
- удельная радиальная и удельная тангенциальная проекции контакта всех абразивных зерен в зоне дефибрирования (A_{r0} и $A_{\tau0}$);
- удельный съем, q ;
- сопротивление дефибрированию, K_d ;
- производительность дефибрера, $Q = q \cdot A_r \cdot V_k$;
- эффективная мощность, $P_{эф} = K \cdot K_d \cdot A_r \cdot V_k$.

3. ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ. РУБИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Для производства целлюлозы балансовая древесина измельчается в щепу. Основным оборудованием, используемым для измельчения, являются дисковые рубительные машины. Теория и конструкция рубительной машины изложены в учебном пособии [4]. В дальнейшем, выявляя ключевые теоретические понятия, будем ссылаться на это учебное пособие.

Размеры получаемой щепы и ее качество в значительной степени определяются геометрией резания в рубительной машине (рис. 3.1).

Здесь следует выделить **угол заточки β** , от которого в первую очередь зависит качество реза (не должно быть смятия древесины в зоне реза, т. к. это приводит к ухудшению процесса пропитки щепы при варке) и толщина щепы.

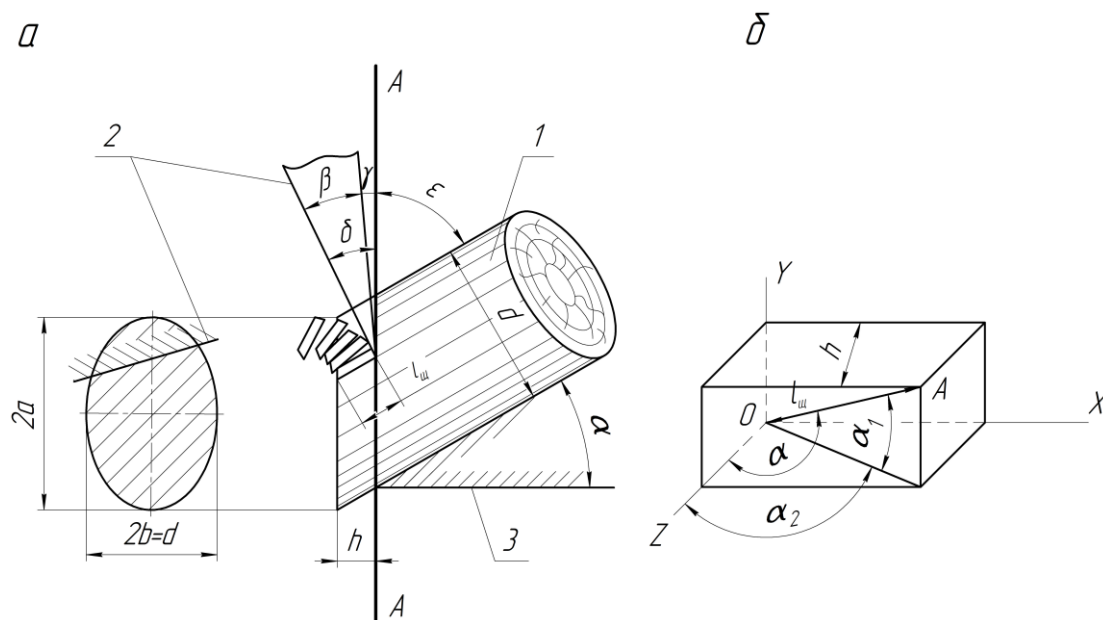


Рисунок 3.1. Угловые параметры рубки древесины (а) и схема для определения длины щепы (б):

1 – баланс; 2 – нож; 3 – контрнож;

XOY – плоскость диска; OZ – ось перпендикулярная к плоскости диска рубительной машины и параллельная оси вращения диска; OA – ось баланса; точка O – центр контакта баланса с плоскостью диска и ножей; α – суммарный угол наклона оси баланса к оси Z

Углы α_1 и α_2 , определяют положение оси баланса относительно плоскости диска. От этих углов зависит **длина щепы**

$$l_{\text{щ}} = \frac{h}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}, \quad (3.1)$$

где $l_{\text{щ}}$ – длина щепы;

h – величина выпуска ножа над плоскостью диска;

α_1 – угол наклона оси баланса над горизонтальной плоскостью;

α_2 – угол разворота оси баланса в горизонтальной плоскости;

При рубке баланса в сечении отруба образуется **эллипс отруба** (рис. 3.2).

$$2b = d; \quad (3.2)$$

$$2a = \frac{d}{\cos \alpha} = \frac{d}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}, \quad (3.3)$$

где a и b соответственно большая и меньшая полуоси эллипса;

d – диаметр баланса.

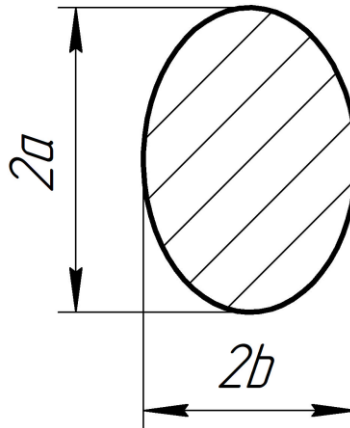


Рисунок 3.2. Эллипс отруба

Теоретическая производительность дисковой рубительной машины может быть представлена в виде произведения площади поперечного сечения баланса на скорость его продвижения к поверхности ножевого диска в процессе рубки, т. е.

$$Q_T = \frac{\pi \cdot d_{\text{ср}}^2}{4} \cdot W_6, \quad (3.4)$$

где W_6 – скорость продвижения баланса к плоскости диска;

$d_{\text{ср}}^2$ – средний диаметр балансов, поданных в рубительную машину.

