

УДК 519.876.5

Статья

Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане

Сергей Б. Васильев *, Наталья А. Доспехова и Геннадий Н. Колесников

Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, 33, 185910 Петрозаводск, Россия; Email: dospeh@petsu.ru (Н.А.Д.); kgn@petsu.ru (Г.Н.К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; Email: servas@psu.karelia.ru
Тел.: +7(814-2) 571939; Fax: +7(814-2) 711000

Получена: 03 июня 2013 / Принята: 09 июля 2013 / Опубликована: 11 июля 2013

Аннотация: Характер и интенсивность взаимодействия балансов при их соударениях в корообдирочном барабане определяют эффективность процесса окорки. Этот сложный процесс мало изучен, что не позволяет обосновывать технологические решения, направленные на повышение качества очистки балансов от коры. В статье рассмотрена модель, позволяющая учитывать влияние диаметра балансов на силу их соударения в корообдирочном барабане. Цель работы: определение наибольших значений сил контактного взаимодействия при соударениях балансов неодинакового диаметра. Для определения данных сил использовано численное моделирование. В качестве исходных данных использованы результаты экспериментальных исследований жесткости еловых балансов. Приведены результаты ситуационных исследований процесса соударений балансов, диаметром 0,12 м (масса 9 кг) и 0,20 м (масса 31 кг), имеющих одну и ту же длину (1,2 м). Результаты исследований показали, что с уменьшением диаметра балансов возрастает частота соударений, но уменьшаются максимальные значения сил при соударениях.

Ключевые слова: балансы; окорка групповая; барабан корообдирочный; соударения; моделирование; силы контактные; закономерности изменения сил

Article

Simulation of Unequal Diameter Spruce Pulpwood Interaction in Debarking Drum

Sergey B. Vasilyev^{*}, Natalya A. Dospheva and Gennady N. Kolesnikov

Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; Email: dospeh@petsu.ru (N.A.D.); kgn@petsu.ru (G.N.K.)

* Author to whom correspondence should be addressed; Email: servas@psu.karelia.ru; Tel.: +7(814-2) 571939; Fax: +7(814-2) 711000.

Received: 03 June 2013/ Accepted: 09 July 2013/ Published: 11 July 2013

Abstract: Interaction type and intensity are the main factors that influence the efficiency of pulpwood debarking in debarking drum. This technological process is a scantily known complex subject. That is why new decisions on improvement of pulpwood debarking process have met difficulties. The article deals with computer simulation, which explains the pulpwood diameter (mass) effect on its collision characteristics in debarking process by means of drum. Work goal: the determination of maximum interaction force at collisions of pulpwood of unequal diameter (or mass). Earlier offered mathematical simulation for numerical determination of this force is applied. The experimental data for spruce pulpwood stiffness were used as initial data for calculation. A simulation application has been demonstrated by six case-studies. In all of them pulpwood 1.2 m length was taken into account. Two different diameters of spruce pulpwood (0.12 m with a mass of 9 kg and 0.20 m with a mass of 31 kg) were used to reconstruct pulpwood collisions in the numerical experiment. As a result of the work, it was established that pulpwood diameter decrease leads to the increase of collisions number in the unit of time. The forces of contact interaction reach maximum more quickly. However, the maximum of pulpwood collisions force is decreased in the considered cases.

Keywords: pulpwood; debarking drum; collisions; simulation; contact forces; patterns of impact forces evolution

1. Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития лесопромышленного комплекса России является совершенствование технологий глубокой переработки древесины. К данному направлению относятся задачи совершенствования технологических операций переработки балансов на стадии древесно-подготовительного цикла целлюлозно-бумажных комбинатов. Необходимым технологическим звеном данного цикла является очистка круглых лесоматериалов от коры. Качество окорки, а также соответствующие затраты времени и энергии существенно влияют на конкурентоспособность конечной продукции целлюлозно-бумажного комбината. Большие объемы перерабатываемой балансовой древесины и новые требования к ресурсосбережению предопределяют актуальность задач по совершенствованию технологии очистки балансов от коры [1].

Совершенствованию технологии очистки балансов в корообдирочных барабанах посвящен ряд работ [1–25]. Эта технология развивается параллельно с роторной окоркой [6] и другими технологиями [10]. Однако остаются недостаточно изученными закономерности соударений балансов друг с другом и с корпусом корообдирочного барабана. В данной статье в развитии ранее выполненных работ [3–5], исследуются закономерности соударений балансов в корообдирочном барабане. Рассмотрим кратко проблему данного исследования.

В корообдирочный барабан загружают неокоренные балансы. При вращении барабана балансы соударяются друг с другом и с корпусом барабана. Как результат, кора разрушается и отделяется от баланса. Проблема исследования данного технологического процесса заключается в следующем. Если сила соударений избыточно велика, то разрушается не только кора, но и древесина под корой, а также повреждаются торцы балансов [16]. Если уменьшить силу соударений, то увеличится продолжительность очистки и (или) уменьшится степень очистки балансов. Очевидно, величина силы соударений балансов должна находиться в определенном интервале значений. Строгое выполнение этого условия практически недостижимо. Однако для определенного вида балансов можно подобрать такие значения степени заполнения барабана и скорости его вращения, которые обеспечат наилучшее соответствие данному условию. Таким образом, необходима методика прогнозирования сил контактного взаимодействия при соударениях балансов в корообдирочном барабане.

