

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6783

УДК 674.8

Статья

Влияние длины измельчаемого отрезка бревна на фракционный состав щепы

Васильев Сергей Борисович

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), servas@petrsu.ru

Девятникова Людмила Анатольевна

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), dev@petrsu.ru

Колесников Геннадий Николаевич

доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), kgn@petrsu.ru

Получена: 15 января 2023 / Принята: 27 февраля 2023 / Опубликовано: 4 марта 2023

Аннотация: Было замечено, что в условиях реального производства длина балансов, подаваемых в рубительную машину, оказывает влияние на фракционный состав щепы. Теоретическое изучение этого вопроса подтверждает наличие корреляции между длиной измельчаемых балансов и фракционным составом получаемой щепы. В частности, результат теоретического исследования показал, что фракционный состав щепы, полученной при измельчении отрезков брёвен дисковой рубительной машиной, зависит от их длины. Аналитическое исследование показало, что с увеличением длины измельчаемого отрезка (при прочих равных условиях) выход кондиционной фракции растёт. Таким образом, после проведения теоретических исследований были поставлены две задачи, которые следовало решить с помощью экспериментальных исследований. Первая — проверить влияние длины перерабатываемых отрезков бревна на фракционный состав щепы, вырабатываемой дисковыми рубительными машинами. Вторая — установить, как доля короткомера в общем потоке сырья, подаваемого в дисковую рубительную машину, влияет на фракционный состав щепы в условиях реального производства. Результаты исследований на экспериментальной установке показали, что между длиной отрезка бревна, измельчаемого в дисковой рубительной машине, и фракционным составом получаемой щепы существует

зависимость при верхнем и нижнем способах выброса щепы. Уменьшение длины измельчаемого отрезка в исследованном диапазоне скоростей резания (17—38 м/с) приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе. В ходе эксперимента в производственных условиях также установлена зависимость между долей короткомеров в массиве сырья, подаваемого в рубительную машину, и фракционным составом вырабатываемой щепы. Зависимости массовых долей различных фракций щепы с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейными выражениями. Исследования в производственных условиях показали, что уменьшение доли отрезков брёвен длиной не более 0,8 м в общем объёме балансов от 68 до 38 % ведёт к увеличению выхода кондиционной фракции в щепе на 2,5 %. При этом также происходит уменьшение долей крупной и мелких фракций на 0,8 % на 1,7 % соответственно. Уравнения регрессии, полученные по результатам производственного эксперимента, позволили установить предельно допустимую долю короткомеров в потоке сырья. Таким образом, получение щепы, отвечающей по фракционному составу требованиям к щепе марки Ц1 по ГОСТ 15815-83, возможно в рубительной машине с ножевым диском диаметром 2500 мм, если в подаваемом на измельчение потоке балансов доля отрезков длиной не более 0,8 м не превышает 45 %.

Ключевые слова: производство щепы; машина рубительная дисковая; баланс

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6783

Article

The effect of the chipping log sections length on the fractional composition of wooden chips

Sergey Vasilyev

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
servas@petrsu.ru*

Lyudmila Devjatnikova

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
dev@petrsu.ru*

Gennady Kolesnikov

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
kgn@petrsu.ru*

Received: 15 January 2023 / Accepted: 27 February 2023 / Published: 4 March 2023

Abstract: It was noticed that in the course of actual manufacturing process the length of the pulpwood fed into the disk chipper affects the fractional composition of the chips. A theoretical study confirmed the existence of a correlation between the length of the pulpwood and the fractional composition of the chips. In particular, the result of the theoretical study showed that the fractional composition of the chips manufactured from sections of logs chipped by a disk chipper depends on their length. Analytical research demonstrated that with the increased length of the chipped segment (all other things being equal), the yield of the standard chips increased. Thus, two tasks were set to be solved in an experimental way. The first one was to check the effect of the log chipping sections length on the fractional composition of the chips produced by a disk chipper. The second one was to establish how the proportion of short length sections of logs in the total flow of raw material supplied to the disk chipper affects the fractional composition of chips under actual industrial conditions. The experimental results showed that there was a correlation between the length of a log section crushed in a disk chipper and the fractional composition of the resulting chips when both upper and lower methods of chip evacuation were used. A decrease in the length of the crushed section in the studied cutting speed range (17-38 m/s) led to a decrease in the proportion of the standard fraction in the chips. During the industrial experiment, a correlation was also established between the proportion of short sections of logs in the total batch of raw material supplied to the chipper and the fractional composition of the chips produced.

The dependences of the mass content of various fractions of wood chips can be approximated by linear expressions with a reasonable degree of accuracy. Studies in industrial conditions showed that a decrease in the proportion of log sections with a length of no more than 0.8 m in the total amount of pulpwood from 68 to 38% led to an increase in the yield of the standard fraction in wood chips by 2.5%. At the same time, there was also a decrease in the proportions of oversized and small fractions by 0.8% and 1.7%, respectively. The regression equations obtained from the results of the industrial experiment made it possible to establish the maximum permissible proportion of short sections of logs in the flow of raw material. Thus, the manufacture of wood chips that meets the fractional composition requirements for wood chips of the C1 brand according to GOST 15815-83 is possible in a chipper with a knife disk with a diameter of 2500 mm, if the proportion of log sections with a length of no more than 0.8 m does not exceed 45% in the flow of pulpwood supplied for chipping.

Keywords: chips production; disk chipper; pulpwood

1. Введение

Технологический процесс, осуществляемый на целлюлозно-бумажных комбинатах (далее — ЦБК), предусматривает распиловку поступивших круглых лесоматериалов на мерные отрезки. Длина этих отрезков определяется конструкциями корообдирочного барабана, рубительной машины и дефибрёра. Таким образом, доставляемые на ЦБК брёвна длиной от 3,00 до 6,50 м должны быть распилены на отрезки длиной 1,2 м. В связи с этим для выполнения этой технологической операции используют слешеры (фото 1).



Фото 1. Слешерная установка

Photo 1. Slesher

Соотношение между длинами распиливаемых брёвен и расстоянием между пилами неизбежно приводит к образованию короткомеров (фото 2).



Фото 2. Короткомеры, образовавшиеся в результате раскроя брёвен

Photo 2. Short log sections formed as a result of logs cross-sawing

Все полученные на слесере отрезки брёвен поступают на один конвейер, которым подаются на дальнейшую переработку в древесно-подготовительный цех (далее — ДПЦ). При производстве технологической щепы используются все отрезки длиной до 1,2 м, полученные на слесере. Таким образом, длина отрезков, загружаемых в рубительную машину, варьируется в широких пределах (фото 3). Конечно, основную часть сырья составляют отрезки стандартного размера, однако доля короткомеров в общей массе доходит в отдельные моменты до 70 %. То есть в отдельные короткие периоды рубительная машина производит щепу практически из короткомеров. В ходе предварительного изучения было замечено, что в условиях реального производства длина балансов, подаваемых в рубительную машину, оказывает влияние на фракционный состав щепы [1], [5].

Теоретическое изучение этого вопроса подтверждает наличие корреляции между длиной измельчаемых балансов и фракционным составом получаемой щепы [2]. В частности, результат теоретического исследования показал, что фракционный состав щепы, полученной в результате измельчения отрезков брёвен дисковой рубительной машиной, зависит от их длины. А именно: чем больше длина измельчаемого баланса (при прочих равных условиях), тем больше выход кондиционной фракции.



Фото 3. Конвейер подачи сырья в рубительную машину

Photo 3. Conveyor for feeding raw materials to the chipper

Таким образом, после проведения теоретических исследований были поставлены две задачи, которые следовало решить в условиях экспериментальных исследований:

- проверить влияние длины перерабатываемых отрезков бревна на фракционный состав щепы, вырабатываемой дисковыми рубительными машинами;
- установить, как доля короткомера в общем потоке сырья, подаваемого в рубительную машину, влияет на фракционный состав щепы в производственных условиях.

