

УДК 674.02

DOI: 10.15393/j2.art.2014.2801

Обзор

Обзор исследований окорки древесины

Юлия В. Никонова^{1*}, Марина И. Раковская¹, Наталья А. Доспехова¹ и Мария И. Зайцева¹

¹ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, 185910, Петрозаводск, Россия;
E-Mails: juli4455@mail.ru (Ю. В. Н.); mir1998@bk.ru (М. И. Р.);
dospeh@ced.karelia.ru (Н. А. Д.); 2003bk@bk.ru (М.И.З.).

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: juli4455@mail.ru (Ю. В. Н.);
Tel.: +7(8142)719605; +7(921)2212592

Получена: 4 июня 2014 / Принята: 7 июля 2014 / Опубликовано: 3 сентября 2014

Аннотация: Окорка древесины в корообдирочных барабанах является энерго- и ресурсоемким процессом, что обуславливает актуальность ее совершенствования. В работе представлен обзор результатов исследований, связанных с повышением качества очистки балансов в корообдирочных барабанах, за период с 1964 года до наших дней. Рассмотрены технологические схемы групповой окорки в корообдирочном барабане, математические модели процесса, приведены результаты экспериментальных исследований, как в производственных, так и лабораторных условиях. Изложены различные методики математического моделирования процесса окорки. В обзоре приведен краткий анализ результатов исследования влияния размеров барабана, частоты вращения и степени его заполнения, а также породы, длины и диаметра древесины на эффективность процесса окорки. Основное внимание уделяется вопросам ресурсосбережения. Установлено, что в качестве комплексных индикаторов, характеризующих параметры сырья и режим окорки, могут быть использованы количество и сила ударов, получаемых балансом в единицу времени. Эффективность отделения коры от древесины, а также величина потерь древесного сырья определяются интенсивностью взаимодействия балансов в барабане.

Ключевые слова: окорка; балансы; барабан корообдирочный; модель математическая

DOI: 10.15393/j2.art.2014.2801

Review

Review of pulpwood debarking processes investigations

Yuliya Nikonova^{1,*}, Marina Rakovskaya¹, Natalia Dospehova¹ and Maria Zaitseva¹

¹ Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia;

E-Mails: juli4455@mail.ru (Y.N.); mir1998@bk.ru (M.R.); dospeh@ced.karelia.ru (N.D.);
2003bk@bk.ru (M.Z.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: juli4455@mail.ru;
Tel.: +7(8142)719605; +7(921)2212592

Received: 4 Jun 2014 / Accepted: 7 July 2014 / Published: 3 September 2014

Abstract: Wood debarking by means of debarking drums as an energy and resource-intensive process draws intensive interest of researchers. The paper presents an overview of the publications from 1964 up to the present time dealing with the results of research related to improving the quality of pulpwood cleaning by means of debarking drums. The review focuses on technologies of wood drum debarking, mathematical simulation of the process, results of experimental studies both in industrial and laboratory environments. Various methods of mathematical simulation of debarking are cited. A brief analysis is given of the effect that drum proportions, rotation speed and the degree of filling, as well as pulpwood length and diameter produce on the efficiency of the debarking process. The review focuses on cost-effective use of resources in the wood debarking process. The reviewers come to the conclusion that pulpwood interaction intensity and frequency can be used as integral indicators of the raw material parameters and the debarking mode. The efficiency of wood debarking, as well as the magnitude of wood loss are determined by the intensity of pulpwood collisions inside the drum.

Keywords: debarking; pulpwood; debarking drum; mathematical simulation

1. Введение

Очистка от коры является необходимым звеном в технологии подготовки круглых лесоматериалов к их дальнейшему использованию. Крупным потребителем круглых лесоматериалов является целлюлозно-бумажная промышленность, где требуется наиболее высокая степень очистки от коры. Развитие технологий очистки круглых лесоматериалов от коры отражено в работах [1, 11, 12, 13, 14, 15]. Очистка древесины в корообдирочных барабанах остаётся в настоящее время доминирующей на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности [11, 12, 13, 14, 15, 64, 65, 66], развиваясь параллельно с роторной [1, 7] и другими технологиями окорки [8, 44].

Большой объем экспериментальных и теоретических исследований по очистке древесины от коры был выполнен в 1970-е годы [65]. Обобщение полученных в эти годы результатов с учетом выполненных до 1980 г. работ, начиная с работы Б. Г. Залегаллера (1949), приведено в монографии С. П. Бойкова [1].

Высокая степень очистки балансов от коры достигается увеличением продолжительности их обработки в барабане. Однако в этом случае с течением времени возрастает число ударов по очищенной от коры поверхности баланса, что ведет к разрушению и потерям древесины. Поэтому необходим компромисс между потерями древесины и степенью очистки от коры [1, 4, 5, 8, 11, 12, 26].

Согласно [65], потери древесины при очистке в корообдирочных барабанах могут составлять от 1 до 4 %. Это больше, чем при хранении круглых лесоматериалов (от 0,1 до 0,5 %), измельчении на щепу и сортировке щепы (от 0,5 до 2,5 %), транспортировке щепы (от 0 до 0,5 %), хранении щепы (от 0,1 до 1,5 %). Некоторые предложения по уменьшению потерь древесины рассмотрены в статьях [9, 10, 13, 16, 18, 24, 25].

В ЦБП на выпуск одной тонны целлюлозы требуется от 4 до 6 м³ подлежащей измельчению древесины, до 450 кВт·ч электроэнергии, до 180 м³ воды (470 м³ в 1954 г.). Прогнозируется сохранение тенденции развития технологий глубокой переработки древесины на обозримую перспективу, как в России, так и в других странах, в экономике которых приоритетное место занимает лесопромышленный комплекс (ЛПК) [<http://www.unece.org/forests.html>].

Актуальность многоплановой проблемы окорки следует из необходимости совершенствования технологий лесопереработки с учетом конкурентоспособности, включая современные требования экологической безопасности, энергетической, технической и экономической эффективности.

Цель данной статьи – аналитический обзор прикладных исследований, ориентированных на решение указанной выше проблемы.

2. Обзор технологий групповой окорки древесины

На отечественных и зарубежных предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности окорку древесины производят в барабанах непрерывного действия. Различают окорку длинномерной и короткомерной (балансы (pulpwood) длиной 1,2 м) древесины.

Обычно короткомерную древесину окаривают в барабанах, имеющих диаметр до 5 м и длину до 30 м. В соответствии с существующими регламентами окорка древесины выполняется при степени заполнения барабана 50...70 %. Ориентация древесины в барабане хаотичная [1, 64]. Для интенсификации процесса окорки в барабан подается пар или горячая вода.

Барабаны для окорки короткомерной древесины имеют одну или несколько цилиндрических горизонтально расположенных секций, которые опираются посредством бандажей на опорные катки. Вращение секций барабанов осуществляется с помощью приводов через зубчатую передачу. Существуют барабаны, имеющие горизонтально расположенные секции, смещенные по высоте, причем, каждая последующая секция расположена ниже, чем предыдущая. Смещение секций позволяет более равномерно распределять древесину вдоль корпуса барабана и, тем самым, повысить эффективность процесса окорки, улучшить удельные показатели работы барабанов [51]

Древесина загружается в барабан посредством загрузочного лотка, ширина которого меньше половины диаметра барабана. Дно лотка выполнено в виде наклонного желоба и примыкает к торцевой стенке корпуса барабана выше его продольной оси. Выгрузочное устройство барабана представляет собой сложную рамную конструкцию, обычно состоящую из порога и горизонтально перемещающегося затвора, позволяющего поддерживать постоянную степень заполнения барабана древесиной.

Окорку длинномерной древесины (длиной 4...8 м) производят в корообдирочных барабанах, имеющих длину до 60 м [60]. Окорка древесины выполняется при степени заполнения барабана 20...25 %. Ориентация древесины – преимущественно вдоль корпуса барабана (так называемая «параллельная» окорка древесины). Вследствие этого, при окорке длинномерной древесины меньше потери древесины [62], чем при окорке коротыя за счёт уменьшения разбивания торцов и повреждения поверхности балансов.

Находящиеся в эксплуатации барабаны для окорки длинномерной древесины имеют регулируемую частоту вращения секций. Например, барабан фирмы «Rauma-Repola» диаметром 3,8 м и длиной 45 м имеет частоту вращения секций от 0 до 14 мин⁻¹. Производительность барабана аналогичного барабана фирмы «KONE-KMW» при окорке хвойной древесины составляет 150 м³/ч (степень окорки 95 %) [62]. Для сравнения: барабан фирмы «KONE» диаметром 5,0 м и длиной 26 м при окорке короткомерной хвойной древесины имеет производительность 180 м³/ч (степень окорки 95 %).

Корпус барабана для «параллельной» окорки выполнен в виде конуса с меньшим диаметром со стороны загрузки древесины (фирма KMW, Швеция) или в виде цилиндра,

наклоненного в сторону выгрузки древесины (фирма Andritz, Австрия; Warplan, Швеция). Наклон корпуса барабана или изготовление корпуса в виде конуса способствует перемещению и более равномерному распределению древесины вдоль барабана [45]. Длинномерная древесина загружается в барабан посредством ускорительного рольганга. Особенностью конструкции выгрузочного устройства барабанов для окорки длинномерной древесины является использование затворов поворотного типа либо отсутствие затвора.

Одновременно с окоркой длинномерной древесины допускается окорка 10...20 % коротыя [1]. Одновременная окорка короткомерной и длинномерной древесины производится в крупногабаритных корообдирочных барабанах непрерывного действия, имеющих диаметр до 6 м и длину до 38 м. Окорка древесины выполняется при степени заполнения барабана 30...35 %. Ориентация древесины в барабане – хаотичная. С 1982 года фирмы «KONE» и «Rauma-Repola» (Финляндия) поставляли на мировой рынок линии для переработки балансовой древесины на технологическую щепу производительностью 1...1,3 млн. м³/год. Эти линии оснащаются крупногабаритными корообдирочными барабанами, позволяющими окашивать древесину длиной до 6 м. Частота вращения секций барабанов фирмы «KONE» – 5...5,5 мин⁻¹. Некоторые барабаны имеют регулируемую частоту вращения секций от 2 до 7 мин⁻¹.

Основным недостатком окорки древесины в крупногабаритных барабанах является увеличенное количество лома, особенно при окорке балансов, длина которых больше диаметра барабана. Это приводит к повышенным потерям древесного сырья. В подобных случаях рекомендуется снижение частоты вращения секций барабана [61].

Барабаны для окорки смеси древесины разной длины имеют цилиндрический корпус. Корпус барабанов наклонен в сторону выгрузки древесины. Уклон корпуса барабана 6×35 м фирмы «KONE» составляет 1:100.

Древесина загружается в барабан посредством загрузочных лотков, имеющих высокие боковые стенки и плоское дно. Дно лотка примыкает к торцевой стенке корпуса барабана ниже его продольной оси. Ширина лотка несколько меньше диаметра барабана. Загрузочные лотки барабанов диаметром 5,5 и 6,0 м позволяют загружать одновременно до 30 м³ древесины. Используются два варианта загрузки древесины в барабан: загрузка древесины пучками непосредственно в лоток барабана с помощью мостовых кранов и равномерная загрузка древесины в лоток подающим транспортером. Выгрузочное устройство барабана представляет собой сложную рамную конструкцию (рис. 1). Выгрузочное устройство барабанов фирмы «KONE» имеет порог и вертикально перемещающийся затвор. Положение верхнего края затвора изменяется по высоте на величину $h = 0.4D$ где D - диаметр барабана. Выгрузочное устройство барабанов фирмы «Rauma-Repola» выполнено в виде поворотного затвора. Перемещение затворов осуществляется с помощью гидроцилиндров.