В учебном пособии [4] эта формула представлена в развернутом виде с учетом длины щепы, числа ножей и числа оборотов диска.

Фактическая производительность определяется с учетом использования рабочего времени машины, введением в формулу **коэффициента загрузки** (подачи) $K_{\text{п}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{t_{\text{п}}}{(t_{\text{п}} + t_{\text{xx}})}, \quad (3.5)$$

где t_p – время рубки одного баланса, с;

t_{xx} – время холостого хода, т. е. паузы в подаче между смежными балансами.

Коэффициент подачи на основе практики для малоножевых машин составляет $0,7 \div 1,0$, а для быстроходных многоножевых – $0,4 \div 0,7$.

Удельное усилие резания – это усилие, приходящееся на единицу длины режущей кромки ножа, направленное по вектору скорости ножа. **Мгновенная сила резания** $F_{рез}$ может быть определена по известному удельному усилию резания p и ширине резания B_p (рис. 3.3):

$$F_{рез} = p \cdot B_p. \quad (3.6)$$

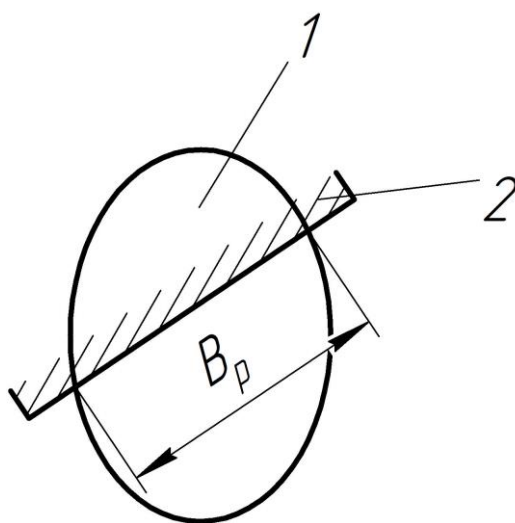


Рисунок 3.3. Определение силы резания:

1 – эллипс отруба; 2 – нож;

B_p – ширина резания

Удельное усилие резания зависит от геометрических параметров резания, затупленности ножа, породы и состояния древесины [4].

Работа резания W , производимая одним ножом за один отруб, будет

$$W = p \cdot A_{элл}, \quad (3.7)$$

где $A_{элл}$ – площадь эллипса отруба:

$$A_{элл} = \pi \cdot a \cdot b; \quad (3.8)$$

где a, b – полуоси эллипса;

p – удельное усилие резания, Н/м.

Подача древесины в рубительной машине является важной для получения однородной по качеству и длине щепы. На нее сильно влияет угол между задней гранью ножа и плоскостью резания – **задний угол γ (угол затягивания)**. Его значение определяет скорость самоподачи баланса на рубку. При работе машины может наблюдаться явление срыва в подаче, в особенности для балансов большого диаметра. Это проявляется ухудшением фракционного состава щепы при рубке толстых бревен. Также может происходить смятие торца баланса.

Мощность резания можно представить в виде:

$$P_p = p \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot z \cdot n, \quad (3.9)$$

где n – частота вращения диска рубительной машины;

z – число ножей.

Для рубительной машины с асинхронным двигателем определение мощности электродвигателя и выбор момента инерции вращающихся масс осуществляется на основе анализа и преобразования энергетического уравнения движения вала и диска рубительной машины при рубке одного баланса:

$$P_p \cdot t_p + P_{\text{щ}} \cdot t_p = \eta \cdot \lambda \cdot P_{\text{дв}} \cdot t_p + 0,5 \cdot I \cdot (\omega_n^2 - \omega_k^2), \quad (3.10)$$

где t_p – время рубки одного баланса;

η – КПД электродвигателя;

λ – коэффициент допускаемой кратковременной перегрузки электродвигателя;

$P_{\text{дв}}$ – мощность электродвигателя;

I – приведенный к валу рубительной машины момент инерции вращающихся частей машины и привода;

ω_n и ω_k – угловые скорости, соответствующие началу и концу рубки одного баланса.

Первое слагаемое в левой части приведенного равенства представляет собой работу (энергию), необходимую для рубки одного баланса, а второе слагаемое представляет энергию, необходимую для ускорения щепы, удаляемой из рубительной машины. В правой части первое слагаемое – энергия, подводимая от электродвигателя для рубки одного баланса, второе слагаемое – кинетическая энергия, подводимая от вращающихся масс рубительной машины и электродвигателя.

Анализ и преобразование приведенного уравнения (3.10) позволяют определить мощность электродвигателя и момент инерции вращающихся масс системы «рубительная машина – электродвигатель» [4].

На основании вышеприведенного анализа можно выделить следующие ключевые теоретические понятия:

- угол заточки ножей β ;
- задний угол (угол затягивания) γ ;
- углы разворота оси баланса (при наклонной подаче балансов) α_1 и α_2 ;
- выражения для длины щепы в виде $l_{\text{щ}} = \frac{h}{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}$;
- эллипс отруба;
- теоретическая производительность рубительной машины;
- коэффициент подачи при рубке балансов;
- фактическая производительность;
- удельное усилие резания;
- работа резания;
- мощность резания;
- энергетическое уравнение движения вала и диска рубительной машины.