Возможности экспериментальных исследований процесса соударений балансов в корообдирочном барабане ограничены. Поэтому для определения силы соударений целесообразно использовать методы математического моделирования. Известные модели [1,11] позволили уточнить некоторые закономерности рассматриваемой технологии в целях совершенствования корообдирочных барабанов [13]. В статье [4] рассмотрено применение методики [12] численного моделирования соударений балансов одного и того же диаметра в корообдирочном барабане с целью снижения потерь балансовой древесины, связанных с деформацией частиц щепы вдоль поврежденных волокон в рубительной машине.

Исследовано влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений тех же балансов [5]. Однако остаётся неизученной задача о соударениях балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане.

В данной работе рассматривается частный случай движения и деформирования балансов с использованием модели центрального удара. Выбор этой модели обосновывается тем, что основная задача работы формулируется как определение максимумов сил контактного взаимодействия балансов. Решение данной задачи может быть использовано на практике, чтобы уменьшить потери древесины и способствовать оптимизации технологического процесса по критериям затрат ресурсов и качества продукции.

Цель данной работы: исследование сил контактного взаимодействия балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане. Конкретная задача исследования формулируется как определение верхних оценок сил контактного взаимодействия при указанных выше соударениях балансов.

2. Материалы и методы

Обоснование объекта исследования в виде условного штабеля балансов приведено в работе [8]. Форма баланса моделируется прямым круговым цилиндром. Диаметры балансов (d_i и d_k) и массы (M_i и M_k) могут быть неодинаковыми (Рис. 1). Предполагается, что траектория движения каждого баланса состоит из участков контактного (с соударениями) и бесконтактного движения. Соударения рассматриваются с применением модели центрального удара. Деформации баланса при ударе существенно меньше его диаметра. Деформации линейно зависят от жесткости S_i . При соударениях тела без взаимопроникновения контактируют друг с другом. Величина зазора D_j и сила контактного взаимодействия N_j связаны соотношением $D_j N_j = 0$, где $D_j \geq 0$; $N_j \geq 0$. Данное соотношение моделирует то свойство физической модели, что в любой момент времени одна из переменных (зазор или сила) обязательно равна нулю. Диссипация энергии в материале баланса при соударениях определяется значениями Λ_i и Λ_k (см. Рис. 1). Предполагается, что в фазе бесконтактного движения $\Lambda_i = \Lambda_k = 0$. Изменениями массы балансов в процессе очистки от коры пренебрегаем.

Математическое описание физической модели выполнено с применением численных методов механики контактного взаимодействия [2,23] и опубликовано в работах [3,8]. Рассматривается соударение балансов поперек волокон. Теоретическое определение жесткости балансов с учетом анизотропии и неоднородности механических свойств древесины является сложной задачей, которая может быть предметом отдельного исследования. Поэтому в данной работе жесткость балансов определяется с использованием известных экспериментальных данных о жесткости еловых балансов при сжатии поперек волокон [8,9]. Модель, алгоритм вычислений и примеры решения задач о соударениях рассмотрены в статьях [4,5,12]. Данная модель не исключает возможности соударений

балансов неодинакового диаметра. Однако по причине относительной новизны модели эта возможность не исследовалась в указанных выше работах.

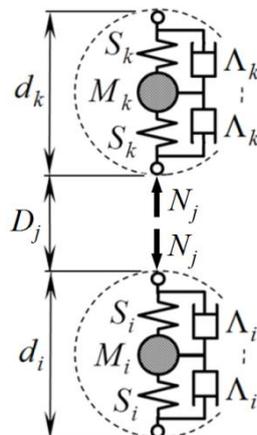


Рисунок 1. Модель соударяющихся тел.

С увеличением возраста дерева возрастают до определённого предела диаметр ствола и модули упругости древесины как анизотропного материала. Если игнорировать влияние возраста дерева на величину модуля упругости материала баланса, то можно считать, что поперечная жесткость каждого баланса S_i , S_k (см. Рис. 1) не зависит от его диаметра. Экспериментальное и теоретическое обоснование этого утверждения приведено в статье [9]. Однако от плотности материала ρ , диаметра d_i и длины L_i зависит масса баланса:

$$M_i = \rho \frac{\pi d_i^2}{4} L_i. \quad (1)$$

Далее предполагается, что все балансы имеют одну и ту же длину $L_i = L = 1,2$ м. Плотность также принята постоянной для всех балансов. Тогда масса баланса M_i зависит только от диаметра d_i . Поэтому можно считать, что в данной работе исследуется влияние массы и диаметра балансов на их соударения в корообдирочном барабане. Появляющаяся в этой связи задача о соударениях многих тел достаточно сложна [2,24]. Опираясь на законы физики, можно прогнозировать, что с уменьшением диаметра d_i (массы M_i) балансов и с увеличением жесткости S_i количество соударений в единицу времени будет возрастать. С точки зрения динамики обобщенной характеристикой влияния массы и жесткости является частота собственных колебаний, которая в рассматриваемом случае связана с диаметром баланса. Данная частота для механической системы с одной степенью свободы может быть определена аналитически, если считать, что упругость материала баланса играет примерно ту же роль, что и упругий элемент пружинного маятника. Частота собственных колебаний f с учетом формулы (1) определяется соотношением:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_i}{M_i}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4S_i}{\pi d_i^2}} = \frac{1}{\pi d_i} \sqrt{\frac{S_i}{\pi}} \quad (\Gamma\mathcal{U}). \quad (2)$$