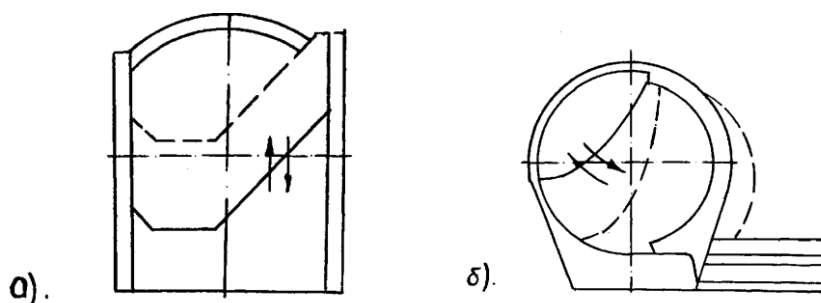


Рисунок 1. Выгрузочные устройства барабанов: а – фирмы «Kone»; б – фирмы «Rauma-Repola»

Таким образом, современные линии ведущих зарубежных фирм для производства щепы создаются на базе крупногабаритных барабанов непрерывного действия диаметром 5,5 и 6,0 м и длиной 26...38 м, позволяющих окоривать смесь древесины разной длины с производительностью 160...400 м³/ч при степени окорки древесины более 90 %. Барабаны для окорки смеси древесины разной длины являются более производительными, чем барабаны для окорки коротыя или длинника, но имеют существенный недостаток - увеличенное количество лома, приводящее к повышенным потерям древесного сырья.

Окорка короткомерной древесины, смеси древесины разной длины производится при беспорядочной ориентации балансов в барабане, имеющем отношение длины к диаметру около 6. Окорка длинномерной древесины производится при преимущественной ориентации древесины вдоль корпуса барабана.

Частота вращения секций современных барабанов изменяется в пределах от 0 до 14 мин⁻¹, что составляет 0,65n_{кр}, где n_{кр} - критическая частота вращения секций.

3. Процессы, происходящие при групповой окорке древесины в барабанах

Необходимость рассмотрения этого вопроса имеет принципиальное значение, поскольку выяснение причин и механизма окорки древесины в барабане позволяет правильно выбрать направление исследований.

В отечественной литературе впервые вопрос о причинах окорки рассматривался в работах А. В. Житкова [20, 21, 22, 23], в которых указывалось, что отделение коры от древесины в барабане происходит в результате трения поверхностей трущихся поленьев. В работе [23] автор уточняет, что процесс окорки трением является следствием дискретного взаимодействия поверхностей древесины, обусловленного действием нормальных сил и тангенциальных усилий, возникающих в плоскости контакта находящихся в движении поленьев. Таким образом, причина окорки древесины в барабане – это дискретные взаимодействия поверхностей древесины, происходящие в режиме трения, т.е. при взаимном скольжении взаимодействующих балансов. Аналогичных позиций придерживаются и некоторые другие исследователи. В частности Б. М. Локштанов [36] считает, что

результатирующим фактором, вызывающим удаление коры с древесины является наличие тангенциальной силы трения, возникающей в плоскости контакта балансов, сжимаемых нормальной силой.

Несколько иных позиций в отношении причин окорки придерживаются В. Я. Матюнин и В. Г. Разумовский [39, 46]. В. Я. Матюнин считает, что окорка древесины происходит в результате совместного действия ударной нагрузки, усилий сжатия и сдвига возникающих при взаимодействии древесины в барабане. Согласно представлениям В. Г. Разумовского окорка древесины происходит в результате действия сил трения и ударной нагрузки между взаимодействующими балансами. По всей видимости, под усилиями сдвига и силами трения авторы понимают одни и те же усилия. Таким образом, по мнению авторов, причина окорки древесины в барабане – это взаимодействие балансов, происходящее в режиме трения и режиме ударного взаимодействия.

Концепцию трения, как причины окорки древесины в барабане, подверг критике П. А. Туулас [48]. Признавая присутствие трения между балансами при их движении в барабане, автор рассматривает процесс трения как непроизводительные затраты энергии при окорке. В качестве причины окорки древесины автор отмечает кинетическую энергию обрушающегося потока балансов, которая при взаимодействиях древесины преобразуется в энергию деформации и разрушения коры, образования свободной поверхности отделенной коры и окоренной древесины.

В зависимости от представлений о причинах окорки древесины исследователи рекомендуют для практического использования различные режимы работы барабанов. Например, А. В. Житков и Б. М. Локштанов [23, 36] рекомендуют режимы работы барабана, при которых работа сил трения между балансами достигает максимальных значений. П. А. Туулас считает, что оптимальными режимами работы барабана является режимы, при которых работа сил трения минимальна. В. Я. Матюнин, В. Г. Разумовский и Г. А. Крылов [35, 39, 46] не указывают четко критерия оптимизации режима работы барабанов.

Механизм процесса окорки древесины в барабане описывается А. В. Житковым и Б. М. Локштановым [23, 36]. В работах указывается, что воздействие сил трения в условиях окорки древесины характеризуется преимущественно деформацией поверхностных слоев коры, обусловленной взаимным внедрением неровностей, имеющих на соприкасающихся поверхностях, а также упругим или пластическим отеснением коры на границе ее связи с заболонью. Находящиеся в контакте выступы окоряемых поверхностей вначале деформируются упруго. При нарушении предела прочности коры, трущиеся поверхности своими «неровностями» взаимно углубляются друг в друга и, подобно индентору, под действием тангенциальной силы начинают двигаться в толще коры, пластически отесняя материал. В том случае, если силы адгезии между корой и древесиной выражены недостаточно отчетливо и тангенциальная сила трения больше этих сил, внешнее трение индентора сменяется внутренним трением, приводящим к скалыванию и скольжению коры

по границе с заболонью. Кора при этом отделяется большими пластами, захватывая поверхности за пределами плоскости касания индентора.

Рассмотрим данное описание с точки зрения современного представления о процессе трения. Различают внешнее и внутреннее трение [28, 30, 31, 32, 33]. И. В. Крагельский в работе [31] характеризует внешнее трение следующим образом: «Процесс внешнего трения представляет собой деформирование весьма тонких поверхностных слоев каждого из соприкасающихся тел, сопровождается разрывом мостиков между пленками, покрывающими эти тела, или разрушением на глубине, если прочность мостика больше прочности нижележащего слоя». В процессе внешнего трения происходит обтекание выступов одного тела деформируемым материалом другого тела. Сочетание высоких удельных давлений между трущимися телами приводит к существенным изменениям геометрической конфигурации, физических и механических свойств поверхностных слоев этих тел. Согласно представлениям о внешнем трении, когда контактное давление между взаимодействующими поверхностями достигает разрушающих значений, режим внешнего трения нарушается и возникает режим микрорезания, а не режим внутреннего трения.

Под внутренним трением подразумеваются все необратимые в энергетическом отношении внутренние процессы, которыми сопровождается циклическое деформирование твердых материалов. Основной причиной внутреннего трения принято считать местные пластические деформации частиц (зерен, волокон) тела, обусловленные неоднородностью его микроструктуры [28].

И. В. Крагельский [31] указывает, что при наличии у материала отрицательного градиента механических свойств, т.е. если сопротивление отесненного материала в поверхностном слое больше, чем в нижележащих слоях, разрушение материала будет происходить по более слабому месту на значительной глубине. В деформации будут участвовать значительные объемы, поверхности будут рваными и шероховатыми. Тангенциальное сопротивление будет обусловлено объемными свойствами твердых тел и трение перейдет в разрушение значительных толщин контактирующих тел.

Структура коры гетерогенна. Кора состоит из неоднородных слоев клеток, имеющих стенки различной толщины и прочности. Механические свойства коры, а также связь коры с древесиной во многом определяются состоянием древесины, основными показателями которого являются влажность и температура. При окорке свежесрубленной или сплавной древесины (относительная влажность не менее 50 %) происходит отделение коры по наименее прочному, камбиальному слою, а при окорке подсушенной и мороженой древесины происходит разрушение коры по наиболее слабым участкам или микрорезание коры одного баланса более твердыми включениями коры другого баланса. Разрушение коры на древесине подобно разрушению материала твердых тел при их взаимодействии. На основании указанного можно следующим образом описать механизм процесса окорки древесины в барабане: балансы при движении в барабане взаимодействуют с различной интенсивностью, т.е. воспринимают различные по величине и количеству воздействия в

единице времени. В зоне обрушения древесины происходит скольжение одних балансов по другим, интенсивность взаимодействия определяется весом балансов и их расположением на траектории обрушения. В результате взаимодействия древесины происходит упругое или пластическое смещение поверхностных слоев коры, при этом вследствие деформации изменяются их физические, геометрические и механические свойства. Взаимодействие древесины происходит в режиме трения (рис. 2, а).

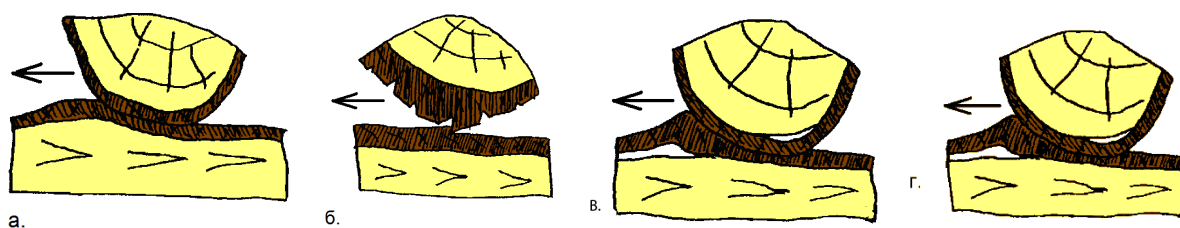


Рисунок 2. Режимы взаимодействия балансов при окорке: а – режим трения, б – режим микрорезания, в – режим макрорезания, г – режим разрушающего деформирования

Если контактные давления между взаимодействующими поверхностями достигают разрушающих значений, возникает режим микрорезания (рис. 2, б), при котором кора в местах контакта поверхностей отделяется в виде стружки. Если сопротивление оттесненных поверхностных слоев коры больше, чем нижележащих слоев или камбиального слоя, то разрушение коры происходит, либо по наиболее слабому участку коры, либо по камбиальному слою. При этом взаимодействие древесины происходит в режиме разрушающего деформирования коры (рис. 2, г). Кора деформируется, разрушается и отделяется от древесины. При наличии на поверхности древесины сучков и выступов происходит макрорезание (рис. 2, в) коры одного баланса сучками и выступами другого.

В конце обрушения возникает наиболее интенсивное (ударное) взаимодействие балансов между собой и с корпусом барабана, поскольку направление движения древесины изменяется, древесина из зоны обрушения поступает в зону подъема, интенсивность взаимодействия древесины в конце обрушения определяется весом и скоростью движения балансов при их взаимодействии. Взаимодействие древесины в конце обрушения приводит не только к непосредственному отделению коры от древесины, но и подготавливает кору путем ее деформации и разрушения к последующему отделению в процессе обрушения балансов.

Тот или иной режим взаимодействия балансов возникает в зависимости от усилий, при которых происходят взаимодействия, и от состояния древесины. Более интенсивному взаимодействию балансов соответствует большая эффективность отделения коры от древесины. С энергетической точки зрения более интенсивному взаимодействию балансов соответствует большее изменение кинетической энергии. В тоже время необходимо

отметить, что кинетическая энергия балансов сама по себе не характеризует процесс окорки древесины в барабане. При центрифугировании древесины в барабане кинетическая энергия балансов максимальная, а при остановленном барабане - равна нулю. Однако в том и другом случае относительное перемещение балансов и отделение коры от древесины не происходит. Окорка древесины производится в результате выполнения работы по деформации, разрушению и отделению коры, величина которой определяется изменением кинетической энергии при взаимодействии балансов.

Таким образом, окорка древесины в барабане происходит в результате ее взаимодействия с различной интенсивностью в режимах трения, микро и макрорезания и разрушающего деформирования, возникающего в результате удара. Эффективность отделения коры от древесины определяется интенсивностью взаимодействия балансов в барабане. Мерой интенсивности взаимодействия является величина изменения кинетической энергии при этих взаимодействиях.

При увеличении частоты вращения секций барабана, вследствие действия центробежных сил, происходит изменение характера движения и интенсивности взаимодействия древесины в барабане. П. А. Туулас в работе [48] предложил следующую классификацию критических угловых скоростей вращения секций:

1. Первая критическая угловая скорость, характеризующая начало полета балансов в барабане;
2. Вторая критическая угловая скорость, характеризующая начало полета всех балансов в барабане;
3. Третья критическая угловая скорость, характеризующая начало центрифугирования балансов в барабане.