4. МАССНЫЙ РАЗМОЛ. НОЖЕВЫЕ РАЗМАЛЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Массный размол волокон, их фибриллирование и гидратация обеспечивают повышение механической прочности, улучшение внешнего вида и других важных свойств бумаги. В процессе размола, осуществляемого в основном в машинах с ножевой гарнитурой, волокнистый материал подвергается различным механическим воздействиям в результате чего **волокна фибриллируются**, становятся более гибкими и пластичными (рис. 4.1).

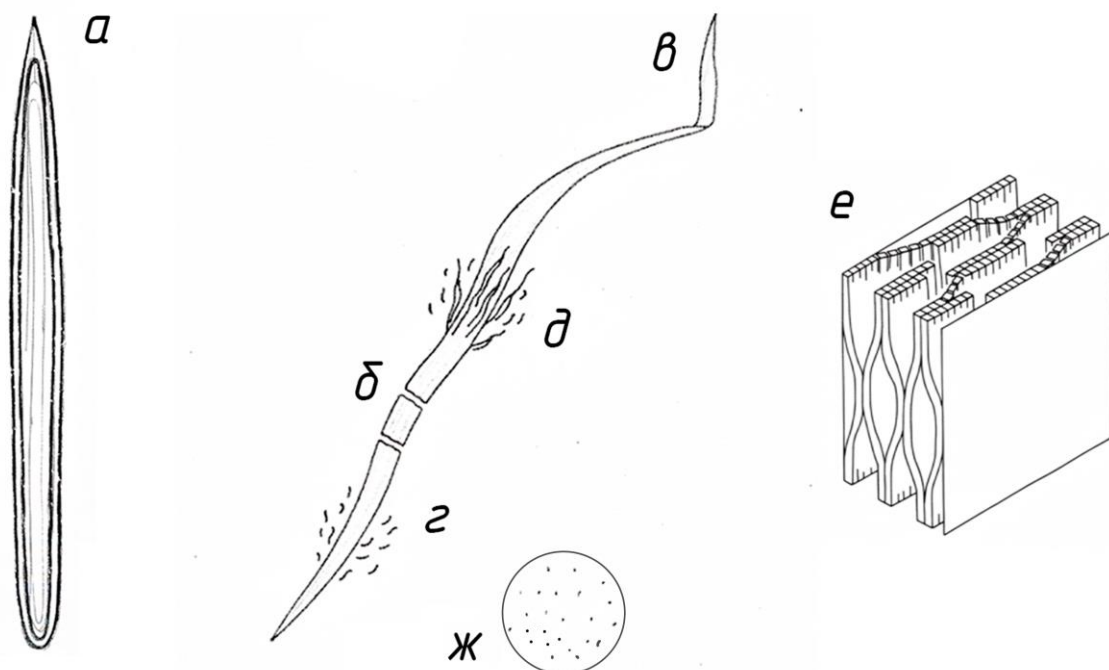


Рисунок 4.1. Изменение волокна в процессе размола:

а – неразмолотое волокно; *б* – рубка, укорочение волокна; *в* – деформация волокна (изогнутость и скрученность волокон, формирование локальных повреждений волокон типа микрокомпрессий, также разглаживание волокон); *г* – образование волокнистой мелкой фракции; *д* – внешнее фибриллирование; *е* – внутреннее фибриллирование; *ж* – высвобождение отдельных компонентов/миграция вещества стенки волокна

В дальнейшем при формировании бумажного полотна фибриллы и микрофибриллы в процессе обезвоживания сближаются на расстояние порядка $2,5 \text{ \AA}$ (ангстрем, $\text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}$), при этом возникают **водородные связи**, которые, в основном, обеспечивают высокую механическую прочность бумажного листа.

Таким образом, **процесс массного размола** – это механическое действие, которое в присутствии воды модифицирует волокна растительного происхождения, благоприятствует формированию и развитию связей между волокнами при изготовлении бумаги.

Размалывающие машины с ножевой гарнитурой имеют преобладающее применение в современном производстве. Основной принцип действия этих машин – обработка волокна в зазоре между поверхностями перемещающихся относительно друг друга ножей (рис. 4.2)

Величина зазора S регулируется в зависимости от желаемого характера обработки волокон. **Величина рабочего зазора** при размоле массы низкой концентрации (до $5 \div 6 \%$) **устанавливается в диапазоне от 0 до 0,5 мм.**

Общим для всех типов машин с ножевой гарнитурой является **наличие ротора с выступающими ножами** и **противолежащий им набор ножей на статоре.** Наибольшее применение в практике современного производства имеют дисковые мельницы. Их применяют для массового размола при низкой концентрации (до $5 - 7 \%$), обработки массы при высокой концентрации (от 15% и более), а также для размола древесной щепы.