Для некоторого другого диаметра d_i^* частота f^* равна

$$f^* = \frac{1}{\pi d_i^*} \sqrt{\frac{S_i}{\pi}}. \quad (3)$$

В статье [9] показано, что характеристика поперечной жесткости от диаметра баланса не зависит. Поэтому $S_i^* = S_i$. С учетом (2) и (3) определим соотношение частот f^* и f как соотношение диаметров балансов d_i^* и d_i :

$$\frac{f^*}{f} = \frac{d_i}{d_i^*}. \quad (4)$$

Соотношение (4) отражает одну из закономерностей влияния диаметра балансов на соударения балансов. Примерно такое же соотношение будет иметь место и при соударениях балансов, если принять во внимание сформулированное выше предположение о том, что с уменьшением диаметра d_i (массы M_i) балансов количество соударений в единицу времени будет возрастать. Для проверки этого предположения рассмотрим результаты моделирования соударений балансов.

3. Результаты исследований

Используя в качестве инструмента исследования указанную выше методику численного моделирования, рассмотрим результаты ситуационных исследований соударения балансов. С учетом известных данных [1] принято, что размер пятна контакта вдоль продольной оси баланса равен 0,05 м. Программа ситуационных исследований представлена в Табл. 1. Адекватность методики исследуется на двух нижеследующих задачах, физически прозрачных вследствие своей элементарности.

Таблица 1. Характеристики модельных технологических ситуаций

Номер исследования	Количество балансов, шт.	Масса балансов, кг	Диаметр балансов, м	Схема расположения балансов
1	1	31	0,2	Рис. 2.а
2	1	9	0,12	Рис. 2.б
3	7	31×7шт.	0,2×7 шт.	Рис. 2.в
4	7	9×7 шт.	0,12×7 шт.	Рис. 2.г
5	7	31×4 шт.+9×3 шт.	0,2×4 шт.+ 0,12×3 шт.	Рис. 2.д
6	7	9×3 шт.+31×4 шт.	0,12×3 шт.+0,2×4 шт.	Рис. 2.е

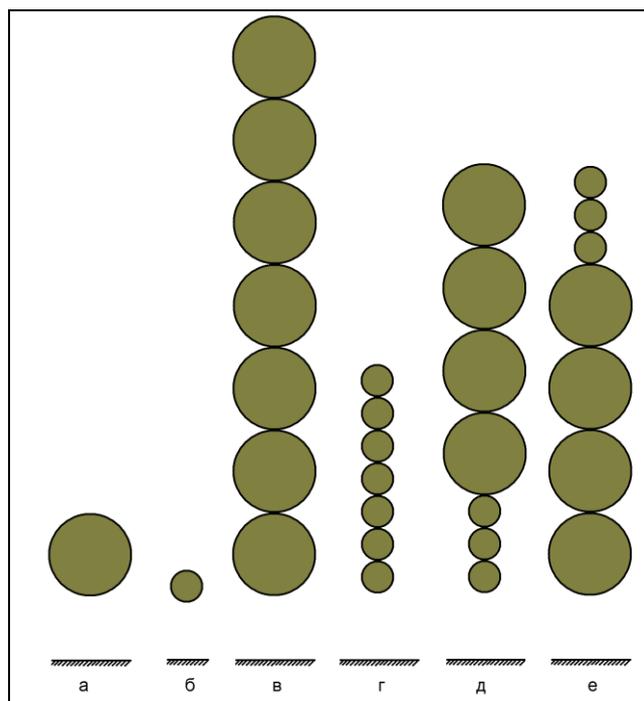


Рисунок 2. Схемы расположения балансов в моделируемых технологических ситуациях.

Исследование 1. Баланс падает с высоты 0,5 м и соударяется с нижним балансом (Рис. 2а). Теоретически, в течение некоторого времени будут иметь место повторяющиеся соударения балансов. Исходные данные: зазор $D_j=0,5$ м; $d_i=d_k=d_1=0,2$ м; $M_i=M_k=M_1=31$ кг; жесткость балансов в соответствии с [8,9] принята равной $S_i=S_k=11000$ Н/м; $\Lambda_i=\Lambda_k=0$. Выполнив вычисления с использованием комплекса программ MAPLE 16 по упомянутой выше методике [3,8] при шаге по времени 0,001 с (число шагов 10000), получим следующую картину изменения сил контактного взаимодействия в зависимости от времени (Рис. 3).