С увеличением угловой скорости вращения барабана до первой критической происходит повышение интенсивности взаимодействия древесины как в зоне обрушения, при скольжении одних балансов по другим, так и в конце обрушения, при ударном взаимодействии балансов. Повышение интенсивности взаимодействия балансов происходит вследствие увеличения в единицу времени количества циклов «подъем-обрушение» древесины и скорости движения балансов в конце обрушения.

С увеличением угловой скорости вращения барабана до второй критической происходит уменьшение интенсивности взаимодействия древесины в зоне обрушения, поскольку часть балансов при обрушении находится в состоянии полета и увеличение интенсивности ударных взаимодействий балансов в конце их обрушения.

С увеличением угловой скорости барабана выше второй, но ниже третьей критической f происходят только ударные взаимодействия балансов в конце их обрушения.

С увеличением угловой скорости барабана выше третьей критической происходит уменьшение интенсивности взаимодействия балансов, приводящих к отделению коры, поскольку сначала часть, а затем все балансы в барабане прижимаются под действием

центробежных сил к внутренней поверхности корпуса барабана и относительное перемещение балансов отсутствует.

Согласно указанной классификации оптимальным режимом работы барабана по Б. М. Локштанову [37] является режим, при котором угловая скорость равна первой критической, в этом случае интенсивность взаимодействия древесины при скольжении одних балансов по другим – максимальная (максимальная работа сил трения). По мнению П. А. Тууласа [47], оптимальным режимом работы барабана является режим, при котором угловая скорость барабана равна второй критической, т.е. режим, при котором возникает наибольшая (ударная) интенсивность взаимодействия балансов в конце их обрушения, а взаимодействие балансов в процессе их обрушения сведено к минимуму.

Таким образом, исследователи за параметр оптимизации режимов работы барабана принимают угловую скорость его вращения. Такой подход имеет ряд недостатков.

Во-первых, разделение режимов работы барабана по характеру движения и взаимодействия древесины является условным и поэтому четко выделить тот или иной режим работы барабана, установить соответствующую режиму угловую скорость вращения барабана, определить с точки зрения окорки эффективность того или иного характера взаимодействия древесины не представляется возможным.

Во-вторых, параметр и критерий оптимизации режимов работы барабана должны характеризовать не только процесс отделения коры от древесины, но и учитывать возможные потери древесного сырья, во многом определяющие экономическую целесообразность назначения того или иного режима работы.

П. А. Туулас [47], рекомендуя режим работы барабана, при котором происходит преимущественно ударное взаимодействие балансов, не учитывает возможность возникновения повышенных потерь древесного сырья, вызванного этими взаимодействиями. В. Я. Матюнин [38], напротив, необоснованно считая, что при ударном режиме работы барабана значительно возрастают потери древесного сырья, рекомендует так называемый «каскадный» режим работы барабана.

С. П. Бойков в работе [1] указывает, что многочисленные факторы, характеризующие параметры сырья и режим окорки, можно свести к двум показателям – количеству и силе ударов, получаемых балансом за единицу времени. Под ударом автор понимает любое единичное воздействие на поверхность баланса, вызывающее отделение коры. В результате каждого удара поражается участок поверхности баланса. При поражении неокоренного участка с него удаляется кора или подготавливается ее удаление последующими ударами. При поражении окоренного участка удаляется или подготавливается к удалению поверхностный слой древесины.

На основании изложенного можно сделать следующие основные выводы:

1. Причиной окорки древесины и потерь древесного сырья является взаимодействие обрушающихся балансов между собой и с корпусом барабана;

2. Взаимодействие древесины в барабане происходит с различной интенсивностью в режимах трения, микро и макрорезанья и разрушающего деформирования;

3. Эффективность отделения коры от древесины, а также величина потерь древесного сырья определяются интенсивностью взаимодействия балансов в барабане (величиной и количеством воздействий на поверхность древесины в единицу времени). Мерой интенсивности взаимодействия является величина изменения кинетической энергии балансов при этих взаимодействиях.

4. Теоретические исследования процесса окорки древесины в барабанах

Развитие теоретических исследований процесса окорки древесины велось в направлении изучения движения и взаимодействия древесины в барабане. Вопросу изучения взаимодействия древесины в барабане посвящены исследования А. В. Житкова [20, 21, 22, 23]. Движение древесины в барабане изучалось Б. М. Локштановым, Г. А. Крыловым, В. Я. Матюниным, П. А. Тууласом, Е. М. Штейном, Р. Шериау (R. Scheriau), П. Шойхером (P. Scheucher) и другими исследователями [15, 16, 28, 35, 36, 39, 48, 51, 57, 58].

А. В. Житковым устанавливались соотношения между удельным давлением и площадью касания балансов, при которых возникает тот или иной режим взаимодействия древесины, приводящий к окорке. Учитывались форма древесины, условия ее контактирования, прочностные характеристики коры, сила ее связи с древесиной. То есть описывался процесс так называемой фрикционной окорки, который, по мнению автора, имеет место в корообдирочном барабане.

Процесс разрушения коры и ее отделения от древесины в барабане зависит не только от удельных давлений, площади касания между взаимодействующими балансами, но и от количества воздействий и не поддается учету. Однако изучение взаимодействия древесины позволяет установить, от каких факторов, характеризующих древесину, и в какой степени зависит эффективность процесса окорки.

Для определения параметров движения древесины в барабане, исследователи составляют различные по сложности физические и математические модели этого движения. При составлении моделей движения древесина в полости барабана рассматривается обычно как сыпучее тело, под которым понимается механическая смесь твердых частиц различной формы и крупности, образующих сплошную среду и взаимодействующих между собой силами сжатия и трения, причем размеры частиц значительно меньше размеров полости, в которой находится сыпучее тело [27]. Отдельные балансы рассматриваются как материальные точки.

Б. М. Локштанов [37] в своих теоретических исследованиях исходил из того, что древесина в барабане заполняет часть его объема - «сегмент заполнения». При вращении барабана сегмент заполнения поворачивается. Угол наклона массы балансов обуславливается углом трения скольжения, который зависит от размеров балансов, абразивных свойств и

шероховатости их поверхности. Древесина, благодаря трению и сцеплению со стенками барабана, перемещается вверх как единое целое. Затем балансы, находящиеся на поверхности сегмента, обрушаются по приблизительно плоской поверхности. При этом предполагается отсутствие скольжения массы балансов по внутренней поверхности барабана, а также внутри сегмента заполнения.

Недостатками указанной модели является то, что в ней не учитываются относительные перемещения древесины внутри сегмента заполнения, в результате которых происходит отделение коры от древесины, форма поверхности обрушения древесины в барабане принимается плоской, что не соответствует действительности. На самом деле, форма открытой поверхности сегмента заполнения выпуклая. На это указывают ряд исследователей [48, 53, 58].

Автор [37] рассматривает равновесие баланса на поверхности сегмента заполнения, наклоненной под углом к горизонту, и приводит уравнение равновесия:

$$P \sin \beta - fP \cos \beta = mg(\sin \beta - \tan \delta \cos \beta) \quad (1)$$

где P – сила тяжести; f – коэффициент трения.

Угол β автор называет динамическим углом откоса, характеризующим наклон поверхностного слоя сегмента заполнения при вращении барабана, в отличие от угла Δ – угла естественного откоса сегмента заполнения. При составлении уравнения равновесия пренебрегается действием на баланс центробежных сил, в результате действия которых и происходит искривление открытой поверхности сегмента заполнения. На этом автор [36] заканчивает математическое описание движения древесины в поперечном сечении барабана.

Г. А. Крылов [35, 34] различает четыре фазы в процессе движения древесины в барабане (рис. 3): подъем древесины, падение древесины при быстром вращении барабана или перекачивание балансов по поверхности естественного откоса из верхней точки сегмента заполнения в нижнюю, столкновение древесины с внутренней поверхностью барабана и перемещение древесины вдоль барабана. Принятая автором физическая модель движения древесины имеет такие же недостатки, что и модель Б. М. Локштанова. Кроме того, автор [35, 34] рассматривает движение древесины по поверхности сегмента заполнения как качение баланса без скольжения, что не соответствует действительности. На самом деле балансы при обрушении скользят по поверхности других балансов, при этом часть из них вращается вокруг своих продольных осей. Воспользовавшись теоремой об изменении кинетической энергии в относительном движении и учитывая действие на баланс центробежных сил и силы тяжести, автор получает закон движения древесины по поверхности сегмента заполнения.

Недостатки составленной автором [35, 34] математической модели в том, что она не описывает относительных перемещений древесины внутри сегмента заполнения и не учитывает сил взаимодействия балансов. Г. А. Крылов считает, что в барабанах диаметром 3 м процесс отделения коры от древесины происходит при активном участии

коронарезающих ножей, расположенных на внутренней поверхности корпуса барабана, и эффективность коронарезания, следовательно, и окорки, зависит от величины ударного импульса между балансами и корпусом барабана. Автор пытается установить связь между параметрами движения древесины и эффективностью процесса окорки, однако не приводит математического описания этой связи.

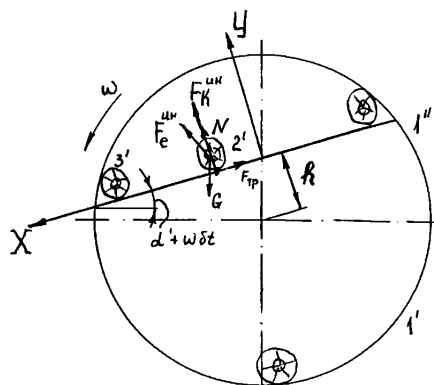


Рисунок 3. Схема движения древесины в барабане и схема сил, действующих на баланс, по Г. А. Крылову

В. Я. Матюнин [38, 39] составляет следующую физическую модель движения древесины в барабане (рис. 4). Древесина поднимается по круговой траектории от точки падения B до точки отрыва A и затем скользит по наклонной траектории AB с начальной скоростью η_n . Данная физическая модель имеет те же недостатки, что и рассмотренные ранее. Воспользовавшись вторым законом динамики и рассмотрев равновесие элемента массы древесины на наклонной траектории AB , автор получает закон изменения скорости движения древесины по наклонной траектории. Приняв, что время прохождения баланса по наклонной траектории равно времени прохождения баланса по круговой траектории с учетом начальных условий движения древесины, автор получает уравнение для определения скорости балансов в конце их движения по поверхности сегмента заполнения. Принятие равенства продолжительности подъема и обрушения балансов является грубым допущением, поскольку в действительности продолжительность подъема балансов значительно больше продолжительности их обрушения. Эта неточность сказывается на результатах исследований: автор делает ошибочный вывод о том, что с изменением степени заполнения барабана изменяется угол поворота сегмента заполнения.

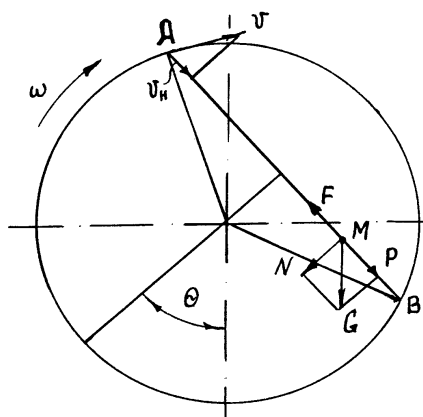


Рисунок 4. Схема движения древесины в барабане по В. Я. Матюнину

В. Я. Матюнин [38, 39], также как и Г. А. Крылов [34, 35], основным условием окорки считает необходимость ударных взаимодействий балансов с ножами, установленными на корпусе барабана. Исходя из того, что для обеспечения процесса эффективной окорки величина кинетической энергии баланса при его взаимодействии с корпусом барабана должна быть равна работе на перерезание всей толщины коры, автор определяет оптимальные размеры диаметров барабанов для различных режимов их работы и характеристик древесины. То есть, в качестве параметра оптимизации диаметров барабанов автор использует взаимодействие балансов с корпусом барабана, которое характеризуется с помощью величины, так называемой потребляемой «полезной мощности». Оптимальным является режим работы, соответствующий максимальной потребляемой «полезной мощности». Автор полагает, что производительность корообдирочного барабана зависит от интенсивности взаимодействия балансов, а, следовательно, и от потребляемой «полезной мощности», и предлагает следующую формулу для ее определения:

$$\Pi = N\Theta_{\nu\theta}^{-1}, \quad (2)$$

где Π – производительность барабана, м³/ч; N – потребляемая «полезная мощность», кВт;
 $\mathcal{E}_{yd}$ – удельный расход энергии на окорку 1 м³ древесины, $\frac{\kappa B m \cdot \text{ч}}{M^3}$.