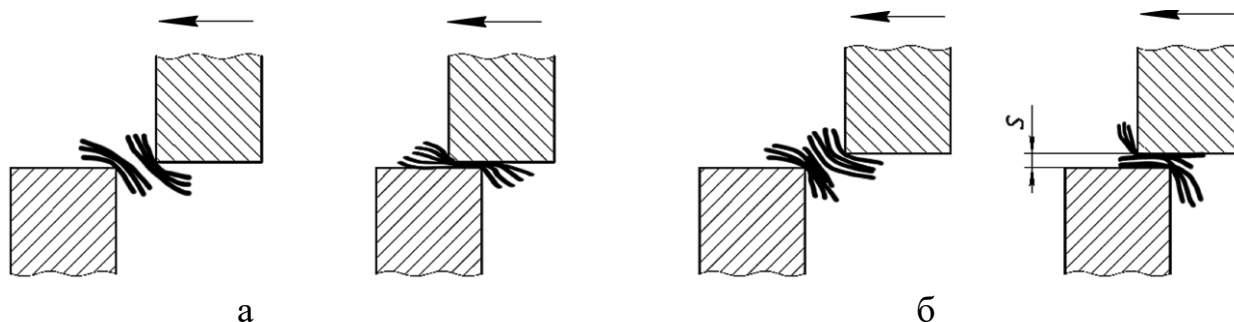


Рисунок 4.2. Схема действия ножей размалывающей машины на волокна:
а – при малом зазоре (резание); *б* – при большем зазоре (фибриллирование)

Для оценки размалывающей способности мельниц с ножевой гарнитурой используют ряд показателей [2], из которых наиболее известна **секундная режущая длина L_s .** Секундная режущая длина показывает общую длину пересечения ножей статора ножами ротора за одну секунду.

Для одного *i*-го участка гарнитуры, в пределах которого не меняется число ножей ротора и статора:

$$L_{s,i} = z_{ci} \cdot l_i \cdot z_{pi} \cdot n, \text{ м/с}, \quad (4.1)$$

где $L_{s,i}$ – секундная режущая длина в пределах одного *i*-го участка гарнитуры, м/с;

z_{ci} и z_{pi} – число ножей статора и ротора в пределах одного *i*-го участка гарнитуры;

l_i – длина ножа, равная примерно длине образующей *i*-го участка, м;

n – частота вращения ротора мельницы, $\frac{\text{об}}{\text{с}}$.

Для получения секундной режущей длины гарнитуры мельницы L_s суммируются режущие длины всех участков, на которые разбита гарнитура.

Поскольку **при размоле происходит отложение волокон на кромках ножей**, то общая длина пересечения ножей в секунду пропорциональна количеству волокон, одновременно находящихся в обработке, т. е. **величина L_s является косвенной характеристикой размалывающей способности и производительности мельницы.** В учебнике [2] приведены подробные формулы для определения величины L_s .

Экспериментальная эпюра изменения усилий в зоне размола приведена на рисунке 4.3. При пересечении ножей статора ножами ротора в зоне контакта возникает нормальное усилие R , которое достигает максимального значения в зоне «а» вблизи кромок ножей. В этой же зоне возникает касательное усилие T . Под воздействием указанных усилий происходит процесс размола. **Протяженность зоны «а»** в экспериментах с хвойной сульфитной целлюлозой составила 2–3 мм. **Коэффициент трения в зоне размола** определяется соотношением:

$$f = \frac{T}{R}. \quad (4.2)$$

Средняя величина $f = 0,10 \div 0,11$.

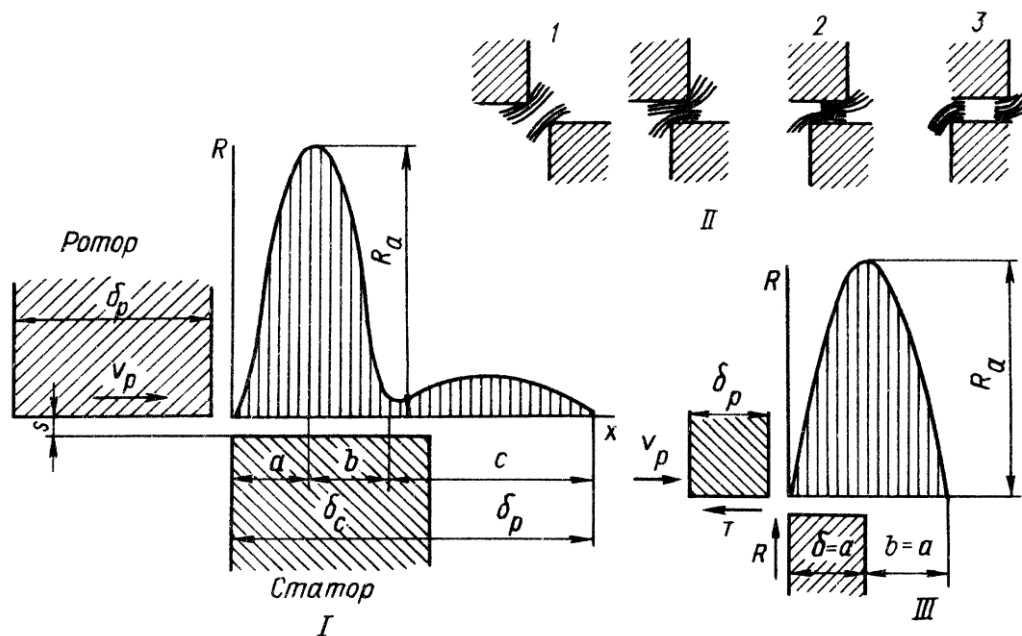


Рисунок 4.3. Экспериментальная эпюра изменения усилий (I) и соответствующие стадии взаимодействия ножей (II); диаграмма распределения усилий при взаимодействии ножей (III), толщина которых равна ширине зоны a

При пересечении ножом ротора единичной длины (1 м) ножей статора совершается определенная удельная работа размола, которая так же называется **удельной нагрузкой на кромки ножей** $B_s, \frac{\text{Дж}}{\text{м}}$. **Полезная мощность размола** с учетом этого показателя может быть представлена в виде:

$$P_p = B_s \cdot L_s, \quad (4.3)$$

где L_s – секундная режущая длина данной гарнитуры.