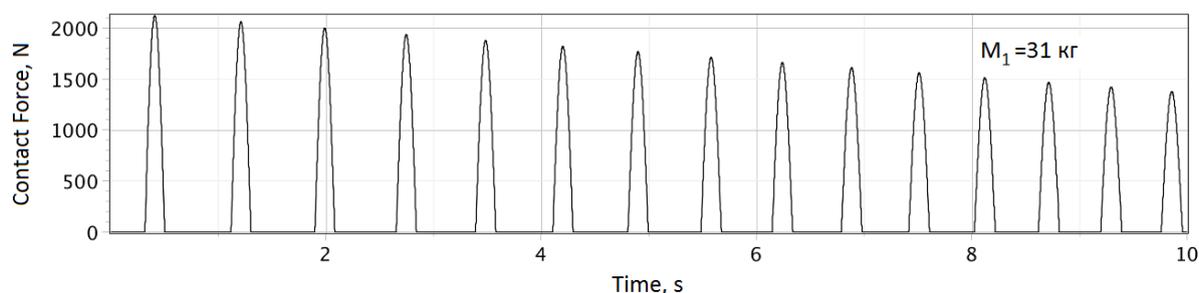


Рисунок 3. Изменение сил контактного взаимодействия, $d_1=0,2$ м.

На исследуемом интервале времени 15 локальных максимумов, причем с течением времени амплитуда уменьшается, что свидетельствует о затухании данного процесса. Так как было принято, что $\Lambda_i=\Lambda_k=0$ (диссипации энергии нет), то затухание объясняется свойством алгоритма расчета. Это свойство может рассматриваться как положительная (во всяком

случае, неотрицательная) характеристика алгоритма, поскольку увеличение амплитудных значений характеризовало бы алгоритм как неустойчивый. Заметим также, что в рассматриваемом технологическом процессе практический интерес представляют одно или два первых соударения, когда привносимое алгоритмом затухание мало влияет на результат моделирования.

Чтобы по аналогии с (4) определить влияние диаметра баланса на число соударений в единицу времени, выполним расчет при тех же исходных данных, что и в исследовании 1, но для баланса диаметром 0,12 м.

Исследование 2. Пусть нижний баланс (см. Рис. 2б) неподвижен. Верхний баланс падает с высоты 0,5 м и соударяется с нижним балансом. Теоретически, в течение некоторого времени будут иметь место повторяющиеся соударения балансов. Исходные данные: зазор $D_j=0,5$ м; $d_i=d_k=d_1=0,12$ м; $M_i=M_k=M_1=9$ кг; жесткость балансов $S_i=S_k=11000$ Н/м; $\Lambda_i=\Lambda_k=0$. Выполнив вычисления по той же методике [3,8], получим следующую картину изменения сил контактного взаимодействия в зависимости от времени (Рис. 4).

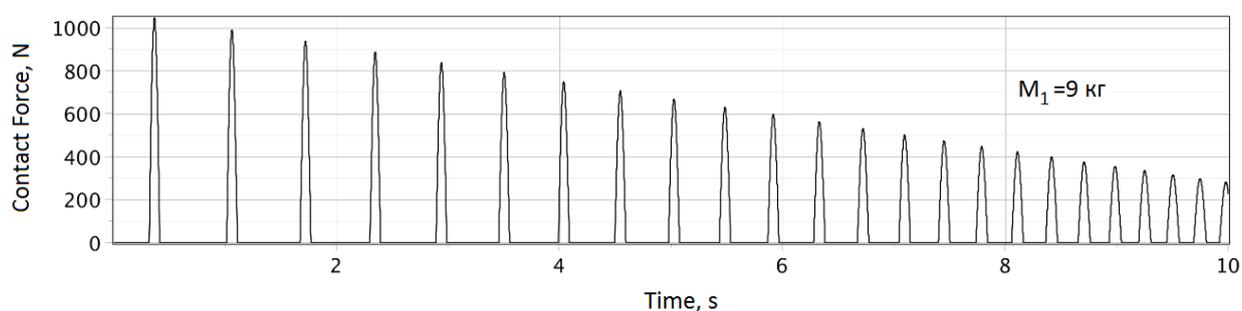


Рисунок 4. Изменение сил контактного взаимодействия, $d_1=0,12$ м.

На исследуемом интервале времени 24 локальных максимума (см. Рис. 4), что в 1,6 раза больше, чем в исследовании 1, см. Рис. 3 ($24/15=1,6$). По формуле (4) при $d_i=0,2$ м и $d_i^*=0,12$ м находим:

$$\frac{f^*}{f} = \frac{d_i}{d_i^*} = \frac{0,2}{0,12} \approx 1,7.$$

Таким образом, уменьшение диаметра баланса с 0,2 м до 0,12 м приводит к увеличению частоты собственных колебаний в 1,7 раза, что примерно соответствует отмеченному выше увеличению локальных максимумов сил контактного взаимодействия при соударениях в 1,6 раза (см. Рис. 3 и 4). Тем самым подтверждается предположение о том, что с уменьшением диаметра (массы) балансов количество соударений в единицу времени будет возрастать. Результаты исследований 1 и 2 подтверждают адекватность использованной методики моделирования, что указывает на возможность решения более сложных задач.