Удельный расход энергии на окорку 1 м³ древесины автор предлагает определять экспериментально. Поскольку причиной окорки древесины в барабане является взаимодействие обрушающихся балансов между собой и со стенками барабана, а интенсивность взаимодействия прямо пропорциональна величине потребляемой «полезной мощности», то указанное уравнение отражает связь между причиной процесса барабанной окорки и ее результатом – производительностью барабана.

Вызывает сомнение правильность определения автором потребляемой барабаном «полезной мощности». «Полезную мощность» барабана предлагается определять через

работу, совершаемую загрузкой барабана за один его оборот. Работа, совершаемая загрузкой, по мнению автора, «состоит из работы на подъем массы древесины по круговым траекториям и работы вращательного момента относительно оси барабана слоев древесины, находящихся на наклонных траекториях». Понятно, что работа, совершаемая загрузкой барабана на подъем массы древесины повышает ее потенциальную энергию и, таким образом, способствует увеличению усилий, возникающих при взаимодействии балансов в процессе их обрушения. Однако, не ясно, какую положительную роль в процессе отделения коры от древесины автор отводит работе вращательного момента слоев древесины, находящиеся на наклонных траекториях.

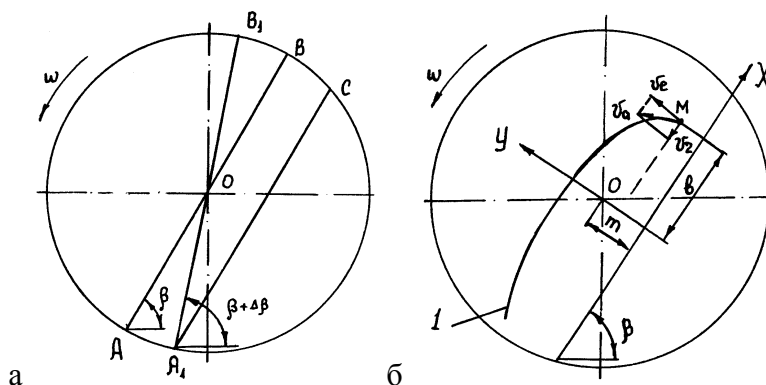


Рисунок 5. Схемы Е. М. Штейна: а – схема движения древесины в барабане; б – схема сил, действующих на баланс; 1 – траектория движения центра масс баланса М в зоне обрушения; v_e, v_r, v_a – переносная, относительная и абсолютная скорости движения баланса.

Е. М. Штейн [51, 52, 54] в своих теоретических исследованиях рассматривает схему движения древесины в барабане, аналогичную схеме движения сыпучего материала во вращающейся печи, принятой Э. Б. Канторовичем в теории барабанных машин химической промышленности [28]. Согласно этой схеме, представленной на рис. 5, положение сегмента заполнения до начала обрушения характеризуется прямой АВ, наклонённой к горизонту под углом естественного откоса сыпучего материала β . Барабан вращается в направлении, указанном стрелкой, сегмент заполнения поворачивается и его положение характеризуется прямой A_1B_1 , наклоненной к горизонту под углом $\beta + \Delta\beta$. При повороте сегмента заполнения в положение, при котором тангенс угла $\beta + \Delta\beta$ превышает коэффициент трения покоя, происходит обрушение материала клина B_1A_1C по плоскости естественного откоса A_1C . Автор условно разделяет сегмент заполнения барабана на две зоны – зону подъема балансов и зону обрушения, границей которых является плоскость естественного откоса, и считает, что в зоне подъема балансы перемещаются вместе с барабаном и траектории их центров масс представляют собой концентрические дуги. При вращении барабана балансы непрерывно поступают из зоны подъема в зону обрушения. Предложенная автором схема

движения древесины по отношению к ранее рассмотренным учитывает относительное перемещение древесины внутри сегмента заполнения. Однако движение древесины в зоне обрушения рассматривается без учета влияния вращения барабана. Принимается, что относительное перемещение древесины в зоне обрушения происходит по плоскости естественного откоса.

Разрабатывая математическую модель движения древесины в барабане, Е. М. Штейн [51, 52, 54] отходит от принятой им физической модели и рассматривает обрушение древесины по некоторой криволинейной траектории под действием силы тяжести. При этом учитывает действие на баланс силы трения и силы инерции (рис. 5 б). Раскладывая абсолютное движение баланса на относительное – скольжение вдоль плоскости естественного откоса и переносное – вращение вместе с барабаном, используя общее уравнение динамики системы материальных точек, автор получает уравнения для определения траектории центра масс в зоне обрушения:

$$\begin{aligned} X &= \left(b + \frac{a}{w^2}\right) \cos wt + m \sin wt - \frac{a}{w^2} \\ Y &= \left(b + \frac{a}{w^2}\right) \sin wt + m(1 - \cos wt) - \frac{a}{w} t, \end{aligned} \quad (3)$$

где X , Y – текущие координаты, характеризующие положение баланса в зоне обрушения в момент времени t ; a – ускорение баланса в зоне обрушения в относительном движении; m – расстояние от центра вращения барабана до поверхности, разделяющей зоны подъема и обрушения; b – положение баланса в начальный момент времени; w – угловая скорость барабана.

При выводе уравнений, описывающих движение балансов в барабане, автор устанавливает, что все балансы в зоне обрушения в относительном движении имеют одинаковые ускорения:

$$a = g(\sin \beta - f \cos \beta), \quad (4)$$

где f – коэффициент трения скольжения.

На плоскости естественного откоса сила, заставляющая балансы обрушаться, уравновешивается силой сопротивления движению древесины:

$$mg \sin \beta = fmg \cos \beta, f = \tan \beta \quad (5)$$

Подстановка $f = \tan \beta$ в формулу (4) обращает в нуль значение ускорения балансов, что означает постоянство скорости их относительного движения в зоне обрушения. Однако, на баланс, перемещающийся в зоне обрушения, действует сила инерции, величина которой зависит от положения баланса. Поскольку на баланс действует переменная сила, то скорость баланса в относительном движении не может быть постоянной, а его ускорение равно нулю.

Таким образом, полученные автором уравнения не являются корректным физическим описанием движения древесины в барабане.

Анализ движения древесины в поперечном сечении барабана позволил Е. М. Штейну выдвинуть гипотезу, что эффективность процесса окорки зависит от общей продолжительности пребывания балансов в зоне обрушения [54].

Аналитически установив связь между продолжительностью пребывания древесины в барабане и величиной T_0 м, автор предлагает формулу для расчета окорочной производительности барабана:

$$\Pi = \pi R^2 L k_g \varphi_g P (1,44 - \varphi_g) T_{0,м}^{-1}, \quad (6)$$

где R – радиус барабана; L – длина барабана; φ_g – степень заполнения барабана; k_g – коэффициент полнодревесности сегмента заполнения; P – постоянный коэффициент, зависящий от характеристик окариваемой древесины и конструкции барабана.

Поскольку уменьшение продолжительности пребывания балансов в зоне обрушения означает увеличение скорости их перемещения, а, следовательно, и кинетической энергии в момент взаимодействия, то полученное уравнение косвенно отражает связь между причиной окорки древесины в барабане и ее результатом – окорочной производительностью. Сложность заключается в определении продолжительности пребывания балансов в зоне обрушения, необходимой для достижения требуемой степени окорки. Автор предлагает экспериментально-расчетный метод ее определения по продолжительности пребывания древесины в существующих корообдирочных барабанах [52].

Для барабанов различного диаметра, одной и той же продолжительности пребывания древесины в зоне обрушения соответствует различная интенсивность взаимодействия балансов, различные условия окорки, поэтому при расчете производительности барабанов новых типоразмеров такой подход неприемлем.

Физическая модель движения древесины в барабане, составленная R. Sheriau, различает три характерных вида движения древесины в барабане: движение по круговым траекториям вместе с барабаном, скольжение в слоях клина обрушения А, В, С, скольжение по поверхности сегмента заполнения A_1 , B_1 (рис. 6). Предполагается, что элементы каждого слоя движутся друг за другом с одинаковой скоростью, а скорость движения древесины в различных слоях разная. Движение древесины по поверхности сегмента заполнения рассматривается как скольжение с возрастающей скоростью.

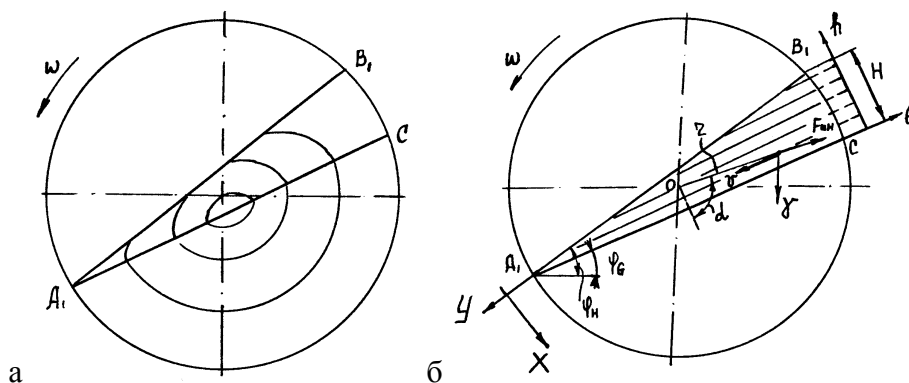


Рисунок 6. Схем R. Sheriau: а - схема движения древесины в барабане; б - схема сил, действующих на баланс.

Преимущество данной схемы по сравнению со схемой, составленной Е. М. Штейном, в том, что автор рассматривает относительные перемещения различных слоев клина обрушения, в результате которых происходит окорка, и тем самым приближает физическую модель к действительному движению древесины в барабане. Предположение автора о том, что движение древесины в каждом слое клина обрушения происходит с постоянной скоростью, есть недостаток данной схемы, о чем указывалось при анализе математического описания ранее рассмотренной схемы движения древесины.

При разработке математической модели движения древесины автор рассматривает равновесие элемента слоя внутри клина обрушения (рис. 6 б) без учета действия на него центробежных сил:

$$-\mu_v \frac{d^2 v}{dh^2} = \gamma \sin \varphi_G, \quad (7)$$

где μ_v – динамический коэффициент трения между подвижными элементами; v – относительная скорость элементов; γ – сила тяжести, действующая на элемент слоя.

$$\tan \varphi_G = \mu_G, \quad (8)$$

где μ_G – статический коэффициент трения скольжения между подвижными элементами.

Решая уравнение (7), автор получает формулу для определения относительной скорости элементов клина обрушения:

$$v = RHh - \frac{R}{2} h^2; R = \gamma \sin \varphi_G \mu_v^{-1}, \quad (9)$$

где H – высота клина обрушения; h – координата по оси.

Автор указывает, что с увеличением частоты вращения барабана в результате действия силы инерции $F_{ин}$ нарушается ровное расположение обрабатываемых слоев в клине обрушения. Искривление обрушающихся слоев учитывается с помощью некоторой константы – $\sin\varphi_G$:

$$\sin\varphi_G = \sin\varphi_G' \pm \frac{rw^2}{g} \sin\alpha, \quad (10)$$

где r – расстояние от подвижного элемента слоя до центра вращения барабана; α – угол между перпендикуляром к линии скольжения и направлением действия силы инерции.

Вызывает сомнение метод, с помощью которого автор пытается учесть действие силы инерции на перемещающийся элемент: в выражении (10) величины α и r – переменные, физический смысл постоянной $\sin\varphi_G$ непонятен. Полученные Р. Шериау уравнения не позволяют определить скорость движения древесины в конце обрушения, т.е. при взаимодействии с корпусом барабана. Таким образом, математическая модель движения древесины имеет существенные недостатки и является незаконченной.