Практически полезная мощность размола может быть получена из выражения:

$$P_p = P - P_{\text{хх}}, \quad (4.4)$$

где P – общая потребляемая мощность мельницы при работе;

P_{xx} – **мощность холостого хода при работе мельницы с разведенными гарнитурами**, когда силовое воздействие ножей на волокна в зоне размола отсутствует.

Впервые показатель B_s был введен Вульчем и Флюшером. В дальнейшем Брехт и Зиверт предложили использовать эту величину для оценки результата размола. Ими установлено, что одинаковый технологический результат при размоле одного вида волокнистого материала обеспечивается, если процесс проводится при одной и той же удельной нагрузке на кромки ножей, вне зависимости от вида размалывающей машины. Для каждого вида волокнистого материала существует оптимальная нагрузка на кромки ножей. Средние значения оптимальных величин нагрузки B_s на кромки ножей для различных видов волокнистых материалов приведены в таблице.

Таблица. Средние значения оптимальной удельной нагрузки B_s , Дж/м на кромки ножей для различных видов целлюлозы

Вид целлюлозы	B_s , Дж/м
Небеленая сульфатная хвойная целлюлоза	2,5–2,7
Беленая сульфатная хвойная целлюлоза	1,8
Небеленая сульфитная еловая целлюлоза	1,5
Беленая сульфитная еловая целлюлоза	0,8–1,0
Беленая сульфатная лиственная целлюлоза	1,1–1,3
Бисульфитная хвойная полуцеллюлоза	1,4
Бисульфитная лиственная полуцеллюлоза	1,1–1,2
Отходы сортирования древесной массы	1,5
Тростниковая сульфатная целлюлоза	0,8

Одним из основных технологических показателей процесса размола является **степень помола**, измеряемая в градусах Шоппер–Риглера, °ШР. Степень помола определяется на специальном приборе, имеющем шкалу от 0 °ШР до 100 °ШР. Большие значения соответствуют более размолотой волокнистой массе. Такая **масса называется жирной**, труднее обезвоживается, но обеспечивает более высокую прочность бумажного листа. Меньшие значения соответствуют менее размолотой массе, она называется **садкой**, легко обезвоживается, но дает меньшую прочность бумажного листа.

Глубину разработки волокна определяет количество энергии, затраченной в межножевом зазоре, отнесенной к массе волокна, прошедшего через мельницу, т. е.

$$U_{\Pi} = \frac{P_p \cdot t \cdot 3,6}{m} = \frac{P_p \cdot 24 \cdot 3,6}{Q}, \frac{\text{МДж}}{\text{т}}, \quad (4.5)$$

где P_p – полезная мощность размола, кВт;

t – время размола для достижения определенной степени помола, ч;

m – масса абсолютно сухого волокна, размалываемого в мельнице за время t , т а. с. в.;

$Q = 24 \cdot m/t$ – производительность размалывающей машины, т а. с. в./сутки.

Наиболее распространенным методом оценки размола и работы размалывающей машины является определение зависимости степени помола в °ШР от расхода энергии. Для расчета размалывающих машин целесообразно использовать показатель, который называется **полезной удельной энергоемкостью размола**

$$E_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{п}}}{\Delta^{\circ}\text{ШР}}, \quad (4.6)$$

где $\Delta U_{\text{п}}$ – удельный полезный расход энергии, необходимый для повышения степени помола массы на $\Delta^{\circ}\text{ШР}$.

Типичный **график зависимости степени помола от удельного расхода энергии** представляет собой **S-образные кривые**, которые показывают, что в начале процесс идет медленно, затем наступает более быстрый прирост степени помола, затем происходит замедление прироста степени помола, удельная энергоемкость увеличивается, и прочность бумажного листа снижается (рис. 4.4).

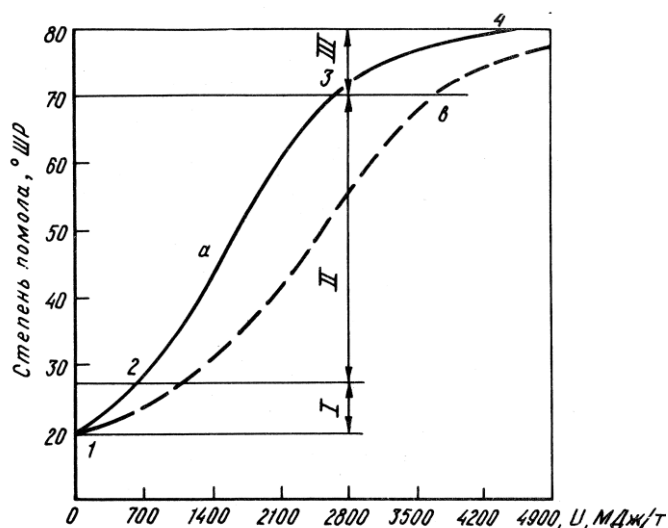


Рисунок 4.4. Типичный график зависимости степени помола от удельного расхода энергии:

a – полезного; $б$ – общего;

I (1–2), II (2–3), III (3–4) – участки, разделяющие график в зависимости от значений средней полезной удельной энергоемкости размола

Анализ указанных зависимостей для различных целлюлоз (рис. 4.5), выполненный В. Н. Гончаровым в учебном пособии [2], позволяет вычислить полезную мощность размола, а также секундную режущую длину L_s , гарнитуры, которые обеспечат получение заданной производительности Q размалывающей машины.