В нижеследующих исследованиях 3–6 рассмотрены модели обрушений и соударений балансов в четырех технологических ситуациях. С учетом известных данных [1] принято, что размер пятна контакта вдоль продольной оси баланса равен 0,05 м. Чтобы обеспечить адекватность результатов моделирования по представленной выше методике [3], шаг по времени должен быть достаточно малым. Все представленные ниже результаты получены при шаге по времени 0,000125 с. Наибольший практический интерес представляет анализ движения балансов в стадии обрушения в течение первой и, возможно, второй секунды. Однако в целях проверки адекватности и поиска перспектив развития методики моделирования, вычисления выполнены для отрезка времени 0...5 с. Соответственно, число шагов составило 40000. Вычисления выполнены с использованием комплекса программ MAPLE 16.

Исследование 3. Условный штабель семи одинаковых балансов диаметром 0,2 м и массой 31 кг соударяется с основанием, падая с высоты 0,5 м. В процессе своего формирования этот штабель вращается вместе с корообдирочным барабаном. Рассмотрим случай, представленный на Рис. 5.

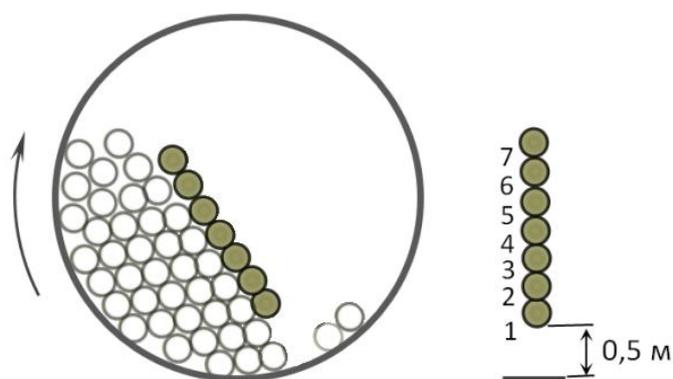


Рисунок 5. Условный штабель балансов в корообдирочном барабане.

Жесткость основания и жесткость балансов в соответствии с [8,9] принята равной 11000 Н/м. Схема условного штабеля с номерами контактов и изменение сил контактного взаимодействия балансов в зависимости от времени показаны на Рис. 6. На первой стадии, до соударения с корпусом барабана, штабель проходит расстояние 0,5 м в течение 0,32 с. С технологической точки зрения наибольший интерес представляет вторая стадия движения на отрезке времени $0,32 < t \leq 1,09$ с. На данной стадии силы контактного взаимодействия при соударениях балансов достигают локальных максимумов. Эти две стадии моделируют процесс обрушения массива балансов при вращении барабана (Рис. 5).

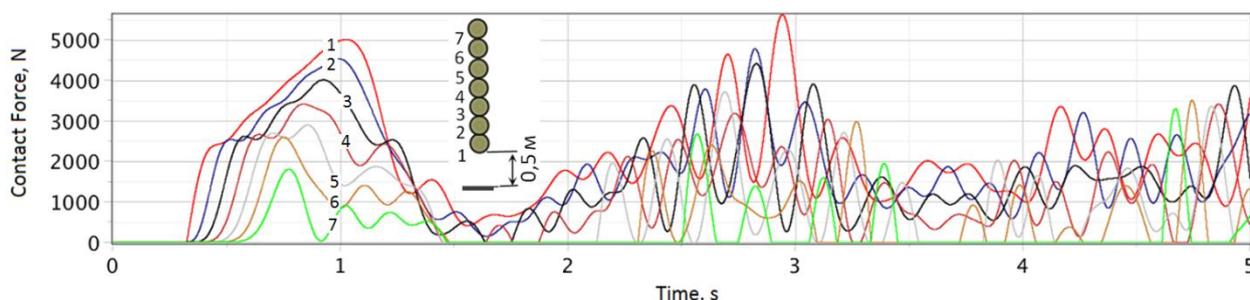


Рисунок 6. Силы соударений балансов массой 31 кг. 1...7 – номера контактов.

Исследование 4. Условный штабель одинаковых балансов диаметром 0,12 м и массой 9 кг соударяется с основанием, падая с высоты 0,5 м. Жесткость основания и жесткость балансов в соответствии с [8,9] принята равной 11000 Н/м. Изменение сил контактного взаимодействия балансов в зависимости от времени показано на Рис. 7. Результаты исследований 3 и 4 показывают, что с уменьшением массы каждого из балансов с 31 до 9 кг возрастает число соударений в единицу времени, силы контактного взаимодействия быстрее достигают максимумов, но максимальные значения сил уменьшаются с 5625 до 1707 Н.