2. Материалы и методы

2.1. Исследования на полупромышленной установке

Задачами экспериментальных исследований, проводившихся на полупромышленной установке, являлись изучение влияния длины, перерабатываемого баланса при различных значениях скорости резания на фракционный состав щепы при верхнем и горизонтальном способах выброса. При проведении экспериментальных исследований измельчались еловые образцы, очищенные от коры. Древесина измельчавшихся образцов не содержала гнили, имела степень окорки не ниже 90 %, массовая доля влаги в ней была 45—50 %. Температура образцов была около + 10 °С. Размеры образцов: диаметр 12 см, длина одной партии 0,5 м, длина другой партии 1,2 м.

До начала исследований была проведена серия рубок с целью определения минимальной скорости резания, при которой возможен верхний выброс щепы из установки. Значение этой скорости оказалось равным 17 м/с и явилось нижним пределом варьирования скоростей резания при верхнем выбросе щепы из полупромышленной установки. При использовании безударного выброса щепы минимальное значение скорости резания составляло 10 м/с. Верхний предел для обоих способов выброса щепы соответствовал наибольшим значениям скорости резания у существующих машин и составил 38 м/с.

Работы проводились на плоском диске с ножами, имеющими прямую заточку. Ряд конструктивных параметров поддерживался на следующем уровне: расчётная длина щепы 19 мм, состояние ножей — острые, зазор между ножами и контрножом 0,8—1,0 мм, угол заострения ножей 32°, угол примыкания патрона 38°.

Полупромышленная установка (фото 4) была создана на базе серийного образца дисковой рубительной машины МРНП-30. При этом конструкция установки позволяла создавать различные комбинации изучаемых параметров, поддерживая остальные на постоянном уровне.

Основным рабочим органом установки является ножевой диск с валом, установленный в подшипниковых опорах. На периферии диска устанавливаются лопатки для удаления щепы из кожуха: при верхнем способе выброса щепы — 16 лопаток, при горизонтальном — две лопатки.

Установка оснащена загрузочным патроном для наклонной подачи сырья (фото 5). Проходное сечение патрона имеет V-образное основание и рассчитано на переработку отрезков брёвен с максимальным диаметром 280 мм. Требуемый зазор между ножами диска и контрножами обеспечивается горизонтальным перемещением патрона при помощи регулировочных винтов.

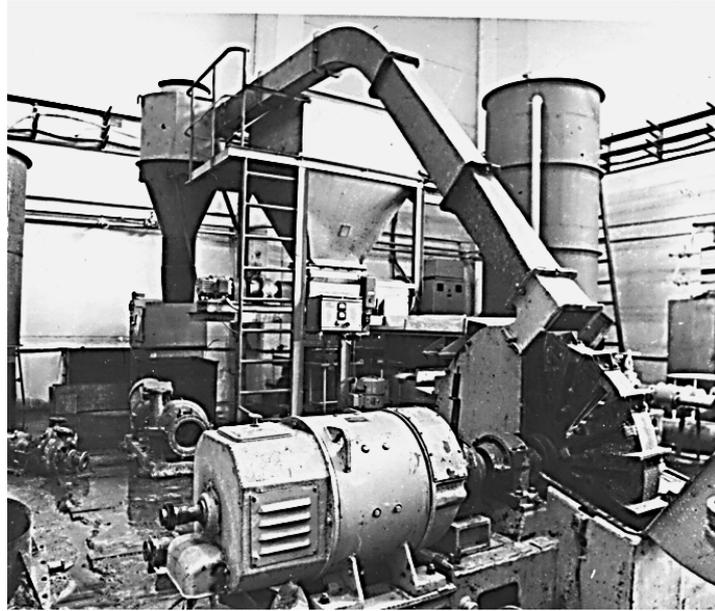


Фото 4. Общий вид экспериментальной установки при верхнем способе выброса щепы

Photo 4. General view of the experimental unit with the upper method of chip evacuation

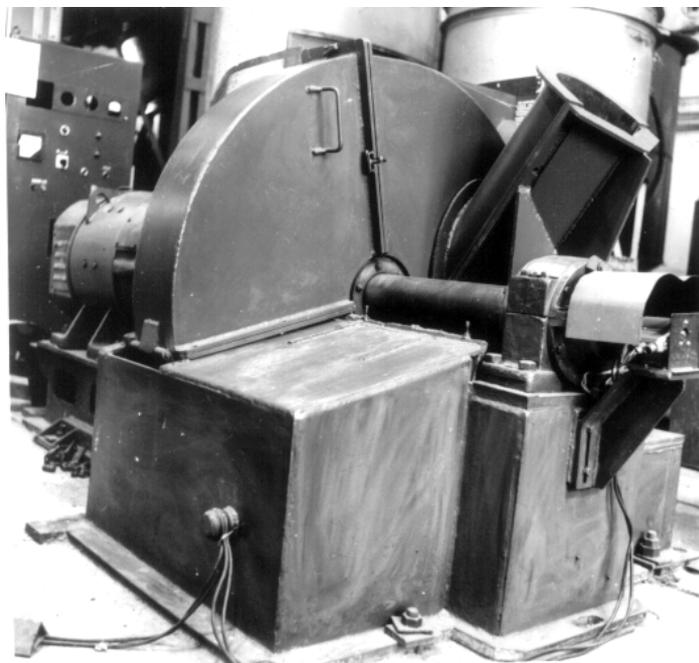


Фото 5. Вид на экспериментальную установку со стороны загрузки

Photo 5. View of the experimental installation from the loading side

Для экспериментальной установки были изготовлены два кожуха, которыми она оснащалась в зависимости от изучавшегося способа выброса щепы: кожух для верхнего способа выброса щепы и кожух для горизонтального способа выброса щепы. У кожуха для верхнего способа выброса щепы верхняя часть выполнена в виде горловины, которая щепопроводом соединена с циклоном. Кожух для горизонтального способа выброса щепы имеет с приводной стороны (фото 6) напротив окна загрузочного патрона установленный горизонтально щепоотводящий патрубок. Угол между осью патрубка и осью вращения вала диска в горизонтальной плоскости выполнен равным 10° , что позволяет учесть предполагаемое смещение направления факела выброса щепы, возникающее под действием центробежных сил. В верхней части кожуха устанавливается отбойная лопатка, которая совместно с лопатками, установленными на ободу диска, служит для более эффективного удаления через патрубок щепы, попавшей в нижнюю часть кожуха.

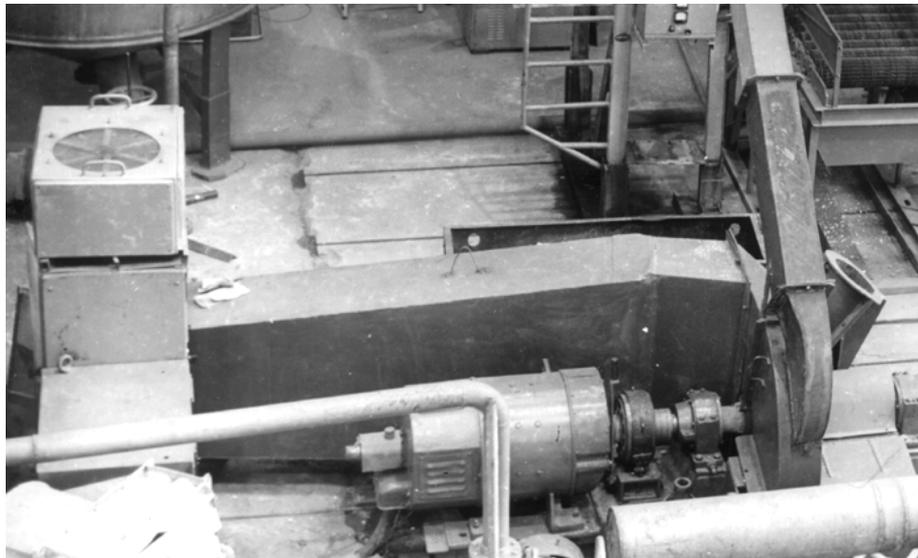


Фото 6. Общий вид экспериментальной установки при горизонтальном способе выброса щепы

Photo 6. General view of the experimental unit with a horizontal method of chips evacuation

Привод установки выполнен регулируемым. Регулирование частоты вращения ротора электродвигателя осуществляется путём изменения выпрямленного напряжения вниз от номинального на якоре электродвигателя. При этом частота вращения может быть изменена от 1000 до 100 мин⁻¹.