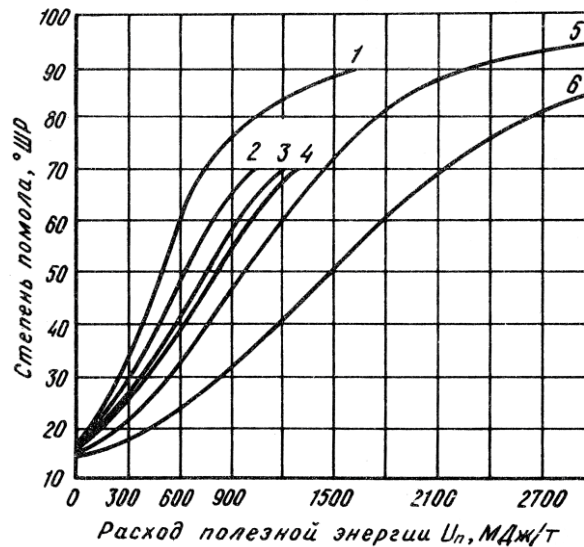


Рисунок 4.5. Зависимости степени помола от расхода полезной энергии для различных целлюлоз:

- 1 – сульфитная хвойная беленая; 2 – сульфитная хвойная небеленая;
3 – отходы сортирования древесной массы; 4 – сульфатная хвойная беленая;
5 – сульфатная хвойная небеленая; 6 – хлопковая целлюлоза

Коническую и дисковую мельницы можно рассматривать как центробежный насос, работающий с низким гидравлическим КПД 1,5 ÷ 4 %, обеспечивающий движение массы от малого диаметра к большому. Продвижение массы по ротору обеспечивается давлением на входе и продольной составляющей от центробежной силы (рис. 4.6).

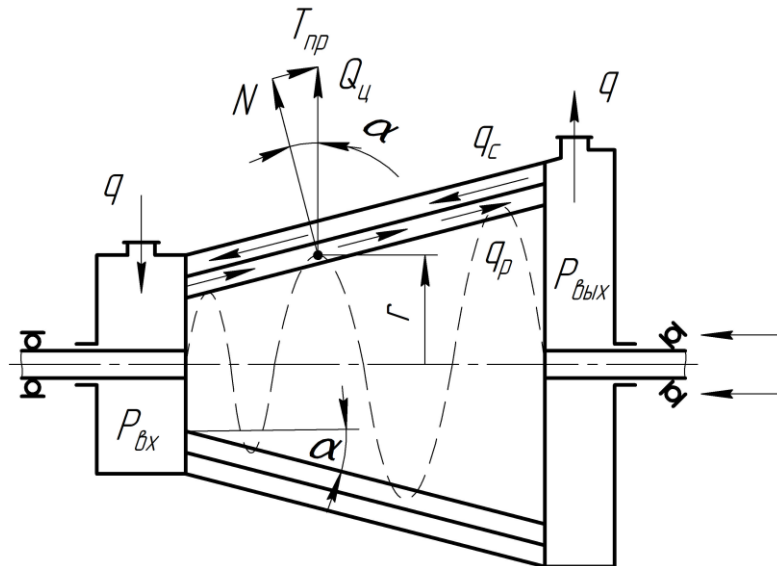


Рисунок 4.6. Характер движения массы в конической мельнице:
 q – объемный расход массы, подаваемой в мельницу, м³/с; $P_{вх}$, $P_{вых}$ – давление массы на входе и выходе из мельницы, кПа; Q_c – центробежная сила, Н;
 $T_{пр}$ – продвигающая сила, Н

$$T_{\text{пр}} = Q_{\text{ц}} \cdot \sin \alpha = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin \alpha, \quad (4.7)$$

где $T_{\text{пр}}$ – продольная составляющая от действия центробежной силы $Q_{\text{ц}}$;

α – угол конусности мельницы;

m – масса выделенного элемента суспензии, находящегося в канале между ножами ротора, на расстоянии r от оси вращения;

ω – угловая скорость вращения ротора, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Продвигающая сила $T_{\text{пр}}$ возрастает с увеличением угла конусности α и достигает максимума в дисковой мельнице, у которой $\alpha = 90^\circ$. Этим объясняется возможность применения в дисковой мельнице более узких каналов между ножами гарнитуры и размол массы более высокой концентрации.

Мощность на привод машин с ножевой гарнитурой, работающих с жидкотекучей массой при концентрации не более 6 %, **складывается из следующих составляющих:**

$$P = P_{\text{р}} + P_{\text{п}} + P_{\text{д}} + P_{\text{м}}, \quad (4.8)$$

где $P_{\text{р}}$ – полезная мощность размол;

$P_{\text{п}}$ – мощность на перекачивание массы;

$P_{\text{д}}$ – мощность, расходуемая на преодоление гидродинамических потерь при трении поверхности ротора о массу;

$P_{\text{м}}$ – мощность, необходимая для преодоления механических потерь в сальниках и подшипниках.

Три составляющие могут быть замерены в сумме при режиме холостого хода:

$$P_{\text{хх}} = P_{\text{п}} + P_{\text{д}} + P_{\text{м}}. \quad (4.9)$$

Полезная мощность размол, как это было показано выше, равна:

$$P_{\text{р}} = B_{\text{с}} \cdot L_{\text{с}} \cdot i, \quad (4.10)$$

где i – число поверхностей размол (в однодисковой мельнице $i = 1$, в сдвоенной $i = 2$).

Мощность на перекачивание массы $P_{\text{п}}$ не превышает 2 – 4% от общей мощности, потребляемой мельницей.