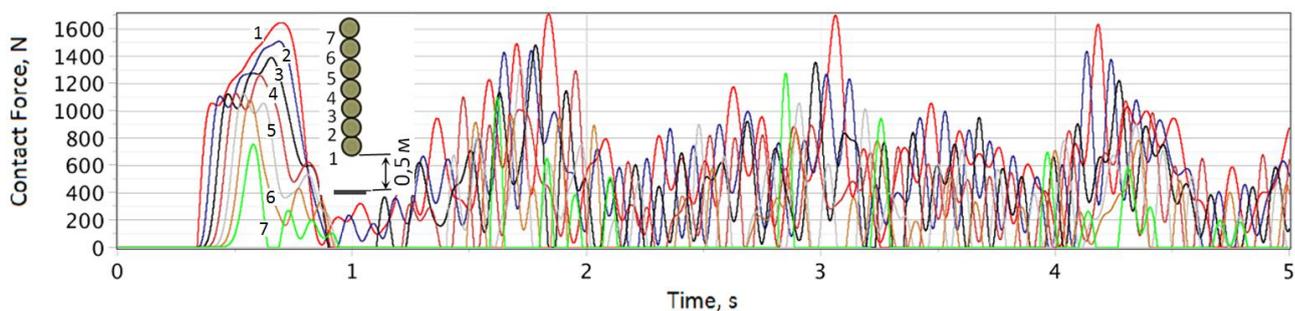


Рисунок 7. Изменение силы контактного взаимодействия балансов 9 кг.

Исследование 5. Условный штабель неодинаковых балансов, состоящий из трёх балансов, диаметром 0,12 м (массой 9 кг) в нижней части, и четырёх балансов, диаметром 0,2 м (массой 31 кг) в верхней части, соударяется с основанием, падая с высоты 0,5 м. Жесткость основания и жесткость балансов принята равной 11000 Н/м. Схема условного штабеля и изменение сил контактного взаимодействия балансов в зависимости от времени показаны на Рис. 8.

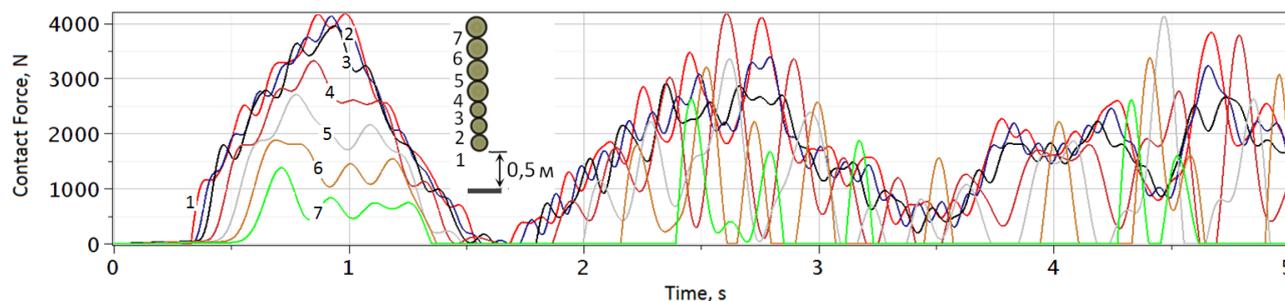


Рисунок 8. Изменение силы контактного взаимодействия балансов в исследовании 5.

Исследование 6. Условный штабель, состоящий из четырёх балансов, диаметром 0,2 м (массой 31 кг) в нижней части, и трёх балансов, диаметром 0,12 м (массой 9 кг) в верхней части, соударяется с основанием, падая с высоты 0,5 м. Жесткость основания и жесткость балансов принята равной 11000 Н/м. Схема условного штабеля и изменение сил контактного взаимодействия балансов в зависимости от времени показаны на Рис. 9.

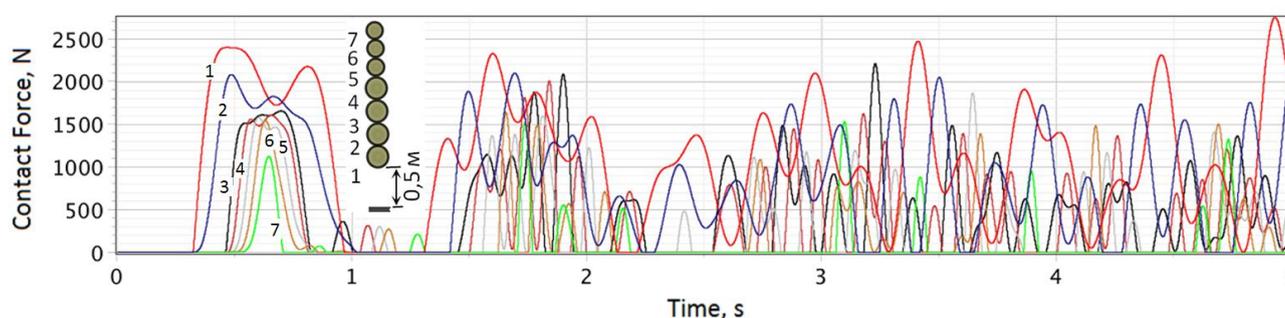


Рисунок 9. Изменение силы контактного взаимодействия балансов в исследовании 6.

Результаты исследований 5 и 6 показывают, что с уменьшением массы балансов в верхней части условного штабеля с 31 до 9 кг возрастает число соударений в единицу времени, силы контактного взаимодействия быстрее достигают максимумов, но максимальные значения сил уменьшаются.