Работа установки осуществляется следующим образом. Древесина (отрезок окорённого бревна) по загрузочному патрону подаётся к ножевому диску, при вращении которого измельчается на щепу ножами. Образовавшаяся щепа проходит на приводную сторону диска через подножевые щели и в дальнейшем удаляется из кожуха. При верхнем способе выброса

щепы ударяется о заднюю стенку кожуха и падает вниз, где подхватывается лопатками и создаваемым ими при вращении диска воздушным потоком выбрасывается через горловину в верхней части кожуха по щепопроводу в циклон. При горизонтальном способе выброса щепы, прошедшая через подножечную щель, не встретив на пути своего движения препятствия, каким при верхнем способе выброса является задняя стенка кожуха, удаляется в щепоотводящий патрубок. Незначительная часть щепы, которая по тем или иным причинам может остаться внутри кожуха, удаляется оттуда при помощи воздушного потока, создаваемого лопатками, установленными на диске, и отбойной лопаткой.

2.2. Исследования в производственных условиях

Исследование проводилось в производственных условиях древесно-подготовительного цеха целлюлозно-бумажного комбината в период с августа по сентябрь. Отбор проб для определения фракционного состава вырабатываемой щепы осуществлялся круглосуточно.

Сырьём для производства древесной массы и технологической щепы на предприятии была еловая древесина. По данным технической лаборатории древесно-подготовительного цеха, на рубительную машину подаются балансы температурой 30—40 °С и влажностью 70 %. Отличие в показателях температуры и влажности по сравнению с исследованием на экспериментальной установке вызвано тем, что в производственных условиях древесное сырьё подавалось в рубительную машину непосредственно после корообдирочного барабана.

В древесно-подготовительном цехе установлены две рубительные машины марки МР5-150 со следующими техническими характеристиками: максимальный диаметр перерабатываемых балансов 625 мм, расчётная длина щепы 20 мм, диаметр ножевого диска 2500 мм, количество ножей на диске 15 шт., частота вращения диска 365 мин⁻¹. Скорость резания на номинальном диаметре 18 м/с. Направление подачи сырья в рубительную машину — наклонное, выброс щепы вверх, в циклон. Из циклона щепы попадают на ленточный конвейер, которым подаётся на сортировку щепы СЩ-600-1. Заметим, что вопросы влияния особенностей технологии производства щепы на геометрические параметры её частиц рассмотрены также в работе [3].

Перед забором проб щепы визуально оценивалось содержание короткомеров на конвейере между корообдирочным барабаном и рубительной машиной. При этом короткомерами считались все отрезки брёвен длиной от 10 до 80 см. Этот показатель рассчитывался по формуле $s = a/b \times 100\%$, где s — доля короткомеров в потоке сырья, %; a — количество короткомеров, шт.; b — общее количество балансов, подаваемых в рубительную машину, шт.

Всего в ходе исследования было выполнено 150 измерений. Пробы щепы брались круглосуточно, с интервалом 6—9 ч, т. е. один-два раза в смену. Щепы отбиралась в ёмкость объёмом 8 дм³ непосредственно на выбросе из циклона. Для каждой пробы проводился фракционный анализ щепы. Определение фракционного состава щепы производилось согласно ГОСТ 15815-83 «Щепы технологическая. Технические условия» [4].

Из навески выбирались частицы, полностью состоящие из коры или гнили и щепы с частичным наличием коры и гнили. Кору и гниль отделяли от щепы, присоединяли к отобранной коре и гнили и взвешивали. Максимальная масса коры в одной навеске зафиксирована в размере 5 г, что составило 0,21 % от массы навески. Средний показатель массовой доли коры по всем измерениям составил 0,011 %. Максимальный вес гнили зафиксирован на уровне 40 г, что составило 1,65 % от веса навески. Средний показатель массовой доли гнили по всем измерениям составил 0,011 %.

Для определения фракционного состава щепы использовался анализатор ситовый механический марки АЛГ-М с набором контрольных сит с отверстиями диаметром 30, 20, 10, 5 мм и поддон. Соотношение размеров отверстий в сите и размеров частиц таково, что только часть материала остаётся на сите, а другая его часть в виде более мелких частиц проходит через отверстия.

При описании результатов анализов фракционного состава щепы использованы следующие известные понятия: крупная фракция — остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм; кондиционная фракция — сумма остатков на ситах с отверстиями 20 и 10 мм; мелкая фракция — остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм; отсеv — остаток на поддоне анализатора.

3. Результаты экспериментальных исследований

3.1. Исследования на экспериментальной установке

Представленные на рисунках 1—4 результаты исследования показывают, что при верхнем способе выброса щепы длина измельчаемых балансов оказывает влияние на фракционный состав щепы. Уменьшение длины больше всего сказывается на массовой доле кондиционной щепы. Так, при скорости резания 17 м/с отмечено минимальное снижение доли кондиционной фракции — 0,6 %, при скорости резания 24 м/с — 2,0 %, при скорости резания 31 м/с достигает максимума — 2,5 %, а при скорости резания 38 м/с опять начинает снижаться и составляет 1,5 %.

Массовая доля крупной фракции и отсева при измельчении коротких балансов больше при всех скоростях резания. Разница между значениями имеет ту же тенденцию, что и у кондиционной фракции, т. е. достигает своего максимума при скорости резания 31 м/с, а минимума — при скорости резания 17 м/с. Что касается мелкой фракции, то на неё длина баланса оказывает небольшое влияние. Доля мелкой фракции имеет существенное отличие только при скорости резания 31 м/с.

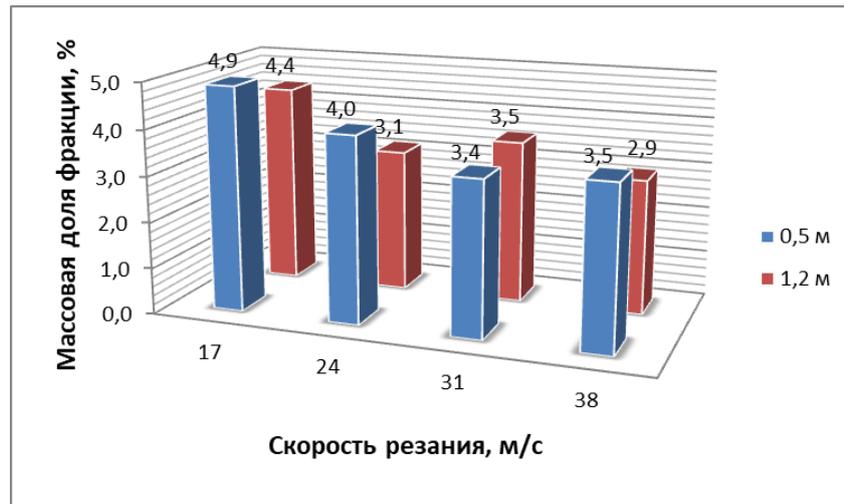


Рисунок 1. Массовая доля крупной фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 1. The mass content of an oversize fraction (the residue on a sieve with holes 30 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