Наиболее совершенная физическая модель движения древесины составлена П. А. Тууласом [48]. В своих теоретических исследованиях автор исходит из того, что в зоне подъема балансы перемещаются по круговым траекториям вместе с барабаном, затем обрушаются и, после обрушения, возвращаются на свои круговые траектории. Наблюдения за движением модельных балансов в модели барабана через ее торцевые прозрачные стенки подтверждают правильность принятого автором характера движения древесины в барабане.

Автор составляет две схемы движения древесины: для медленного и быстрого вращения барабана. При медленном вращении барабана из зоны подъема в зону обрушения за элементарные промежутки времени поступают элементарные объемы древесины. В начальный момент времени элементарный сектор находится в равновесии на поверхности естественного откоса, имеющей угол наклона к горизонту α . В момент времени dt , $2dt$ и т.д. этот сектор занимает различные положения и скользит вниз вдоль линий, имеющих углы наклона к горизонту, равные $\alpha + \alpha\beta$, $\alpha + 2\alpha\beta$, и т.д. В нижней части зоны обрушения в зону подъема непрерывно поступает древесина в виде элементарных секторов, при каждом повороте барабана на угол $d\beta$ за промежуток времени dt .

При составлении схемы учтены относительные перемещения древесины в зоне обрушения, влияние на эти перемещения вращения барабана, поэтому данная схема имеет преимущества по сравнению с ранее рассмотренными.

Движение балансов при быстром вращении барабана характеризуется тем, что часть или все балансы в зоне обрушения находятся в состоянии полета, т.е. движутся как тела, брошенные под углом к горизонту.

Рассмотрев силы, действующие на баланс M в произвольной точке зоны обрушения, и воспользовавшись основным уравнением динамики для абсолютного движения точки, автор составляет систему дифференциальных уравнений движения. Проинтегрировав эту систему уравнений, автор получает закон движения древесины в зоне обрушения.

Уравнение движения древесины при медленном вращении барабана описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} x &= r - \frac{g(2wt - \sin 2wt)}{8w^2 \cos \alpha} \\ y &= wrt - \frac{g(2w^2t^2 + \cos 2wt - 1)}{8w^2 \cos \alpha} \end{aligned} \quad (11)$$

где x, y – координаты положения баланса в зоне обрушения; r – радиус круговой траектории рассматриваемого баланса в зоне подъема древесины.

При выводе уравнения движения древесины автор пренебрегает действием на обрушающийся баланс центробежных сил. Однако действие именно этих сил приводит к искривлению траектории движения балансов в зоне обрушения. В этом недостаток указанного математического описания.

При выводе уравнения движения древесины в быстро вращающемся барабане автор учитывает действие на баланс только силы тяжести, рассматриваемой движение древесины как тела, брошенного под углом к горизонту. Уравнения движения древесины:

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\alpha + \beta_{or}) - wrt \sin(\alpha + \beta_{or}) \\ y &= r \sin(\alpha + \beta_{or}) - wrt \cos(\alpha + \beta_{or}) - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned} \quad (12)$$

где $0,8 - 0,85n_{кр}$ – динамическая составляющая угла отрыва.

Таким образом, автор получает математическое описание движения древесины при так называемом «каскадном» и «водопадном» режимах работы барабана, характеристики которых даны в работе [48]. Автор не смог вывести уравнений движения древесины при смешанном «каскадно-водопадном» режиме работы барабанами, поэтому полученное им математическое описание движения древесины является незаконченным.

П. А. Туулас [48] считает, что производительность корообдирочного барабана зависит от кинетической энергии балансов в конце их обрушения и, используя методологический прием из работы В. Я. Матюнина [38], предлагает формулу для ее определения:

$$\Pi = N\mathcal{E}_{y\partial}, \quad (13)$$

где N – мощность потока балансов (кинематическая энергия потока балансов в конце их обрушения в единицу времени); $\mathcal{E}_{y\partial}$ – удельная энергоемкость процесса барабанной окорки.

Поскольку отделение коры от древесины в барабане происходит в результате взаимодействия балансов при их относительных перемещениях в процессе обрушения и в конце обрушения, то предложенная автором формула не полностью отражает связь между причиной окорки и ее результатом – производительностью барабана. Автор предлагает формулу для определения мощности, потребляемой приводом барабана из сети (без учета коэффициента полезного действия привода):

$$N_{номп} = N + N_{мп}, \quad (14)$$

где $N_{мп}$ – потери мощности на трение при обрушении балансов в барабане.

Поскольку кинетическая энергия движения балансов расходуется в процессе их обрушения и в конце обрушения, то в соответствии с законом сохранения энергии ее расход компенсируется притоком энергии от привода барабана. Поэтому уравнение (14) справедливо.

Вызывает сомнение достоверность полученных автором формул для определения мощности потока балансов в барабане N и потерь мощности на трение $N_{мп}$.

В уравнения для определения N и $N_{мп}$ входит значение скорости движения балансов в конце их обрушения, $v_{обр}$. Формулу для определения указанной скорости автор получает, используя систему уравнений (11), а также следующие уравнения:

$$v_{обр}^2 = \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2, \quad (15)$$

$$t_{обр} = \left(\frac{12r \cdot \cos \alpha}{gw} \right), \quad (16)$$

где $t_{обр}$ – продолжительность обрушения балансов.

С целью упрощения полученных выражений автор использует разложение функций $\sin 2t$ и $\cos 2t$ в степенные ряды, удерживая соответственно 2 и 3 первых члена разложения. После необходимых подстановок и преобразований получается уравнение для определения $v_{обр}$, содержащее не менее 6 значимых членов. Автор приводит выражение для определения $v_{обр}$, содержащее всего два члена:

$$v_{обр} = 3 \left(\frac{1,2g^2w^2r^4}{\cos^2 \alpha} \right)^{\frac{1}{3}} - 7w^2r^2. \quad (17)$$

Данное выражение может быть получено лишь подбором под необходимый результат, обеспечивающий получение значений $N_{номр} = N + N_{мп}$ имеющих место на практике. На наш взгляд, такой подход при проведении теоретических исследований неприемлем.

Таким образом, теоретические исследования процесса окорки ведутся в направлении изучения движения и взаимодействия балансов в барабане, в результате которых происходит отделение коры от древесины. Для определения параметров движения балансов исследователи составляют различные по сложности физические и математические модели этого движения. Полученные исследователями математические модели имеют существенные недостатки и являются незаконченными. Предложенные гипотезы, устанавливающие связь между параметрами движения древесины в барабане и его технологической производительностью, не полностью отражают связь между причиной и результатом процесса окорки.

5. Экспериментальные исследования окорки древесины в барабанах

Процесс окорки древесины в барабанах непрерывного действия для упрощения исследований условно разделяют на процесс движения древесины и собственно процесс отделения коры от древесины. Процесс движения древесины исследуется методом моделирования на моделях барабанов, процесс отделения коры от древесины – на экспериментальных барабанах, обычно барабанах небольшого диаметра (около 3 м) периодического действия.

Экспериментальные исследования на моделях барабанов выполнялись Б. М. Локштановым, П. А. Тууласом, П. Шойхером, Р. Пигготтом (R. Piggott) [36, 48, 47, 58, 59]. Процесс отделения коры от древесины изучался Г. А. Крыловым, В. Я. Матюниным, В. Г. Разумовским, Н. П. Диденком, И. Блехшмидт (J. Blechschmidt), Б. Эбнер (Ebner) и другими исследователями [35, 39, 46, 55, 56].

5.1. Экспериментальные исследования на моделях барабанов

На моделях исследовалось движение древесины в поперечном сечении барабана, от загрузочного к выгрузочному устройству, определялись транспортные способности барабанов различных типоразмеров. Исследования движения древесины в поперечном сечении барабана выполнялись на моделях, имеющих торцевые прозрачные стенки, изготовленные из оргстекла. В качестве материала, имитирующего древесину, использовались модельные балансы, изготовленные из ветвей деревьев, или технологическая щепа.

При исследованиях фиксировался характер движения материала в поперечном сечении модели барабана. Результаты исследований использовались в теоретических исследованиях при составлении физических моделей движения древесины в барабане.

Характер движения материала в модели барабана, зафиксированный с помощью фотосъемки исследователем П. Шойхером, показан на рис. 7. Автор установил, что в сегменте заполнения вращающейся модели существует граница, разделяющая обрушающийся материал и материал, перемешающийся вместе с моделью (пунктирная линия (A_0B_0)), т.е. существует зона подъема (A_0AB_0) и зона обрушения материала (A_0BB_0). Движение материала в зоне подъема происходит по круговым траекториям, в зоне обрушения – по криволинейным. После обрушения материал возвращается на свои круговые траектории.

Следует отметить, что установленный характер движения материала является идеализированным, поскольку исследования проводились на мелкокусковом материале – щепе. В действительности, в результате взаимодействия балансов между собой и с корпусом барабана они перемещаются с одной траектории движения на другую, т.е. происходит перемешивание древесины в барабане.

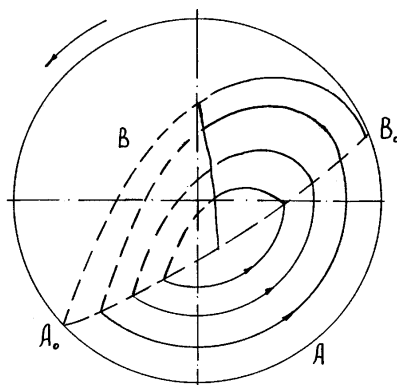


Рисунок 7. Движение сыпучего материала в модели барабана

Исследования движения древесины от загрузочного к выгрузочному устройству барабанов выполнялись на моделях с помощью маркированных модельных балансов. В результате исследований определялась продолжительность пребывания древесины в барабане при различных режимах его работы. Результаты исследований использовались при составлении математических моделей процесса окорки [59].

Исследования, проведенные П. Шойхером, П. А. Тууласом, показали, что значения продолжительности пребывания древесины в барабане имеют большой разброс (вариацию), который в дополнение к различной способности древесины к окорке обуславливает неравномерную окорку древесного сырья.

П. А. Тууласом [48] было установлено, что вариация продолжительности пребывания древесины в барабане может быть уменьшена путем увеличения интенсивности загрузки барабана, что равносильно увеличению скорости продольного перемещения балансов в барабане. Автор предложил путь полезного использования данного явления: увеличение длины и интенсивности загрузки существующих корообдирочных барабанов. По расчетам

автора увеличение длины барабана в 2 раза приведет к повышению удельной производительности на 15 % и к снижению потерь древесного сырья на 20 %.

Согласно результатам исследований П. А. Тууласа [48] с увеличением частоты вращения барабана вариация продолжительности пребывания древесины в барабане увеличивается. П. Шойхером получены противоположные результаты.

Исследуя движение древесины разной длины, П. Шойхер [58] установил, что с увеличением длины древесины вариация продолжительности пребывания древесины в барабане уменьшается. Результаты исследований не приводятся.

В рассмотренных исследованиях определялась продолжительность пребывания древесины в барабане и ее вариация, т.е. факторы, косвенно характеризующие процесс окорки. Причина окорки древесины - взаимодействие балансов - не изучалась. В этом недостаток исследований. Таким образом, исследования движения древесины в барабане являются незаконченными.

Для обеспечения нормальной работы барабанов непрерывного действия способность барабанов транспортировать древесину (транспортоспособность) от загрузочного к выгрузочному устройству должна быть не менее их окорочной производительности [48].

Исследования транспортоспособности барабанов на короткомерной древесине проводились П. А. Тууласом [47]. Согласно результатам исследований транспортоспособность промышленных барабанов значительно превышает их окорочную производительность. С увеличением длины барабана его транспортоспособность снижается, с увеличением диаметра барабана и частоты его вращения – повышается и стремится к максимуму в области частот вращения, составляющих $0,7n_{кр}$, где $n_{кр}$ - критическая частота вращения барабана.