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, в представленной работе на модельных примерах показано, что уменьшение диаметра балансов приводит к увеличению числа их соударений в единицу времени и к уменьшению локальных экстремумов сил контактного взаимодействия (см. Рис. 6 и 7). С точки зрения технологии это означает, что имеют место две противоположные тенденции: увеличение числа соударений ускоряет очистку от коры, однако уменьшение силы соударений балансов замедляет процесс их очистки от коры. При этом количественные оценки, получаемые по представленной методике, могут быть использованы с целью обоснования рекомендаций по совершенствованию технологии очистки балансов от коры в

установках барабанного типа. С той же целью важно обратить внимание на то, что, как показывают Рис. 6–9, характер соударений существенно зависит от распределения балансов неодинакового диаметра (и массы) и определяется диаметром балансов, находящихся в верхней части условного штабеля (см. Рис. 5, 8, 9). Это замечание детализирует известные закономерности окорки балансов, установленные другими методами [1,13].

Однако возможности представленной выше методики численного моделирования [3,4] не ограничиваются рассмотренными технологическими ситуациями. В целях уточнения рекомендаций по ресурсосбережению необходимо исследовать влияние жесткости корпуса барабана на величину силы соударений балансов *неодинакового* диаметра. Такое исследование можно выполнить по аналогии с работой [5], в которой рассмотрена задача о влиянии локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений балансов *одинакового* диаметра. Наибольший интерес при этом представляют силы соударений балансов с внутренней поверхностью корпуса барабана. Это важно, поскольку данные силы влияют не только на величину потерь древесины при окорке [4,5], но и на абразивный износ внутренней поверхности корпуса корообдирочного барабана.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития Петрозаводского государственного университета на 2012-2016 годы по госбюджетной теме 126–12 Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Бойков С.П. Теория процессов очистки древесины от коры. – Л.: Изд-во Ленинградского гос. ун-та, 1980. – 152 с.
2. Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н. Обзор контактных алгоритмов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2005. – № 1. – С. 45–87.
3. Васильев С.Б. Технология и моделирование очистки круглых лесоматериалов в установках барабанного типа / С.Б. Васильев, Ю.В. Никонова, Г.Н. Колесников. – Петрозаводск: Изд-во Петрозаводский гос. ун-та, 2012. – 88 с.
4. Васильев С.Б., Колесников Г.Н., Никонова Ю.В., Раковская М.И. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2008. – № 185. – С. 195–202.
5. Васильев С.Б., Колесников Г.Н., Никонова Ю.В., Раковская М.И. Влияние локальной жесткости корпуса корообдирочного барабана на изменение силы соударений и величину потерь древесины // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2008. – № 96. – С. 84–91.
6. 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.
7. Девятникова Л.А. Потенциал ресурсосбережения в технологии подготовки круглых лесоматериалов к переработке на щепу // Политематический сетевой электронный

научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 88. – С. 188–206.

8. Никонова Ю.В. Обоснование конструктивно-технологических параметров корообдирочных барабанов с применением численного моделирования динамического взаимодействия балансов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Петрозаводск: Петрозаводский гос. ун-т, 2009. – 20 с.
9. 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.
10. Осерко В.Е. Новый принцип окорки лесоматериалов // *Строительные и дорожные машины*. – 2007. – № 3. – С. 13–16.
11. 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.
12. Янюк Ю.В. К вопросу об оценке эффективности автоматизации процесса окорки древесины в барабанах // *Resources and Technology*. – 2010. – Т. 8. – С. 172–74. – До 2012 г. загл. Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ.
13. Baroth R. Literature review of the latest development of wood debarking. – Oulu: University of Oulu, Control Engineering Laboratory, 2005. – 29 с.
14. Dahl O., Jylhä P., Laitila J., Kärhä K. Effect of raw wood supply system on the wood paying capability of a kraft pulp mill using Scots pine // *Finbio*. – 2005. – Вып. 44. – С. 371–379.
15. Duchesne I., Nylinder M. Measurement of the bark/wood shear strength: practical methods to evaluate debarking resistance of Norway spruce and Scots pine pulpwood // *Forest Products Journal*. – 1996. – Т. 46. – № 11/12. – С. 57–62.
16. Hatton J.V. Debarking of frozen wood // *Tappi Journal*. – 1987. – Т. 70. – № 2. – С. 61–66.
17. Isokangas A., Leiviskä K. Optimization of wood losses in log debarking drum // *Paperi ja Puu*. – 2005. – Т. 87. – № 5. – С. 324–328.
18. Isokangas A., Hyvonen A., Pollanen K., Leiviska K. Analysis of debarking times using pilot scale drum // *59th Appita Annual Conference and Exhibition: Incorporating the 13th ISWFPC (International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry)*, Auckland, New Zealand, 16-19 May 2005. – Appita Inc., 2005. – С. 95.
19. Isokangas A., Laitinen O., Leiviska K., Hyvonen, A. Mechanical abrasion of logs in a pilot tumble debarking drum // *Proceedings of 60th Appita Annual Conference and Exhibition*, Melbourne, Australia, 3-5 April 2006. – Appita Inc., 2006. – С. 319.
20. Jonkka A. Method for controlling a drum debarker. U.S. Patent № 6546979. 15 Apr. 2003.
21. Kärhä K., Jylhä P., Laitila J. Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – Т. 35. – № 8. – С. 3389–3396.
22. Niinimäki J. Method for optimizing the debarking result of logs debarked in a debarking drum. U.S. Patent Application 10/539680.
23. Öman M. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2000. – Т. 15. – № 4. – P. 455–463.
24. Pfeiffer F. On non-smooth multibody dynamics // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*. – 2012. – Т. 226. – № 2. – С. 147–177.
25. Piggott R.R., Thompson R. A. Drum debarking: key factors for design and performance // *Tappi Journal*. – 1987. – Т. 70. – № 8. – P. 37–41.