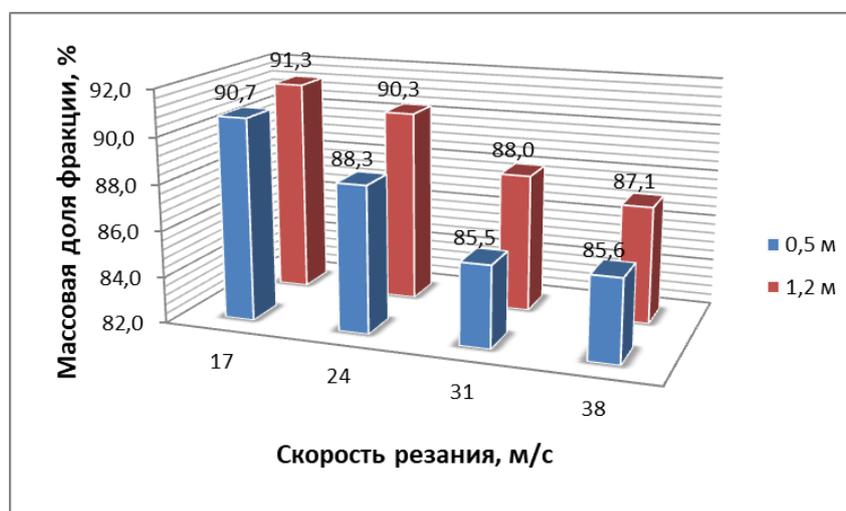


Рисунок 2. Массовая доля кондиционной фракции (сумма остатков на ситах с отверстиями диаметром 20 и 10 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 2. The mass content of the accepted fraction (the sum of residues on sieves with holes 20 and 10 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

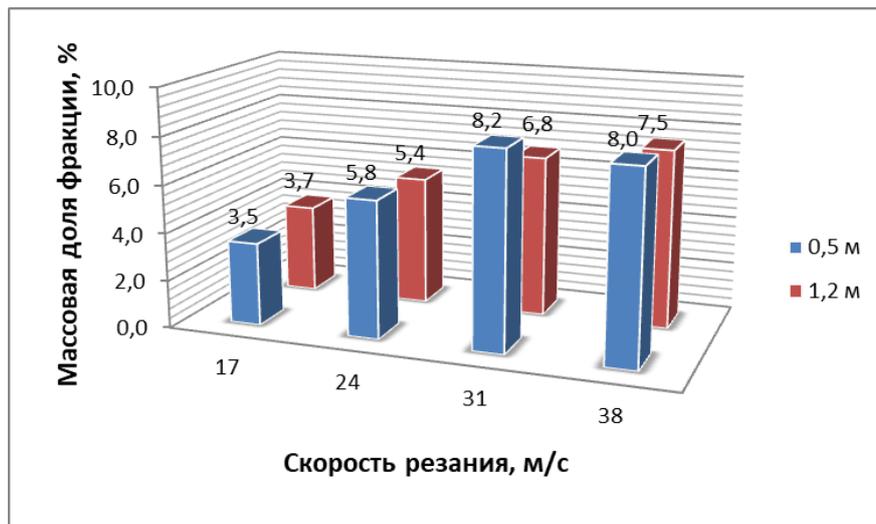


Рисунок 3. Массовая доля мелкой фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 3. The mass content of the pine chips (the residue on the sieve with holes 5 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

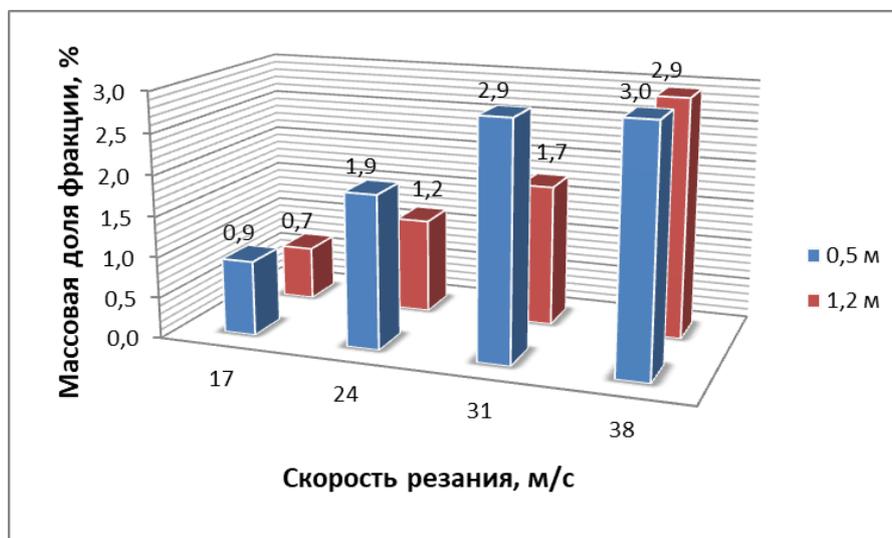


Рисунок 4. Массовая доля отсева (остаток на поддоне анализатора) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при верхнем выбросе щепы

Figure 4. The mass content of fines (the remainder on the analyzer tray), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when the upper way of wood chips evacuation is used

Результаты исследования на экспериментальной установке при горизонтальном выбросе представлены на рисунках 5—8. В целом, при горизонтальном выбросе щепы наблюдаются те же тенденции, что и при верхнем.

Доля крупной фракции в щепе при переработке более длинных образцов меньше на всех скоростях резания, за исключением скорости 38 м/с (см. рисунок 5). При этом необходимо отметить, что при скорости резания 17 м/с (наиболее часто встречающаяся скорость резания у современных рубительных машин) доля крупной фракции значительно возросла по сравнению с верхним выбросом и влияние длины перерабатываемого отрезка более значимо. Особняком в этом ряду стоят результаты, полученные при скорости резания 38 м/с. В этом случае доля крупной фракции при измельчении образцов длиной 1,2 м на 1,4 % больше, чем при измельчении образцов длиной 0,5 м. Вызвано это совместным влиянием двух факторов. Во-первых, при групповой окорке сырья в корообдирочном барабане короткие отрезки подвергаются более интенсивному воздействию нагрузок вдоль и поперёк волокон, чем длинные. Это приводит к большому ослаблению связей между волокнами древесины, в результате в отрезках появляются продольные трещины и, как следствие, более мелкие частицы (в том числе так называемые «иголки»). Во-вторых, при скорости взаимодействия ножа с измельчаемым отрезком бревна, составляющей 38 м/с, последний не успевает изменить своё положение в загрузочном патроне во время измельчения. Эта особенность не противоречит результатам теоретического анализа [2], согласно которым именно изменение положения отрезка бревна в процессе его измельчения в рубительной машине существенно влияет на качество щепы.