Для обеспечения нормальной работы барабанов увеличенной длины, транспортная способность которых может оказаться меньше их окорочной производительности, автор находит возможность повышения транспортоспособности барабанов путем смещения их секций по высоте. Он устанавливает, что с увеличением перепада между секциями (h) транспортоспособность барабанов возрастает и стремится к максимуму при $h=0,35D$, где D – диаметр барабана. Для практического использования автор рекомендует применять $h=(0,1-0,3)D$. При указанном перепаде высот между секциями транспортоспособность каскадного барабана равна или несколько превышает транспортоспособность его наиболее длинной секции. Исследования транспортоспособности барабанов на древесине разной длины не проводились.

Важной особенностью исследований методом моделирования является то, что в процессе исследований возможна обработка на моделях работоспособной конструкции барабана. Зарубежные фирмы, ведущие в производстве древесно-подготовительного оборудования, в том числе фирмы «KONE», «Fibre Making Processes» при отработке работоспособных конструкций барабанов используют метод моделирования [45, 59].

5.2. Исследования на экспериментальных барабанах

Исследования процесса окорки проводились путем определения показателей работы барабанов при различных режимах их работы и характеристиках окариваемого сырья. Основными показателями работы барабанов являются: качество окорки древесины, величина потерь древесного сырья и окорочная производительность.

Факторы, влияющие на процесс окорки, обычно разделяют на две группы:

- 1 - факторы, относящиеся к барабану и режиму его работы (размеры и особенности конструкции барабана, частота его вращения, степень заполнения);
- 2 - факторы, характеризующие окариваемую древесину (порода, состояние и размеры древесины).

Исследования влияния первой группы факторов на процесс окорки проводятся для определения размеров и оптимальных режимов работы барабанов, при которых достигаются требуемые показатели их работы.

Исследования влияния второй группы факторов проводятся для определения тенденций изменения показателей работы барабанов при изменении характеристик древесины.

5.2.1. Влияние размеров барабана, частоты его вращения и степени заполнения на процесс окорки

Исследование влияния размеров барабанов на процесс окорки связано с необходимостью создания экспериментальных барабанов различных типоразмеров и определения показателей их работы в сопоставимых условиях, что дорого и трудновыполнимо. В литературе отсутствует информация о таких экспериментальных исследованиях.

Относительно влияния степени заполнения барабана на процесс окорки исследователями получены неоднозначные результаты. Согласно исследованиям Б. М. Локштанова, В. Я. Матюнина [37, 39] увеличение степени заполнения барабана до 50...60 % приводит к повышению его окорочной производительности. Г. А. Крылов установил, что при изменении степени заполнения барабана от 30 до 70 % его окорочная производительность практически постоянна [35].

Относительно влияния частоты вращения барабана на его окорочную производительность исследователями установлена следующая тенденция: с увеличением частоты вращения барабана до некоторого предельного значения его окорочная производительность увеличивается. Г. А. Крылов установил, что величина предельного значения частоты вращения барабана соответствует $0,8-0,85n_{кр}$, где $n_{кр}$ – критическая частота вращения [35]. Результаты исследований влияния частоты вращения барабана на потери древесины также неоднозначны.

Согласно исследованиям Г. А. Крылова [35] с увеличением частоты вращения барабана диаметром 3,08 м от 10 до 20 мин⁻¹ происходит уменьшение потерь древесины при любой

степени его заполнения. В. Г. Разумовский [46], проведя исследования процесса окорки древесины в барабане диаметром 4,2 м при частоте его вращения от 2,5 до 5 мин⁻¹, пришел к аналогичному выводу: при увеличении частоты вращения барабана потери древесины уменьшаются. Однако, внимательный анализ результатов исследований, выполненных В. Г. Разумовским [46], показывает, что потери древесины уменьшаются неравномерно: с увеличением частоты вращения барабана тенденция к сокращению потерь древесины исчезает. В. Я. Матюнин установил разницу в потерях древесины при частотах вращения барабана 10 и 20 мин⁻¹ (барабан диаметром 2,6 м): для березы и осины потери древесины выше при большей частоте вращения барабана, для древесины сосны – при меньшей частоте вращения.

Неоднозначность влияния первой группы факторов на показатели работы барабанов (процесс окорки) объясняется тем, что исследования проводились в несопоставимых условиях, т.е. на барабанах различных размеров при окорке древесины, имеющей разные характеристики (размеры, плотность и др.).

5.2.2. Влияние породы древесины, длины и диаметра балансов на процесс окорки

Влияние породы и состояния древесины на процесс окорки устанавливается путем определения продолжительности окорки древесины до необходимого качества, что равносильно определению окорочной производительности барабана, или путем определения величины сопротивления окорке (предела прочности на скалывание коры относительно древесины). Сопротивление окорке древесины данной породы зависит от многих факторов, среди которых наиболее существенные: влажность древесины, температура камбиального слоя.

Влияние влажности и температуры древесины на процесс окорки исследовали В. Г. Разумовский, Б. Эбнер и др. [46, 56] Установлено, что уменьшение температуры в камбиальном слое приводит к повышению сопротивления окорке, причем при температуре ниже -2°C сопротивление окорке резко возрастает. Для интенсификации процесса окорки мороженой древесины в барабан подают пар или горячую воду в количестве, достаточном для повышения температуры в камбиальном слое до -2...-5°C.

В. Г. Разумовский, анализируя результаты исследований, отмечает, что повышение влажности древесины приводит к уменьшению предела прочности на скалывание коры относительно древесины, при этом продолжительность окорки древесины до необходимого качества уменьшается, снижаются потери древесного сырья.

Анализ имеющейся информации по результатам исследований процесса окорки, а также результатам испытаний барабанов в промышленных условиях, позволил разработать таблицу коэффициентов пересчета производительности корообдирочных барабанов в зависимости от температуры окориваемой древесины, породного состава и влажности. За базу для расчета принимается производительность барабана при окорке свежесрубленной еловой древесины,

имеющей температуру в камбиальном слое не ниже минус 5°C. Производительность барабана на древесине другой породы и состояния определяется путем перемножения базовой производительности на коэффициент пересчета.

Согласно исследованиям В. Г. Разумовского, Г. А. Крылова и др. [35, 46] с увеличением диаметра балансов качество ее окорки ухудшается. В. Я. Матюнин провел исследования процесса окорки на древесине диаметром 12–16 см при толщине коры от 2 до 7 мм, а также на древесине диаметром 4–16 см при толщине коры 2 см. Он установил, что с увеличением толщины коры качество окорки ухудшается, а при увеличении диаметра древесины, имеющей одну и ту же толщину коры, качество окорки улучшается.

Влияние длины балансов на качество окорки исследовали Г. А. Крылов, Н. П. Диденко [19, 34, 35]. Исследования проводились при длине древесины значительно меньшей диаметра барабана. Согласно результатам исследований при увеличении длины баланса качество окорки ухудшается.

Исследования влияния диаметра балансов на потери древесного сырья проводили В. Г. Разумовский и Г. А. Крылов. Было установлено, что увеличение диаметра древесины приводит к уменьшению потерь древесного сырья. Согласно результатам исследований при окорке древесины длиной от 0,5 до 1,5 м и диаметром от 6 до 30 см. Наименьшие потери древесного сырья возникают в случае окорки древесины длиной 0,75...1,25 м и диаметром 12...20 см. При окорке древесины другой длины и диаметра потери древесного сырья возрастали [35, 46].

Многочисленные факторы, влияющие на качество очистки от коры, можно свести к двум параметрам – количеству соударений балансов и силе контактного взаимодействия при соударениях балансов [43]. Соударения балансов, с учетом стохастичности, рассматриваются в [1] как независимые повторяющиеся испытания по схеме Бернулли. Обычно этот подход применяется для моделирования соударений балансов одинакового диаметра. В работе [28] теоретически получены новые данные о закономерностях соударений балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане.

Исследование [28] подтверждает существование следующей закономерности: уменьшение степени очистки от коры пропорционально квадрату увеличения диаметра балансов (рис. 8). Поэтому при совместной обработке в корообдирочном барабане балансов неодинакового диаметра более интенсивному воздействию подвергаются балансы меньшего диаметра по сравнению с балансами большего диаметра. Эта закономерность подтверждается известными экспериментальными данными [15] и результатами численного моделирования [6].

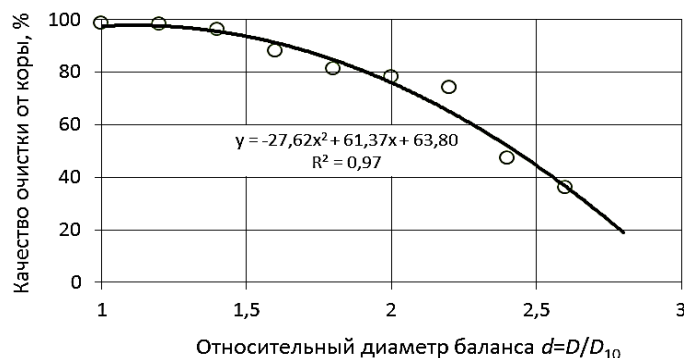


Рисунок 8. Экспериментальные данные [15] и регрессионная зависимость [28] влияния диаметра баланса $D=10d$ на качество очистки от коры ($D_{10}=10\text{см}$).

6. Обсуждение и заключение

Таким образом, если все балансы будут иметь одинаковый диаметр, то процесс очистки от коры будет наиболее эффективным по затратам времени и по критерию потерь древесины. Объясняется это тем, что площадь боковой поверхности балансов малого диаметра меньше, и, как следствие, эти балансы будут освобождены от коры за меньшее число соударений. Очистка же от коры балансов большего диаметра требует, соответственно, большего числа соударений. При этом, если в соударениях участвуют уже очищенные от коры балансы малого диаметра, то разрушается древесина этих балансов. Отсюда следует, что необходимо сортировать балансы по диаметру до загрузки в корообдирочный барабан и обрабатывать балансы в барабане группами, чтобы минимизировать различие диаметров загруженных в барабан балансов [28].

Исследования влияния размеров древесины на процесс окорки проводились для древесины длиной, значительно меньшей диаметра барабана (для короткомерной древесины), поэтому влияния длины балансов и вида смеси древесины по длинам на процесс окорки изучено недостаточно.

Исследования процесса окорки древесины проводились на моделях и на экспериментальных барабанах. Результаты исследований использовались при проектировании барабанов. На моделях проведены исследования движения древесины в поперечном сечении барабана, от загрузочного к выгрузочному устройству, определены транспортные способности барабанов различных типоразмеров, продолжительность пребывания древесины в барабане и ее вариация. Рассмотрено влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины [1] с применением методов численного моделирования [40, 41, 42, 43, 50].

Однако, исследования взаимодействий древесины в барабане (причины окорки), позволяющие получить более надежные данные о процессе окорки, не проводились. Не проводились также и исследования окорки балансов разной длины, поэтому существующие модельные исследования не являются исчерпывающими. На экспериментальных барабанах

проведены исследования влияния режимов их работы и характеристик окашиваемой древесины на процесс окорки. Однако, результаты исследований не всегда однозначны, что объясняется несопоставимыми условиями их проведения. Исследования проводились только на короткомерной древесине. Поэтому требуется дополнительное изучение влияния размеров балансов и режимов работы барабанов на процесс окорки.

Литература:

1. Бойков С. П. Теория процессов очистки древесины от коры / С. П. Бойков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980, 152 с.
2. Васильев С. Б. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Технические науки. – Петрозаводск, 2008. – № 4. – С. 84–91.
3. Васильев С. Б. Влияние технологии раскря балансовой древесины на фракционный состав щепы/ С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Г. Н. Колесников // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2011. № 195. С. 125-133.
4. Васильев С. Б. Влияние технологических параметров на выход щепы / С. Б. Васильев, Л. А. Девятникова, Ю. В. Никонова, М. И. Зайцева // Сборник научных трудов SWorld. - Одесса: Купrienko СВ ПЦ Домино, 2014. - Вып. 1. Т. 8. - С.21-27. - ISSN 2224-0187.
5. Васильев С. Б. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова, М. И. Раковская // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. № 185. С. 195-202.
6. Васильев С. Б. Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане / С. Б. Васильев, Н. А. Доспехова, Г. Н. Колесников // Resources and Technology. 2013. Т. 10. № 1. С. 024-038.
7. Газизов А. М., Шапиро В. Я., Григорьев И. В. Моделирование процесса разрушения коры при роторной окорке древесины // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2008. – № 5. – С. 271-279.
8. Гаспарян Г. Д. Основы метода и технологии ультразвуковой окорки круглых лесоматериалов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (часть 1). – С. 19-23.
9. Горбачева Н. А. О совершенствовании ресурсосберегающих технологий использования древесного сырья // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 3-2 (8-2). С. 306-308.
10. Горбачёва Н. А. Отходы древесно-подготовительного цикла целлюлозно-бумажного комбината // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 2. № 2. С. 6-12.