Мощность гидродинамических потерь составляет от общей мощности для дисковых мельниц 25–60 % и для конических 35–75 %.

Мощность на преодоление механических потерь составляет 5–7 % общей мощности, потребляемой мельницей.

Все составляющие мощности за исключением мощности на размол, то есть полезной мощности, являются потерями. В соответствии с этим В. Н. Гончаров ввел понятие о **коэффициенте эффективности** в виде:

$$\eta = \frac{P_{\text{р}}}{P}. \quad (4.11)$$

В учебнике [2] проведен анализ характера изменения коэффициента эффективности в зависимости от удельной нагрузки на кромки ножей и

окружной скорости ротора. В результате даны рекомендации, позволяющие сделать обоснованный выбор экономичной работы мельницы при максимальном коэффициенте эффективности для конкретных технологических условий.

Итак, на основании рассмотренного процесса массного размола в машинах с ножевой гарнитурой можно выделить следующие ключевые теоретические понятия:

- фибриллирование и гидратация волокон в процессе размола;
- водородные связи между волокнами, обеспечивающие высокую механическую прочность бумажного листа;
- процесс массного размола – это механическое действие в присутствии воды, модифицирующее волокно, обеспечивающее прочностные свойства бумаги;
- величина зазора между ножами ротора и статора, устанавливается в диапазоне 0–0,5 мм;
- общим для всех машин с ножевой гарнитурой является наличие ротора с выступающими ножами и противолежащий им набор ножей на статоре;
- секундная режущая длина L_s – это длина пересечения ножей ротора и статора за 1 секунду. величина L_s является косвенной характеристикой размалывающей способности и производительности мельницы;
- волокна в процессе размола откладываются на кромках ножей ротора и статора. Величина зоны размола у кромок составляет 2–3 мм (при экспериментах с хвойной сульфитной целлюлозой);
- коэффициент трения в зоне размола $f = T/R$, величина $f = 0,10 \div 0,11$;
- удельная нагрузка на кромках ножей $B_s, \frac{\text{Дж}}{\text{м}}$, с учетом этой величины полезная мощность размола может быть представлена в виде:

$$P_p = B_s \cdot L_s;$$

- $P_{\text{хх}}$ – мощность холостого хода – это мощность при работе мельницы с зазором между ротором и статором больше 1 мм;
- степень помола определяется на специальном приборе в градусах Шоппер–Риглера °ШР и показывает способность массы к водоотдаче, жирная – более размолотая масса, садкая – менее размолотая;
- полезная удельная энергоемкость размола представляет собой отношение затрат удельной полезной энергии к приросту градуса помола, т. е.

$$E_{\text{п}} = \frac{\Delta U_{\text{п}}}{\Delta^{\circ}\text{ШР}};$$

- графически зависимости степени помола от удельного расхода энергии представляют собой S – образные кривые, показывающие динамику процесса размола;
- сила, продвигающая массу в зоне ротора, является проекцией центробежной силы на направление движения, т. е.

$$T_{\text{пр}} = Q_{\text{ц}} \cdot \sin \alpha,$$

где α – угол конусности мельницы, максимальное значение равно 90° для дисковой мельницы;

P – общая мощность мельницы;

P_p – полезная мощность размола;

P_{Π} – мощность на перекачивание массы (2–4 % от общей мощности);
 $P_{\text{д}}$ – мощность на преодоление гидродинамических потерь (25–60 % для конических и 35–75 % для дисковых) от общей мощности;
 $P_{\text{м}}$ – мощность на преодоление механических потерь (5–7 % от общей мощности);
 P_{Π} , $P_{\text{д}}$, $P_{\text{м}}$ – это потери мощности с точки зрения воздействия на волокно, то есть размола;
 $\eta = \frac{P_{\text{р}}}{P}$ – коэффициент эффективности мельницы.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

Окорка древесины. Корообдирочные барабаны

1. Чем определяется необходимая степень окорки древесины?
2. Какие свойства коры влияют на качество окорки древесины?
3. Какие существуют основные способы окорки древесины?
4. Устройство и принцип действия корообдирочного барабана?
5. Какие существуют основные конструкции корообдирочных барабанов?
6. Что применяется для интенсификации процесса окорки древесины?
7. Схема движения балансов в поперечном сечении корообдирочного барабана. В какой зоне поперечного сечения барабана происходит наиболее интенсивная окорка балансов?
8. Что такое допустимая и критическая скорости вращения корообдирочного барабана?
9. Схема движения балансов вдоль продольной оси барабана. Какими конструктивными параметрами определяется транспортная производительность корообдирочного барабана?
10. Какими конструктивными параметрами определяется технологическая производительность корообдирочного барабана?
11. На что затрачивается мощность электродвигателя привода корообдирочного барабана?
12. Какие основные усилия действуют в конструкции корообдирочного барабана?
13. Из каких основных конструктивных частей состоит корообдирочный барабан?
14. Какие вам известны конструкции опор корообдирочных барабанов?

Дефибрирование древесины. Дефибреры

1. Какие основные свойства древесины влияют на процесс дефибрирования?
2. Что представляют собой плотный и складской кубометры древесины, какая существует между ними взаимосвязь?