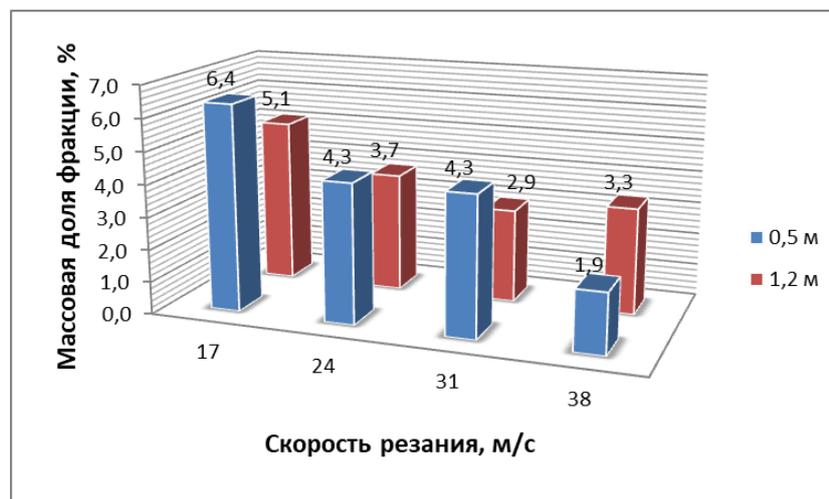


Рисунок 5. Массовая доля крупной фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 30 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 5. The mass content of oversized chips (the residue on a sieve with holes 30 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

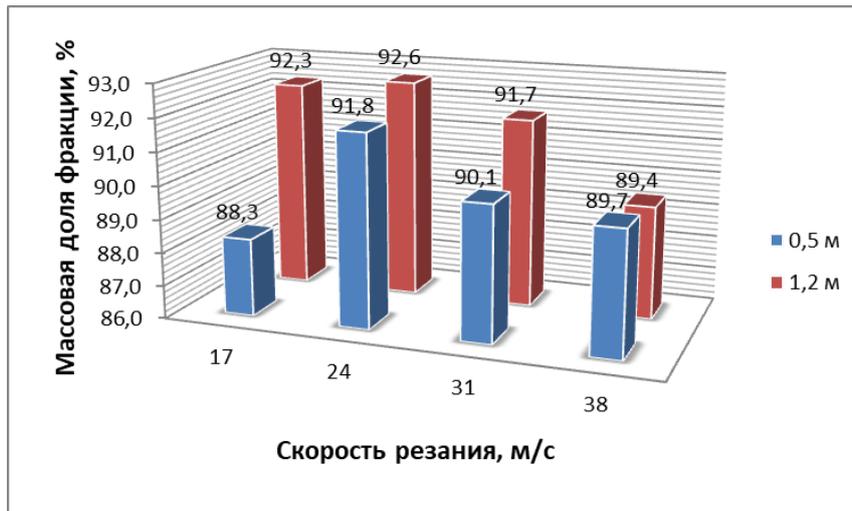


Рисунок 6. Массовая доля кондиционной фракции (сумма остатков на ситах с отверстиями диаметром 20 и 10 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 6. The mass content of the accepted fraction (the sum of residues on sieves with holes 20 and 10 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

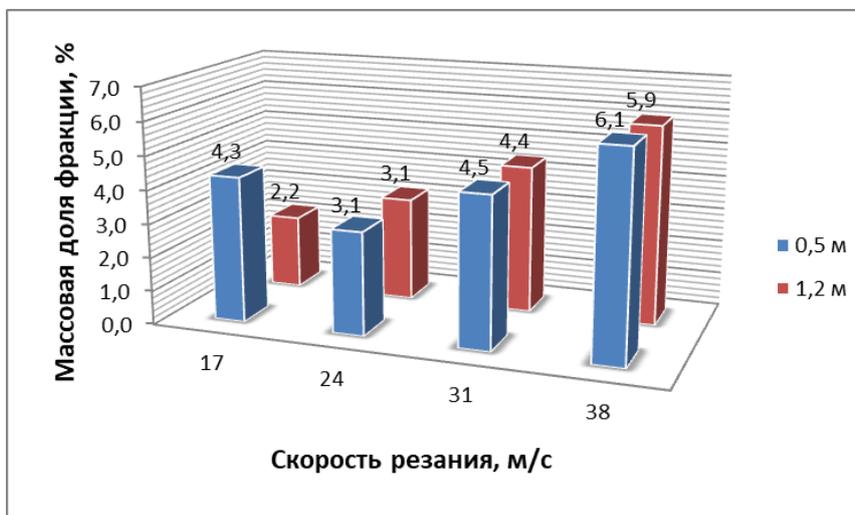


Рисунок 7. Массовая доля мелкой фракции (остаток на сите с отверстиями диаметром 5 мм) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы.

Figure 7. The mass content of the pine chips (the residue on the sieve with holes 5 mm in diameter), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used.

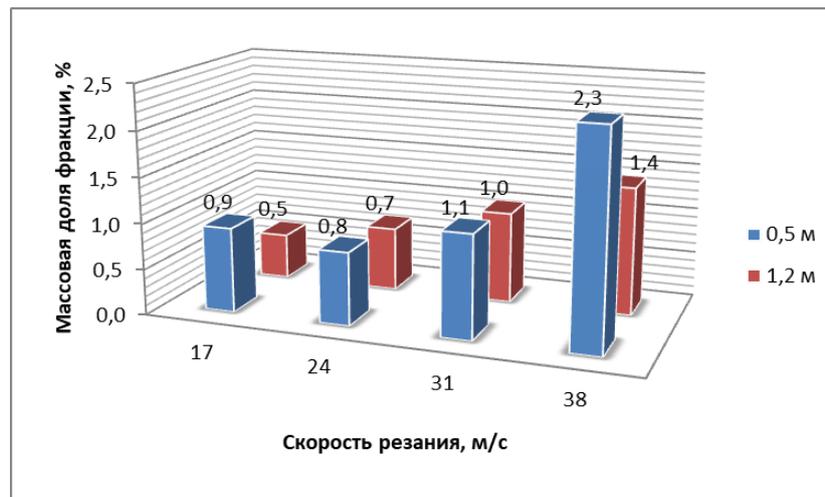


Рисунок 8. Массовая доля отсева (остаток на поддоне анализатора) в зависимости от скорости резания и длины измельчаемого баланса при горизонтальном выбросе щепы

Figure 8. The mass content of fines (the remainder on the analyzer tray), depending on the cutting speed and the length of the cut pulpwood when horizontal evacuation of chip is used

Влияние длины измельчаемого отрезка бревна на долю кондиционной фракции в производимой щепе при горизонтальном выбросе (см. рисунок 6) в большей степени проявилось при скорости резания 17 м/с. В этом случае использование отрезков длиной 1,2 м позволяет получить на 4 % больше кондиционной фракции, чем использование отрезков длиной 0,5 м. Здесь тоже уместно говорить о совместном влиянии двух факторов. Однако отличие состоит в том, что при этой скорости взаимодействия ножа с измельчаемым отрезком происходит изменение ориентации последнего в загрузочном патроне. Следствием этого является образование большого количества крупной и, особенно, мелкой фракций (см. рисунок 7), а также отсева (см. рисунок 8) при измельчении короткого отрезка, значительно разрушенного при окорке в барабане, как говорилось ранее.

В целом, результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что длина перерабатываемого баланса оказывает влияние на фракционный состав щепы при верхнем и нижнем способах выброса щепы. Уменьшение длины баланса в исследованном диапазоне скоростей резания приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе. Это может быть вызвано тем, что, как было отмечено по результатам теоретического исследования, доля древесины концов балансов с уменьшением их длины растёт. Теоретическое исследование проблемы [2] и представленные выше результаты, полученные на экспериментальной установке (см. рисунки 1—8), показали, что в начале рубки балансов и в конце образуется наибольшее количество некондиционных фракций. На это накладывается ещё расслоение древесины на концах коротких отрезков, вызванное

разрушающими нагрузками, возникающими при очистке от коры в корообдирочном барабане [1].

3.2. Результаты промышленного эксперимента

Цель данной части исследования: получить дополнительные данные о влиянии длины измельчаемого отрезка бревна на фракционный состав щепы в условиях производственного эксперимента. Подготовленные к измельчению отрезки брёвен были распределены на группы по критерию доли короткомеров в общем массиве балансов, подаваемых в рубительную машину. Таким образом, было сформировано пять групп: «40» — содержание короткомеров от 38 до 42 %; «45» — содержание короткомеров от 43 до 47 %; «50» — содержание короткомеров от 48 до 52 %; «55» — содержание короткомеров от 53 до 57 %; «60» — содержание короткомеров от 58 до 68 %.