11. Григорьев И. В., Локштанов Б. М., Куницкая О., Гулько А. Е. Повышение эффективности групповой механической окорки лесоматериалов // ЛесПромИнформ. – 2013. – № 3 (93). – С. 72–76. <http://www.lesprominform.ru/>
12. Григорьев И. В., Локштанов Б. М., Куницкая О., Гулько А. Е. Повышение эффективности групповой механической окорки лесоматериалов. Часть 2. Основные типы окорочных барабанов // ЛесПромИнформ. – 2013. – № 4 (94). – С. 92–96. <http://www.lesprominform.ru/>
13. Григорьев И. В., Локштанов Б. М., Куницкая О., Гулько А. Е. Повышение эффективности групповой механической окорки лесоматериалов. Часть 3. Конструктивные элементы окорочных барабанов // ЛесПромИнформ. – 2013. – № 5 (95). – С. 94–98. <http://www.lesprominform.ru/>
14. Григорьев И. В., Локштанов Б. М., Куницкая О., Гулько А. Е. Повышение эффективности групповой механической окорки лесоматериалов. Часть 4. Технологические характеристики процесса сухой окорки в барабанах // ЛесПромИнформ. – 2013. – № 6 (96). – С. 76–78. <http://www.lesprominform.ru/>
15. Григорьев И. В., Локштанов Б. М., Куницкая О., Гулько А. Е. Повышение эффективности групповой механической окорки лесоматериалов. Часть 5. Размеры окашиваемых лесоматериалов // ЛесПромИнформ. – 2013. – № 7 (97). – С. 80–82. <http://www.lesprominform.ru/>
16. Девятникова Л. А. Потенциал ресурсосбережения в технологии подготовки круглых лесоматериалов к переработке на щепу // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. Т. 88. № 88-88(04). С. 188-206.
17. Девятникова Л. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н. Влияние технологии раскря балансов на фракционный состав щепы // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2012. № 3. С. 120-124.
18. Девятникова Л. А., Емельянова Е. Г. Пути повышения эффективности использования древесного сырья на целлюлозно-бумажных комбинатах // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2012. Т. 2. № 8 (129). С. 65-68.
19. Диденок Н. П. Влияние длины и диаметра чураков на качество окорки / Н. П. Диденок, Н. И. Коршунов // Деревообрабатывающие машины, инструменты и вопросы резанья: Межвуз. сб. науч. тр. Л.:ЛТА, 1984. с.63-66.
20. Житков А. В. Механика процесса окорки древесины трением / А. В. Житков // Сб. трудов. Л.: ВНИИБ, 1970. вып. 56. С.154-164.
21. Житков А. В. Окорка древесины трением / А. В. Житков // Бумага и целлюлоза. М.: ЦНТИТЭИлеспром, 1967. 22с.
22. Житков А. В. Особенности окорки древесины лиственных пород трением / А. В. Житков // Химическая переработка древесины. 1967. №35. С. 5-8.

23. Житков А. В. Хранение и подготовка сырья в целлюлозно-бумажной промышленности / А. В. Житков, С. М. Мазарский. М.: Лесная промышленность, 1980. 223с.
24. Зайцева М. И. Возможности использования отходов как компонента строительных материалов в Республике Карелия / Зайцева М. И., Никонова Ю. В. // В сборнике: Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии – Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Петрозаводский государственный университет. Петрозаводск, 2013. С. 30-36.
25. Зайцева М. И. Использование порубочных остатков для приготовления торфяных субстратов при выращивании семян сосны обыкновенной с закрытой корневой системой/М. И. Зайцева, Е. В. Робонен, Н. П. Чернобровкина // М.: Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. Изд-во МГУЛ. 2010. № 1. С. 4-8.
26. Зайцева М. И., Робонен Е. В., Чернобровкина Н. П., Колесников Г. Н. Утилизация отходов переработки хвой сосны обыкновенной // В сборнике: Деревянное малоэтажное домостроение: экономика, архитектура и ресурсосберегающие технологии/сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Петрозаводский государственный университет. - Петрозаводск, 2013. -С. 25-30.
27. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. М.: Машиностроение, 1964. 254с.
28. Колесников Г. Н., Доспехова Н. А. Закономерности соударений и качество очистки балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-15. С. 3328-3331.
29. Канторович З. Б. Машины химической промышленности / З. Б. Канторович. М.: Машиностроение, 1965.
30. Кочнева Л. Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях / Л. Ф. Кочнева. М.: Наука. 1979. 94 с.
31. Крагельский И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добыгин, В. С. Комбалов М.: Машиностроение, 1977. 525с.
32. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. М.: Машиностроение, 1968. 479с.
33. Крагельский И. В. Фрикционные автоколебания / И. В. Крагельский, Н. В. Гиттис. М.: Наука, 1987. 183с.
34. Крылов Г. А. Механика процесса сухой барабанной окорки древесины / Г. А. Крылов // Труды ЦНИИМЭ. Сб. 124. 1972. С. 118-122.
35. Крылов Г. А. Исследование процесса барабанной окорки древесины: Дис....канд.техн.наук: 05.21.01. Защищена 02.02.73. Химки, 1971. 160с.
36. Локштанов Б. М. Исследование процесса окорки березовой древесины в барабанах: Дис....канд.техн.наук: 05.21.01. – Защищена 14.12.73. Л., 1972. 88 с.
37. Локштанов Б. М. Сухая окорка древесины в барабанах на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности / Б. М. Локштанов, А. В. Житников, Т. Ф. Трефилова. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1976. 53~с. Обзор (Бумага и целлюлоза).

38. Матюнин В. Я. Некоторые вопросы теории окорки древесины в корообдирочных барабанах / В. Я Матюнин, Ф. И. Коперин // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 1972. № 2. С. 64–69.
39. Матюнин В. Я. Исследование процесса подготовки короткомерной низкокачественной древесины в корообдирочных барабанах для получения технологической щепы: Дис... канд. техн. наук: 05.06.02. – Защищена 24.10.73. Химки, 1972. 164 с.
40. Никонова Ю. В., Раковская М. И. Методика определения жесткости балансов, результаты численных экспериментов и испытаний образцов//Resources and Technology. - 2010. -№ 8. -С. 100-106. -До 2012 г. загл. Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ.
41. Никонова Ю. В. Некоторые закономерности распределения сил контактного взаимодействия балансов и корпуса корообдирочного барабана как результат численного моделирования / Ю. В. Никонова // Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике: Материалы VII международной научно-технической конференции. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. С. 49-50.
42. Никонова Ю. В. О численном моделировании технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане / Ю. В. Никонова // Современные проблемы информатизации в проектировании и информационных системах: Сб. трудов. Вып. 13 / Под ред. д. т. н., проф. О. Я. Кравца. Воронеж: Научная книга, 2008. С. 423–426.
43. Никонова Ю. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров корообдирочных барабанов с применением численного моделирования динамического взаимодействия балансов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Ю. В. Никонова. – Петрозаводск, 2009. 20 с.
44. Оскерко В. Е. Новый принцип окорки лесоматериалов // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 3. – С. 13-16.
45. Палониemi И. Новейшие компоновки древесно-подготовительных цехов / И. Палониemi. KONE, 3356 Z, 1984.~19~с.
46. Разумовский В. Г. Исследование процесса окорки лиственницы в окорочных барабанах: Дис... канд. тех. наук: 05.21.01. – Защищена 15.03.73. – Химки, 1972. – 200с.
47. Туулас П. А. Транспортируемость окорочных барабанов / П. А. Туулас, В. М. Чекалина // Бумажная промышленность. 1983. №12. С. 25-26.
48. Туулас П. А. Повышение производительности окорочных барабанов путем оптимизации их основных параметров и размеров: Автореферат дис....канд.техн.наук: 05.21.03. Л.: ЛТИ ЦБП, 1987. 16 с.
49. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчета параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2011. № 8. С. 92-96.
50. Шегельман И. Р. Моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане с применением метода дискретных элементов / И. Р.

Шегельман, Г. Н. Колесников, А. С. Васильев, Ю. В. Никонова Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. № 184. С. 172-179.

51. Штейн Е. М. Кинематика движения балансов в поперечном сечении корообдирочного барабана Л.: 1984. 8с. Деп. в ВНИПИЭИлеспром 04.03.84, №~1232лб-84.
52. Штейн Е. М. Методика расчета основных параметров каскадных корообдирочных барабанов. Л.: 1984. 9с. Деп. в ВНИПИЭИлеспром №~1317лб-84.
53. Штейн Е. М. Повышение производительности корообдирочных барабанов за счет каскадного расположения секций: Автореферат дис....канд.техн.наук: 05.21.03. Л.:ЛТИ ЦБП, 1984. 15 с.
54. Штейн Е. М. Расчет технологической производительности каскадных корообдирочных барабанов. Л.: 1984. 7с. Деп. в ВНИПИЭИлеспром 04.03.84, № 1232лб-84.
55. Blechschmidt J. Einflubfaktoren aut den Entrindungs – widerstand von Faserholz // Zells toft und Papier/ – 1983. – №3. – S.103-105.
56. Ebner B. Entrindungswiderstond // Wochen – blatt fur Papurfabrication. – 1977. –№5. – C.595-598.
57. Scheriau R. Jheorie-und verfahrenstechnik der Trommebutrindung // Wochenblatt fur Papierfabrication. – 1973. –№9. – S. 229-306.
58. Scheucher P. Bewegungsablanf in sehuttgutbefiillten Trommeln und dessen Bedeutung am Beilpiel von Holzentrindungstrommeln // Wochenbatt fur Papierfabrication. – 1981. – № 18. – S. 669-671.
59. Piggott R.R., Thompson R.A. Drumdebarking: key factors for design and performance // Tappi Journal –1987. – №8. – P. 37-41.
60. Rubber tyke supported barking drums. Rauma-Repola.–1987.–№ 8017.–6 p.
61. Jelinek V.J. Tree-length woodyards gaining popularity in most of Canada // Pulp and paper Canada. – 1985. –№10. – C. 22-26.
62. H.Randhagen. New achievement in tree-length barking // Paper Trade Journal. – 1971. – №6. – p. 26-30.
63. Den jamforaude Karakteristik av modern Barkningstrumman av firman KONE-KMB // Svensk Paper-stidning. – 1987. – №4. – C30.
64. Baroth R. Literature review of the latest development of wood debarking. – University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2005.
65. Isokangas, Ari. Analysis and management of wood room // University of Oulu, Oulu 2010. 115 pp. <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-6261-6>
66. Öman M. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2000. – T. 15. – №. 4. – C. 455-463.