3. Устройство и принцип действия дефибрера?
4. Какие существуют основные типы дефибреров?
5. Современный взгляд на процесс дефибрирования. Какие основные конструктивные и технологические параметры влияют на процесс?
6. Какие существуют виды дефибрерных камней? Их сравнительные достоинства и недостатки?
7. От чего зависит осевое усилие на валу камня дефибрера?
8. Почему регламентированы пуск и останов камня? Какие выводы можно сделать по графикам изменения температурных напряжений по радиусу камня?
9. Для чего производится насечка поверхности дефибрерного камня? Как описать геометрию поверхности камня после насечки?
10. Какие усилия действуют в шахте цепного дефибрера, в прессовых коробках прессового дефибрера?
11. Какими двумя способами можно рассчитать мощность привода дефибрерного камня?
12. Какими конструктивными и технологическими параметрами определяется производительность дефибрера?
13. Какие усилия действуют на вал камня дефибрера? Какой вид имеют эпюры изгибающего, крутящего и приведенного моментов на валу камня?
14. Как проверить камень на валу на проворачивание и проседание относительно шайб?
15. Из каких основных конструктивных частей состоит цепной дефибрер (прессовый)?

Производство технологической щепы. Рубительные машины

1. Чем определяются и от чего зависят физико-механические свойства древесины, влияющие на процесс рубки?
2. Какие требования предъявляются к технологической щепе и чем они определяются?
3. Назовите основные признаки, по которым классифицируются рубительные машины. Опишите достоинства и недостатки рубительных машин различных конструкций.
4. Из каких основных узлов состоит рубительная машина? Каково назначение маховика?
5. Каким способом регулируется зазор между ножами на диске и контрножом на кожухе? Каким должен быть зазор при нормальной работе?
6. Чем определяются длина щепы? Запишите условие непрерывности резания в дисковой рубительной машине.
7. От чего зависят производительность и мощность рубительной машины?
8. Какие свойства древесины и параметры рубительных машин влияют на толщину щепы?

9. От чего зависит удельное усилие резания? Как связано удельное усилие с удельным расходом энергии на рубку?
10. За счет каких сил обеспечивается продвижение баланса в период рубки? Почему выход кондиционной щепы на многоножевых машинах больше, чем на малоножевых?
11. Как изменяется угол заточки ножей в рубительных машинах с геликоидальной поверхностью диска? В чем преимущества таких машин?
12. Из каких составляющих складывается мощность привода рубительной машины?
13. Как влияют маховые массы на выбор мощности асинхронного и синхронного двигателей? Какой из этих двигателей имеет большую мощность для машин равной производительности?
14. В каком направлении, почему и с какой скоростью вылетает щепа после откола ее от баланса? Как это используется в машинах с безударным выбросом щепы?
15. Для чего и в каких рубительных машинах на ободе диска устанавливаются лопасти?
16. Какова структура обозначений рубительных машин, изготавливаемых в СССР и России?
17. Каковы основные направления совершенствования конструкции рубительных машин?

Массный размол. Ножевые размалывающие машины

1. Назовите основные стадии измельчения и размола волокнистых материалов, а также соответствующие им виды машин.
2. Опишите классификацию ножевых размалывающих машин. Что означают буквенные и цифровые индексы в марке мельниц?
3. В чем состоят преимущества дисковых мельниц перед коническими?
4. Назовите основные типы дисковых мельниц. Сделайте анализ их достоинств и недостатков.
5. Что характеризуют показатели секундной режущей длины и площади контакта ножей ротора и статора? Какие можно предложить способы для увеличения этих показателей?
6. Каковы современные представления о механизме размола в ножевых машинах? Какова оптимальная ширина ножей?
7. Что такое удельная нагрузка на кромки ножей и как ее можно регулировать при работе мельниц?
8. Как движется масса в дисковой мельнице при массном размоле? За счет чего образуется обратный поток массы в каналах гарнитуры ротора?
9. Как можно регулировать прирост напора массы на выходе из мельниц? Что такое работа мельницы в режимах «прокачивания» и «удержания»?

10. Из каких составляющих складывается мощность мельницы и от чего они зависят? Как их определить в условиях производства?
11. Что такое коэффициент эффективности и за счет чего он может быть повышен?
12. Какими показателями характеризуется технологический эффект работы мельницы? Какие видоизменения претерпевает волокнистый материал при прохождении через мельницу?
13. Какие существуют рекомендации по выбору окружной скорости и частоты вращения ротора мельниц при массном размоле? Чем обосновывается выбор необходимой скорости?
14. Из каких составляющих складывается нагрузка, действующая на упорный подшипник дисковой мельницы при массном размоле? Какие нагрузки воспринимаются радиальными подшипниками?
15. Как обеспечить замену изношенной гарнитуры дисковой и конической мельниц? Из каких соображений выбирается материал гарнитур?
16. За счет каких параметров можно повысить технологическую производительность мельниц?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаузе, А. А. Теория и конструкция оборудования для подготовки бумажной массы. В 2 ч. Ч. I : учебное пособие / А. А. Гаузе, В. Н. Гончаров. – 3-е издание, перераб. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 83 с. – Текст непосредственный.

2. Гаузе, А. А. Оборудование для подготовки бумажной массы : учебник для вузов / А. А. Гаузе, В. Н. Гончаров, И. Д. Кугушев. – М.: Экология, 1992. – 352 с. – Текст непосредственный.

3. Добровольский, П. П. Дефибрирование древесины / П. П. Добровольский. – М.: Лесная промышленность, 1972. – 232 с. – Текст непосредственный.

4. Гончаров В. Н. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. Ч. 2. Рубительные машины : учебное пособие / В. Н. Гончаров, А. А. Гаузе, М. В. Аввакумов. – СПбГТУРП. – СПб., 2012. – 50 с.: ил. 15. – Текст непосредственный.