При проведении анализов качества щепы фиксировалось содержание в ней коры и гнили. Результаты показали, что во время проведения эксперимента массовые доли коры и гнили в щепе не превышали 0,2 и 0,5 % соответственно.

Поскольку пробы щепы для определения фракционного состава отбирались круглосуточно (с интервалом 6—9 ч), то на первом этапе полученные данные были проанализированы на предмет корреляции между временем отбора и фракционным составом. Это было сделано ввиду того, что дважды в сутки производится замена ножей рубительной машины. Необходимо было установить, влияло ли в ходе проведённого исследования техническое состояние ножей рубительной машины на фракционный состав щепы. Анализ результатов показал отсутствие значимого влияния времени отбора проб на фракционный состав щепы. Это означает, что замена ножей рубительной машины осуществлялась своевременно. При несвоевременной замене имело бы место периодическое снижение качества щепы на отрезке времени, который предшествовал замене ножей.

Таким образом, исключив фактор влияния технического состояния ножей рубительной машины на качество получаемой щепы, приступили к решению второй задачи исследования. На этом этапе полученные результаты фракционного состава анализировались на предмет выявления корреляции между долей короткомеров в потоке сырья и массовой долей различных фракций в щепе.

Средние значения по группам результатов обработки фракционных анализов щепы, полученных в ходе экспериментального исследования, представлены на рисунках 9—12. Все графики демонстрируют наличие определённой зависимости между содержанием в измельчаемом сырье короткомеров и фракционным составом щепы. При этом доля кондиционной фракции с увеличением содержания в сырье короткомеров уменьшается, а доли крупной и мелких фракций растут. Результаты обработки полученных данных, отражённые на рисунках 9—12, удовлетворительно аппроксимируются с помощью линейных зависимостей.

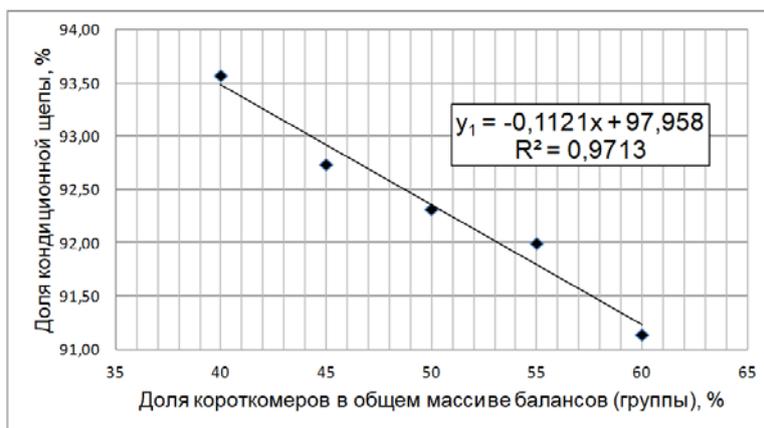


Рисунок 9. Доля (средние значения для групп) кондиционной (y_1) фракции в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 9. The proportion (average values for groups) of a accept chips (y_1), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

Подставив в уравнение $y_2 = 0,036x + 1,3749$ (рисунок 10) предельно допустимое по ГОСТ значение доли крупной некондиционной щепы $y_2 = 3$ %, получим максимально допустимую для получения щепы марки Ц1 долю короткомеров в общем массиве балансов $x = 45$ %.

Значение массовой доли кондиционной фракции в щепе колебалось от 87,8 до 97,8 % для всех отобранных в ходе исследования проб. Оба экстремальных значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров. При сравнении средних групповых значений установлено, что при увеличении доли короткомеров в общем массиве балансов с 40 до 60 % массовая доля нормальной фракции в щепе снижается на 2,5 %.

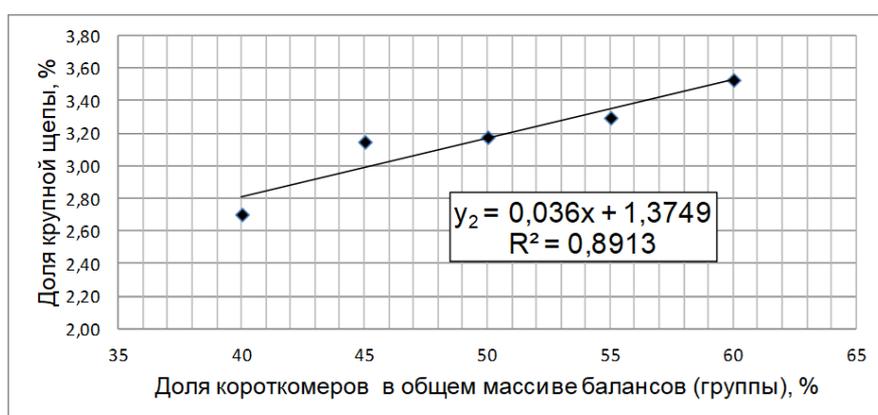


Рисунок 10. Доля (средние значения для групп) крупной фракции (y_2) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 10. The proportion (average values for groups) of oversized chips (y_2), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

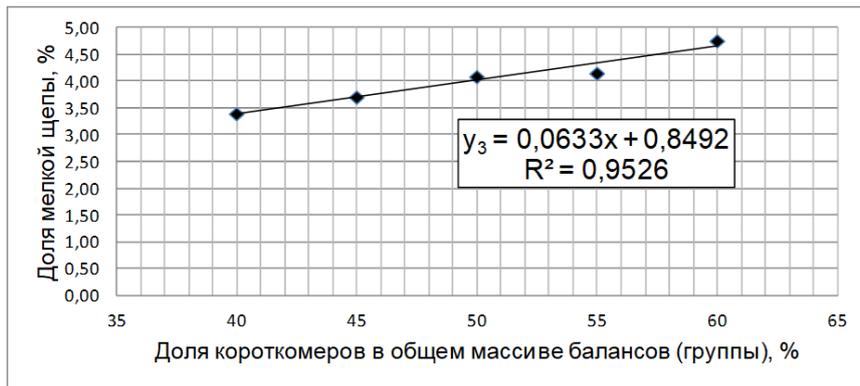


Рисунок 11. Доля (средние значения для групп) мелкой фракции (y_3) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 11. The proportion (average values for groups) of a pin chips (y_3), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

Среднее значение массовой доли крупной фракции в щепе по проведённым замерам составило 3,2 %. При этом экстремальные значения были выявлены в группе «50» по содержанию короткомеров, они составили 1,1 и 6,9 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли крупной фракции в щепе на 0,8 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

Среднее значение массовой доли мелкой фракции в щепе при исследовании диапазона доли короткомеров в сырье от 40 до 60 % составило 4,1 %. Экстремальные значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров, они составили 0,5 и 6,4 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли мелкой фракции в щепе на 1,4 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

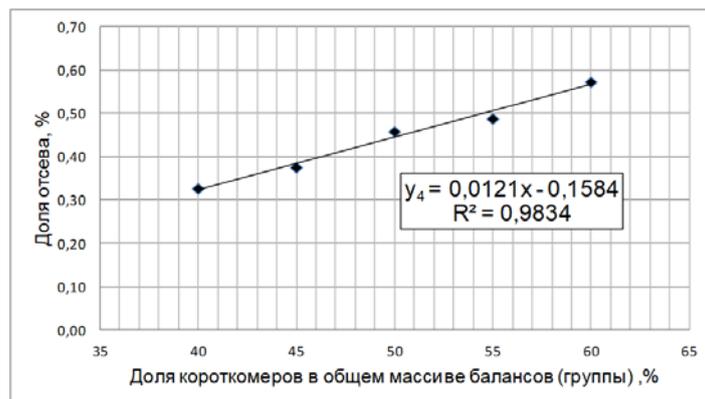


Рисунок 12. Доля (средние значения для групп) отсева (y_4) в зависимости от доли короткомеров (x) в сырье

Figure 12. The proportion (average values for groups) of a fines (y_4), depending on the proportion of short sections of logs (x) in the raw material

При доле короткомеров в сырье в диапазоне от 40 до 60 % среднее значение массовой доли отсева в щепе составило 0,5 %. Экстремальные значения были выявлены в группе «55» по содержанию короткомеров, они составили 0,2 и 1,0 %. Сравнение средних групповых значений показывает рост массовой доли отсева в щепе на 0,3 % при увеличении содержания короткомеров в сырье от 40 до 60 %.