References

1. Boykov, S.P. 1980. The theory of processes of wood debarking. Leningrad State University, Leningrad, USSR, 152 pp.
2. Burago, N.G., Kukudzanov, V.N. 2005. Revue of contact algorithms. *Mechanics of Solids* 1: 45–87.
3. Vasilyev, S.B., Nikonova, Ju.V., Kolesnikov, G.N. 2012. Technology and Modeling of Debarking in Drum. Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, 88 pp.
4. Vasilyev, S.B., Kolesnikov, G.N., Nikonova, Ju.V., Rakovskaya, M.I. 2008. Research into change of force in pulpwood collisions in drum for the purpose of decreasing losses at debarking. *Izvestiya Saint Petersburg State Forest Technical University* 185: 195–202.
5. Vasilyev, S.B., Kolesnikov, G.N., Nikonova, Ju.V., Rakovskaya, M.I. 2008. Influence of Local Stiffness of the Drum on Collisions Forces and Size of Wood Losses. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences* 96: 84–91.
6. Gazizov, A.M., Shapiro, V. Ja., Grigoriev, I.V. 2008. Modeling of bark destruction at ring debarking. *Vestnik Krasnoyarsk State Agrarian University* 5: 271–279.
7. Devyatnikova, L.A. 2013. A potential resource-saving technology of preparation of round forest products to chipping. *Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University* 88(4): 188–206.
8. Nikonova, Ju.V. 2009. Justification of constructive and technological parameters of debarking drums using numerical modeling of dynamic interaction of pulpwood, PhD thesis abstract, Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia, 20 pp.
9. Nikonova, Ju.V., Rakovskaya, M.I. 2010. Cross section stiffness of pulpwood: experiment and numerical modeling. *Resources and Technology* 8: 100–106.
10. Oskerko, V.E. 2007. New debarking principle of wood. *Construction and Road Building Machinery* 3: 13–16.
11. Shapiro, V.Ja., Grigoriev, I.V., Gulko, A.E. 2011. The analysis of parameters and justification of mathematical model of bark destruction of pulpwood in drum. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences* 8: 92–96.
12. Janyuk, Y.V. 2010. Efficiency evaluation of the timber debarking process automation. *Resources and Technology* 8: 172–174.
13. Baroth, R. 2005. Literature review of the latest development of wood debarking. Control Engineering Laboratory University of Oulu, Oulu, Finland, Report A No 27, 29 pp.
14. Dahl, O., Jylhä, P., Laitila, J., Kärhä, K. 2009. Effect of raw wood supply system on the wood paying capability of a kraft pulp mill using Scots pine. *Finbio* 44: 371–379.
15. Duchesne, I., Nylinder, M. 1996. Measurement of the bark/wood shear strength: practical methods to evaluate debarking resistance of Norway spruce and Scots pine pulpwood. *Forest Products Journal* 46(11/12): 57–62.
16. Hatton, J.V. 1987. Debarking of frozen wood. *Tappi Journal* 70(2): 61–66.
17. Isokangas, A., Leiviskä, K. 2005. Optimization of wood losses in log debarking drum. *Paperi ja Puu* 87(5): 324–328.
18. Isokangas, A., Hyvonen, A., Pollanen, K., Leiviska, K. 2005. Analysis of debarking times using pilot scale drum. Proceedings of 59th Appita Annual Conference and Exhibition Incorporating the 13th ISWFPC (International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry), Auckland, New Zealand, 16-19 May 2005. Appita Inc., p. 95.
19. Isokangas, A., Laitinen, O., Leiviska, K., Hyvonen, A. 2006. Mechanical abrasion of logs in a pilot tumble debarking drum. Proceedings of 60th Appita Annual Conference and Exhibition, Melbourne, Australia, 3-5 April 2006. Appita Inc., p. 319.
20. Jonkka, Arvo. 2003. Method for controlling a drum debarker. U.S. Patent No. 6,546,979.

21. Kärhä, K., Jylhä, P., Laitila, J. 2011. Integrated procurement of pulpwood and energy wood from early thinnings using whole-tree bundling. *Biomass and Bioenergy* 35(8): 3389–3396.
22. Niinimäki, Jouko. Method for optimizing the debarking result of logs debarked in a debarking drum. U.S. Patent No 10,539,680.
23. Öman, M. 2000. Influence of log characteristics on drum debarking of pulpwood. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15(4): 455–463.
24. Pfeiffer, F. 2012. On non-smooth multibody dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K. Journal of Multi-body Dynamics* 226(2): 147–177.
25. Piggott, R.R., Thompson, R.A. 1987. Drum debarking: key factors for design and performance. *Tappi Journal* 70(8): 37–41.