References:

1. Boikov S. P. Theory of cleaning processes from wood bark / S. P. Boikov. L.: publishing house LSU, 1980, 152 p.
2. Vasilyev S. B. The influence of local stiffness of debarking drum on variability interaction forces and wood waste / S. B. Vasilyev, G. N. Kolesnikov, Yu. V. Nikonova, M. I. Rakovskaya // Proceedings of Petrozavodsk state university. Natural & Engineering Sciences. – Petrozavodsk, 2008. - № 4. - p. 84– 91.
3. Vasilyev S. B. The impact of technology on the cutting pulpwood chips fractional composition / S. B. Vasilyev, L. A. Devyatnikova, G. N. Kolesnikov // Proceedings of the St. Petersburg Forest Technical Academy. 2011. № 195. p. 125-133.
4. Vasilyev S. B. Influence of technological parameters on the yield of chips / S. B. Vasilyev, L. A. Devyatnikova, Yu. V. Nikonova, M. I. Zaitseva // Collection of scientific works SWorld. - Odessa: Kuprienko N E HRC Domino, 2014 – Issue 1 Vol. 8. - p. 21-27. - ISSN 2224-0187
5. Vasilyev S. B. Study of patterns of change in the collision force to reduce losses in the debarking drum / S. B. Vasilyev, G. N. Kolesnikov, Yu. V. Nikonova, M. I. Rakovskaya // Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2008. № 185. p. 195-202.
6. Vasilyev S. B. Simulation of Unequal Diameter Spruce Pulpwood Interaction in Debarking Drum/ S. B. Vasilyev, N. A. Dospehova, G. N. Kolesnikov // Resources and Technology. 2013. Vol. 10. № 1. p. 024-038.
7. Gaziziv A. M., Shapiro V. J., Grigorev I. V. Modeling of the process of destruction of the cortex during rotary debarking // Herald Krasnoyarsk State Agricultural University. – 2008. – № 5. – p. 271-279.
8. Gasparyan G. D. Basis of the method and technology of ultrasonic debarking of roundwood // Fundamental research. - 2013. - № 6 (Part 1). - p. 19-23.
9. Gorbacheva N. A. On the improvement of resource-saving technologies of wood raw material // Recent research directions of the XXI century: theory and practice. 2014 vol. 2. № 3-2 (8-2). p. 306-308.
10. Gorbacheva N. A. Waste wood preparation cycle paper mill // Collected scientific works Sworld. 2014 vol. 2. № 2. p. 6-12.
11. Grigoriev I., Lokshtanov B., Kunitskaya O., Gul'ko A. Improving group mechanical debarking wood // LesPromInform. – 2013. – № 3 (93). – p. 72–76. <http://www.lesprominform.ru/>
12. Grigoriev I., Lokshtanov B., Kunitskaya O., Gul'ko A. Improving group mechanical debarking wood. Part 2: Basic types of debarking drums // LesPromInform. – 2013. – № 4 (94). – p. 92–96. <http://www.lesprominform.ru/>
13. Grigoriev I., Lokshtanov B., Kunitskaya O., Gul'ko A. Improving group mechanical debarking wood. Part 3: Structural elements of the debarking drums // LesPromInform. – 2013. – № 5 (95). – p. 94–98. <http://www.lesprominform.ru/>

14. Grigoriev I., Lokshtanov B., Kunitskaya O., Gul'ko A. Improving group mechanical debarking wood. Part 4: Technological characteristics of the process in the dry debarking drums // LesPromInform. – 2013. – № 6 (96). – p. 76–78. <http://www.lesprominform.ru/>
15. Grigoriev I., Lokshtanov B., Kunitskaya O., Gul'ko A. Improving group mechanical debarking wood. Part 5: Dimensions of debarking timber // LesPromInform. – 2013. – № 7 (97). – p. 80–82. <http://www.lesprominform.ru/>
16. Devyatnikova L. A. Resource-conscious technology opportunities in round wood preparation for chip // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2013. Vol. 88. № 88-88(04). C. 188-206.
17. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Pulp wood re-sawing process influence on wood chip quality // Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik. Publishing house of Moscow State Forest University 2012. № 3. p. 120-124.
18. Devyatnikova L. A., Emelianova E. G. Ways to improve effectiveness of wood resources' usage at pulp and paper mill // Proceedings of Petrozavodsk state university. Natural & Engineering Sciences. – Petrozavodsk, 2012. vol. 2. № 8 (129). p. 65-68.
19. Didenok N. P. Influence of the length and diameter of chocks on the quality of debarking / N.P. Didenok, N. I. Korshunov // Woodworking machines, tools and issues cut: Intercollege. Sb. scientific. Tr. L.: LTA, 1984. p.63-66.
20. Zhitkov A. V. Mechanics of friction debarking process / A. V. Zhitkov // Proc. works. A. : VNIIB, 1970, vol. 56 p.154-164.
21. Zhitkov A. V. Debarking wood with friction / A. V. Zhitkov // Pulp and Paper. M. : TsNTITEIllesprom, 1967 22p.
22. Zhitkov A. V. Features of debarking hardwood with friction / A. V. Zhitkov // Chemical processing of wood. 1967. №35. p. 5-8.
23. Zhitkov A. V. Storage and preparation of raw materials in the pulp and paper industry / A. V. Zhitkov, S. M. Mazar. M. : Forest Industry, 1980 223p.
24. Zaitseva M. I. The possibility of using wastes as a component of building materials in the Republic of Karelia / M. I. Zaitseva, Yu. V. Nikonova // Collection of articles: Wooden low-rise housing construction economics, architecture and resource-saving technologies - Collection articles on the materials of the international scientific-practical conference. Petrozavodsk State University. Petrozavodsk, 2013. p. 30-36.
25. Zaitseva M. I. Utilization of logging residues in preparation of peat substrates for closed root growing of scots pine seedlings / M. I. Zaitseva, E. V. Robonen, N. P. Chernobrovkina // Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik. Publishing house of Moscow State Forest University 2010. № 1. p. 4-8.
26. Zaitseva M. I., Robonen E. V., Chernobrovkina N. P., Kolesnikov G. N. Recycling of pine needles processing wastes // Collection of articles: Wooden low-rise housing construction economics, architecture and resource-saving technologies - Collection articles on the materials

of the international scientific-practical conference. Petrozavodsk State University. Petrozavodsk, 2013. p. 25-30.

27. Zenkov R. L. Mechanics of bulk cargo / R. L. Zenkov. M.: Engineering, 1964 254 p.
28. Kolesnikov G. N., Dospehova N. A. Laws of interaction and the quality debarking of pulpwood of unequal diameter in the debarking drum // Fundamental research. 2013. № 10-15. p. 3328-3331.
29. Kantorovich Z. B. Chemical industry machines / Z. B. Kantorovich. M.: Mechanical Engineering, 1965.
30. Kochneva L. F. Internal friction in solids vibrations / L. F. Kochneva. M.: Science. 1979 94 p.
31. Kragelsky I. V. Basics based on friction and wear / I. V. Kragelsky, M. N. Dobygin, V. S. Kombalov M.: Engineering, 1977 525p.
32. Kragelsky I. V. Friction and deterioration / I. V. Kragelsky. M.: Mechanical Engineering, 1968. 479 p.
33. Kragelsky I. V. frictional autooscillations / I. V. Kragelsky, N. V. Gittis. M.: Science, 1987. 183p.
34. Krylov G. A. Mechanics of dry debarking drum process / G. A. Krylov // Works TSNIIME. digest 124 1972: p. 118-122.
35. Krylov G. A. Investigation of the process drum debarking: Dissertation of the candidate of technical sciences: 05.21.01. defense of the thesis 02.02.73. Khimki 1971. 160 p.
36. Lokshтанov B. M. Investigation of the process of debarking birch wood in drums : Dissertation of the candidate of technical sciences: 05.21.01. – defense of the thesis 14.12.73. L., 1972. 88 p.
37. Lokshтанov B. M. Dry debarking wood drums in the pulp and paper industry / B. M. Lokshтанov, A. V. Zhitnikov, T. F. Trefilov. M.: VNIPIEIllesprom 1976 ~ 53 p. Overview (Pulp and Paper).
38. Matyunin V. Y. Some problems in the theory of debarking wood debarking drums / V. Y. Matyunin, F. I. Koperin // Proceedings of the universities. Forest Journal. 1972. № 2. p. 64-69.
39. Matyunin V. Y. Investigation of the process of preparation of short low-quality wood debarking drums chipping: Dis ... Candidate. tehn. Sciences: 05.06.02. - defense of the thesis 10.24.73. Khimki, 1972. 164 p.
40. Nikonova Yu. V. Some patterns of distribution of the forces of contact interaction and balances the body debarking drum as a result of numerical simulation / Yu. V. Nikonova // New information technologies in the pulp and paper industry and power: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference. Petrozavodsk: PetrSU, 2008. p. 49-50.
41. Nikonova Yu. V. Numerical simulation of the process in the treatment of wood debarking drum / Yu. V. Nikonova // Modern problems of information in the design and information systems: Coll. works. Vol. 13 / Edited by prof. O. Ya. Kravets. Voronezh: Scientific book, 2008. p. 423–426.

42. Nikonova Yu. V. Substantiation of design and technological parameters of debarking drums using numerical simulation of the dynamic interaction balances: Thesis abstract Candidate of Science / Yu. V. Nikonova– Petrozavodsk, 2009. 20 p.
43. Oskerko V E The new principle of debarking wood // Building and road machines. - 2007. - № 3. - S. 13-16p.
44. Paloniemi I. newest build wood-preparatory workshops / I. Paloniemi. KONE, 3356 Z, 1984. ~ 19p.
45. Razumovsky V. G. Investigation of debarking larch debarking drums: Dis ... Thesis abstract Candidate of Science: 05.21.01. - defense of the thesis 15.03.73. - Khimki, 1972 - 200p.
46. Tuulas P. A. Transport ability of debarking drums / P. A. Tuulas, V. M. Chekalina // Paper Industry. 1983. №12. p. 25-26.
47. Tuulas P. A. Increase productivity by optimizing the debarking drums their basic parameters and dimensions: Thesis abstract Candidate of Science: 05.21.03. A. : LTI PPI, 1987 16p.
48. Shapiro V. Y., Grigoriev. I. V., Gulko A. E. Analysis of the methods for calculating the parameters of the mathematical model and study the destruction of the cortex in group debarking // Scientific notes of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Technical Sciences. 2011. № 8. p. 92-96.
49. Shegelman I. R. The modeling of the technological process of the wood's refinement in the barking drum with the use of the discrete components method / I. R. Shegelman, G. N. Kolesnikov, A. S. Vasiliev, J. V. Nikonova Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2008. № 184. p. 172-179.
50. Stein E. M. Kinematics balances in cross section barking drum L. : 1984 8p. Dep. in VNIPIEllesprom 04.03.84, № ~ 1232lb-84.
51. Stein E. M. Method of calculating the basic parameters of cascade debarking drums. A. : 1984 9p. Dep. in VNIPIEllesprom № ~ 1317lb-84.
52. Stein E. M. Increased productivity debarking drums by cascading sections: Thesis abstract Candidate of Science: 05.21.03. L.: LTI PPI, 1984 15 p.
53. Stein E. M. Calculation of technological productivity cascade debarking drums. A. : 1984 7p. Dep. in VNIPIEllesprom 04.03.84, № 84-1232lb – 84.
54. Blechschmidt J. Einflubfaktoren aut den Entrindungs – widerstand von Faserholz // Zells toft und Papier/ – 1983. – №3. – S.103-105.
55. Ebner B. Entrindungswiderstond // Wochen – blatt fur Papurfabrication. – 1977. –№5. – C.595-598.
56. Scheriau R. Jheorie-und verfahrenstechnik der Trommebutrindung // Wochenblatt fur Papierfabrication. – 1973. –№9. – S. 229-306.
57. Scheucher P. Bewegungsablanf in sehuttgutbefiillten Trommeln und dessen Bedeutung am Beilpiel von Holzentrindungstrommeln // Wochenbatt fur Papierfabrication. – 1981. – № 18. – S. 669-671.

58. Piggott R.R., Thompson R.A. Drumdebarking: key factors for design and performance // Tappi Journal –1987. – №8. – P. 37-41.
59. Rubber tyke supported barking drums. Rauma-Repola.–1987.–№ 8017.–6 p.
60. Jelinek V.J. Tree-length woodyards gaining popularity in most of Canada // Pulp and paper Canada. – 1985. –№10. – C. 22-26.
61. H.Randhagen. New achievement in tree-length barking // Paper Trade Journal. – 1971. – №6. – p. 26-30.
62. Den jamforaude Karakteristik av modern Barkningstrumman av firman KONE-KMB // Svensk Paper-stidning. – 1987. – №4. – C30.
63. Baroth R. Literature review of the latest development of wood debarking. – University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2005.
64. Isokangas, Ari. Analysis and management of wood room // University of Oulu, Oulu 2010. 115 pp. <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-6261-6>
65. Öman M. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2000. – T. 15. – №. 4. – C. 455-463.