4. Обобщение результатов экспериментов

Ранее уже было отмечено влияние на фракционный состав щепы механических повреждений древесины, как одной из характеристик сырья. Неоднократно подтверждённый опытом эксплуатации анализ этой проблемы показал, что торцы балансов разрушаются под воздействием ударных нагрузок в корообдирочном барабане. Происходит так называемое их «размочаливание». Чем меньше длина перерабатываемого баланса, тем, соответственно, меньше и длина неповреждённой части, а с увеличением длины баланса возрастает длина его неповреждённой средней части. Ранее проведёнными исследованиями установлено, что повреждения при сжатии вдоль волокон распространяются от торцов на длину, примерно равную диаметру баланса [5]. Указанные повреждения приводят к увеличению доли мелких фракций при измельчении торцевых частей балансов в рубительной машине. Стоит отметить, что методика количественной оценки повреждений в виде «размочаливания» торцов, как одного из типов механических повреждений, в настоящее время в известной нам литературе не представлена. Необходимость разработки такой методики объясняется тем, что видимые и скрытые повреждения древесины в процессе её переработки в щепу, как показано в работе [6], оказывают существенное влияние на качество целлюлозы. Вопросы количественной оценки влияния «размочаливания» торцов балансов при их очистке от коры в корообдирочных барабанах, частично затронутые в работах [5], [7], требуют отдельного рассмотрения, выходящего за рамки данной статьи.

Полученные в ходе проведённого исследования результаты косвенным образом подтверждают тот факт, что при групповой очистке от коры в корообдирочном барабане короткомеры подвергаются более сильным механическим повреждениям. Поэтому при производстве щепы провоцируют образование повышенной массовой доли мелкой фракции и отсева. Рост доли крупной фракции подтверждает предположение о том, что короткомеры не всегда правильно ориентируются в зоне измельчения [2]. Рассчитанный на подачу к ножевому диску балансов длиной не менее 0,8 м загрузочный патрон не в состоянии правильно удерживать короткомеры при подаче. Поэтому реалистичной представляется следующая ситуация. Под механическим действием ножей рубительной машины короткомер, имея шесть степеней свободы угловых и линейных перемещений, занимает случайное положение вблизи ножевого диска рубительной машины и вместо поперечно-торцевого резания могут иметь место два других вида измельчения.

Во-первых, скалывание вдоль волокон, когда продольная ось короткомера почти вертикальна и параллельна плоскости ножевого диска. Во-вторых, поперечное резание,

но такое, при котором продольная ось короткомера почти горизонтальна и параллельна плоскости ножевого диска. Нельзя исключать всех промежуточных вариантов измельчения древесины. В итоге в результате измельчения могут появляться частицы некондиционных размеров и формы (фото 7). В частности, это вызывает рост доли крупной фракции в щепе при возрастании доли короткомеров в сырье, подаваемом в рубительную машину. Экспериментально было установлено, что угол среза может составлять 12° , что выходит за интервал $30\text{—}60^\circ$, рекомендуемый п. 2.3 ГОСТ 15815-83.

Полученные результаты подтверждают правомерность сделанных ранее предложений о необходимости уменьшения доли короткомеров в общем потоке балансов, поступающих на измельчение в рубительную машину [2]. Полностью исключить появление короткомеров в загрузочном устройстве рубительной машины не представляется возможным при использовании существующего оборудования и принятой технологии. Объясняется это тем, что длина даже стандартного баланса (1,2 м) уменьшается в процессе измельчения в рубительной машине. Тем самым в загрузочном устройстве (патроне) образуется короткомер, зафиксировать который в технологически правильном положении не позволяет конструктивное решение существующей рубительной машины. С целью решения этой проблемы предложен ряд технических подходов [8], [9]. Однако проблема, в целом, остаётся актуальной и требует продолжения исследований.

Поскольку полностью исключить образование короткомеров в загрузочном устройстве рубительной машины в настоящее время технически невозможно, то представляется целесообразным уменьшить или полностью исключить появление короткомеров в общем потоке балансов до их загрузки в рубительную машину.



Фото 7. Крупная фракция щепы. Частица щепы с углом среза 12° , получившаяся из короткомера (выделена)

Photo 7. Oversized chips. A chip particle with a cut-off angle of 12° , obtained from a short section of log (highlighted)

Для исключения появления короткомеров возможны три подхода:

- применение предварительного сортирования брёвен по длине с учётом расстояния между пилами перед распиловкой на слешере (см. фото 1 и 2);
- изменение количества и (или) расположения пил на слешере;
- применение такой схемы расположения пил на слешере, когда обеспечивается получение остатка длиной не менее выпиленных балансов.

Каждый из этих подходов позволит снизить потери не только при производстве щепы в рубительной машине, но и при раскросе брёвен перед подачей в древесно-подготовительный цех (в частности, уменьшится объём опилок).

Перспективы исследования могут быть связаны с использованием устройств анализа изображений непрерывного измерения для определения длины и формы частиц измельчённой древесины с учётом известного опыта применения таких устройств [10]. Кроме того, целесообразно учитывать новые результаты исследований, относящиеся к теме представленного исследования [11—16].

Выводы

С учётом изложенного выше материала исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования на экспериментальном стенде позволяют сделать вывод о том, что длина перерабатываемого отрезка бревна оказывает влияние на фракционный состав щепы при верхнем и нижнем способах выброса щепы.

2. Уменьшение длины баланса в исследованном диапазоне скоростей резания (17—38 м/с) приводит к снижению доли кондиционной фракции в щепе.

3. Установлена зависимость между долей короткомеров в массиве сырья, подаваемого в рубительную машину, и фракционным составом вырабатываемой щепы. Зависимости массовых долей различных фракций щепы с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейными выражениями.

4. Результаты экспериментального исследования фракционного состава щепы, полученной из отрезков брёвен длиной от 0,10 до 0,8 м, показали, что уменьшение доли короткомеров в общем объёме балансов от 68 до 38 % ведёт к увеличению выхода кондиционной фракции в технологической щепе на 2,5 %, а также к уменьшению долей крупной фракции на 0,8 % и мелкой — на 1,7 %.

5. По результатам производственных экспериментов получена зависимость следующего вида: $y_2 = 0,036x + 1,3749$, позволившая установить предельно допустимую долю короткомеров $x = 45\%$ при массовой доле крупной щепы $y_2 = 3\%$. Таким образом, получение щепы, отвечающей по фракционному составу требованиям к щепе марки Ц1 по ГОСТ 15815-83 возможно в рубительной машине с ножевым диском диаметром 2500 мм, если в подаваемом на измельчение потоке балансов доля отрезков длиной не более 0,8 м не превышает 45 %.

Список литературы

1. *Девятникова Л. А., Васильев С. Б., Колесников Г. Н.* Влияние технологии раскря балансов на фракционный состав щепы // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. № 3. С. 120—124.
2. *Васильев С. Б., Девятникова Л. А., Колесников Г. Н.* Влияние изменения длины баланса, измельчаемого в дисковой рубительной машине, на размеры частиц древесной щепы // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). Краснодар: КубГАУ, 2012. № 07 (81). Текст: электронный.
3. *Vjurulf A.* Chip Geometry. Methods to impact the geometry of market chips // Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2006. 43 p. URL: http://diss-epsilon.slu.se/archive/00001251/01/Chip_geometry.pdf. Text. Image: electronic.
4. ГОСТ 15815-83. Щепа технологическая. Технические условия. Введ. 24.08.83. М.: Изд-во стандартов, 1992. 11 с.
5. *Девятникова Л. А.* Комплекс задач по совершенствованию технологии и оборудования древесно-подготовительного цикла для производства целлюлозы // Леса России в XXI веке: Материалы Пятой междунар. научно-практич. Интернет-конф. СПб.: ЛТА, 2010. С. 151—158.
6. *Вальщиков Н. М., Лицман Э. П.* Рубительные машины: [монография]. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 96 с.
7. *Никонова Ю. В.* Обоснование конструктивно-технологических параметров корообдирочных барабанов с применением численного моделирования динамического взаимодействия балансов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Спец.: 05.21.01, 05.13.18. Петрозаводск, 2009. 20 с.
8. *Рубцов Ю. В., Коннова Г. В., Рудько С. В.* Технология переработки низкокачественной древесины на щепу рубительными машинами в США и России // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. Т. 1, № 8. С. 108—114.
9. *Twaddle A. A., Watson W. F.* Shortwood vs. longwood chipping what impact on chip distribution // Tappi Journal. June, 1992. P. 107—111.
10. *Kuptz D., Hartmann H.* Evaluation of Fuel Quality, Throughput Rate and Energy Consumption During Non-Industrial Wood Chip Production with Three PTO Driven Chippers // Croatian Journal of Forest Engineering: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva. 2022. Vol. 43, no. 1. P. 109—122. URL: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1191>. Text. Image: electronic.
11. Reduction in Operating Costs and Environmental Impact Consisting in the Modernization of the Low-Power Cylindrical Wood Chipper Power Unit by Using Alternative Fuel / Ł. Warguła, M. Kukla, P. Krawiec, B. Wiczorek // Energies. 2020. 13. 2995. URL: <https://doi.org/10.3390/en13112995>. Text. Image: electronic.
12. Sustainability Assessment of Alternative Strip Clear Cutting Operations for Wood Chip Production in Renaturalization Management of Pine Stands / J. Schweier, B. Blagojević, R. Venanzi, F. Latterini, R. Picchio // Energies. 2019. 12. 3306. URL: <https://doi.org/10.3390/en12173306>. Text. Image: electronic.
13. Classification of Wood Chips Using Electrical Impedance Spectroscopy and Machine Learning / M. Tiitta, V. Tiitta, J. Heikkinen, R. Lappalainen, L. Tomppo // Sensors. 2020. 20. 1076. URL: <https://doi.org/10.3390/s20041076>. Text. Image: electronic.
14. Effect of Thermal Treatment of Birch Wood by Saturated Water Vapor on Granulometric Composition of Chips from Sawing and Milling Processes from the Point of View of Its

Processing to Composites / R. Kminiak, K. A. Orłowski, L. Dzurenda, D. Chuchala, A. Banski // Appl. Sci. 2020. 10. 7545. URL: <https://doi.org/10.3390/app10217545>. Text. Image: electronic.

15. Impact of Number of Operators and Distance to Branch Piles on Woodchipper Operation / Ł. Warguła, M. Kukła, P. Krawiec, B. Wiczorek // Forests. 2020. 11. 598. URL: <https://doi.org/10.3390/f11050598>. Text. Image: electronic.
16. Rojcewicz K., Oksiuta Z. A Vertical Fountain Dryer Adjusted for Sawdust and Wood Chips Drying // Processes. 2023. 11. 430. URL: <https://doi.org/10.3390/pr11020430>. Text. Image: electronic.

References

1. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Pulp wood re-sawing process influence on wood chip quality. *Forestry Bulletin*. Moscow, MGUL Publishing House, 2012, no. 3, pp. 120—124. (In Russ.)
2. Devyatnikova L. A., Vasilyev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of pulp logs length on the size distribution of wooden chips manufactured by disk chipper. *Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (KubGAU Scientific Journal)*. Krasnodar, KubGAU, 2012, no. 07 (81). (In Russ.)
3. Bjurulf A. Chip Geometry. *Methods to impact the geometry of market chips. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences*. Uppsala, 2006. 43 p. Available at: http://diss-epsilon.slu.se/archive/00001251/01/Chip_geometry.pdf. Text. Image: electronic.
4. GOST 15815-83. Technological chips. Technical conditions. Introduction. 24.08.83. Moscow, Publishing House of Standards, 1992. 11 p. (In Russ.)
5. Devyatnikova L. A. A set of tasks for improving the technology and equipment of the wood-preparatory cycle for pulp production. *Forests of Russia in the XXI century: Materials of the fifth international scientific and practical Internet conference*. St. Petersburg, LTA, 2010, pp. 151—158. (In Russ.)
6. Valshchikov N. M., Litsman E. P. *Chippers: [monograph]*. Moscow, Forest industry, 1980. 96 p. (In Russ.)
7. Nikonova Yu. V. *Substantiation of structural and technological parameters of debarking drums using numerical simulation of dynamic interaction of balances: Abstract. dis. ... candidate of Technical Sciences, spec. 05.21.01, 05.13.18*. Petrozavodsk, 2009. 20 p. (In Russ.)
8. Rubtsov Yu. V., Kononova G. V., Rudko S. V. Technology of processing low-quality wood into chips by chopping machines in the USA and Russia. *Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*, 2011, vol. 1, no. 8, pp. 108—114. (In Russ.)
9. Twaddle A. A., Watson W. F. Shortwood vs. longwood chipping what impact on chip distribution. *Tappi Journal*. June, 1992, pp. 107—111.
10. Kuptz D., Hartmann H. Evaluation of Fuel Quality, Throughput Rate and Energy Consumption During Non-Industrial Wood Chip Production with Three PTO Driven Chippers. *Croatian Journal of Forest Engineering: Časopis za teoriju i praksu šumarskoga inženjerstva*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 109—122. Available at: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1191> Text. Image: electronic.
11. Warguła Ł., Kukła M., Krawiec P., Wiczorek B. Reduction in Operating Costs and Environmental Impact Consisting in the Modernization of the Low-Power Cylindrical Wood Chipper Power Unit by Using Alternative Fuel. *Energies*, 2020, 13, 2995. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13112995>. Text. Image: electronic.
12. Schweier J., Blagojević B., Venanzi R., Latterini F., Picchio R. Sustainability Assessment of Alternative Strip Clear Cutting Operations for Wood Chip Production in Renaturalization

- Management of Pine Stands. *Energies*, 2019, 12, 3306. Available at: <https://doi.org/10.3390/en12173306>. Text. Image: electronic.
13. Tiitta M., Tiitta V., Heikkinen J., Lappalainen R., Tomppo L. Classification of Wood Chips Using Electrical Impedance Spectroscopy and Machine Learning. *Sensors*, 2020, 20, 1076. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20041076>. Text. Image: electronic.
 14. Kminiak R., Orłowski K. A., Dzurenda L., Chuchala D., Banski A. Effect of Thermal Treatment of Birch Wood by Saturated Water Vapor on Granulometric Composition of Chips from Sawing and Milling Processes from the Point of View of Its Processing to Composites. *Appl. Sci.*, 2020, 10, 7545. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10217545>. Text. Image: electronic.
 15. Warguła Ł., Kukla M., Krawiec P., Wieczorek B. Impact of Number of Operators and Distance to Branch Piles on Woodchipper Operation. *Forests*, 2020, 11, 598. Available at: <https://doi.org/10.3390/f11050598>. Text. Image: electronic.
 16. Rojcewicz K., Oksiuta Z. A Vertical Fountain Dryer Adjusted for Sawdust and Wood Chips Drying. *Processes*, 2023, 11, 430. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr11020430>. Text. Image: electronic.