

## К построению теории групповой окорки древесного сырья

А. С. Васильев

Петрозаводский государственный университет

Анализ результатов исследований профессоров С. П. Бойкова, С. Б. Васильева, А. В. Житкова, Б. Г. Залегаллера, В. В. Коробова, В. Д. Никишова, Л. М. Перелыгина, Г. И. Торговникова, Б. Н. Уголева, М. Н. Симонова, Н. Л. Леонтьева, И. Р. Шегельмана позволил сделать вывод о недостаточной изученности особенностей процессов, происходящих в окорочных барабанах при групповой обработке древесины. В связи с этим была поставлена задача сформировать научный задел для построения теории групповой обработки древесины [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7] с целью отделения от нее коры.

Процесс функционирования окорочного барабана включает: загрузку в барабан древесного сырья, которое в его поперечном сечении образует сегмент заполнения; поворот сегмента до критического угла наклона его поверхности – угла динамического откоса, при котором древесина достигает наивысшей точки подъема и обрушивается вниз; обрушение древесины вниз и удар поленьев о стенку барабана или о расположенные на его внутренней поверхности рабочие органы; отделение от древесины коры и примесей, выгрузку древесины из барабана [4]. Таким образом, для решения поставленной задачи следует детально изучить движение древесины в окорочном барабане при его вращении, исследовать ударные процессы, происходящие в окорочном барабане, и сам процесс отделения коры от древесины.

Возникающие в результате взаимодействия окариваемых лесоматериалов ударные силы характеризуются кратковременностью интервала времени их действия и значительной величиной. Поэтому координаты перемещающихся отрезков древесины за время удара не изменяются, а скорости получают конечные приращения. Удобной мерой ударной силы ( $\bar{F}$ ) служит ее интегральная характеристика – ударный импульс ( $\bar{I}$ ), который определим из соотношения:

$$\bar{I} = \int_{t_{\bar{n}0}}^{t_{\bar{n}0} + \tau} \bar{F}(t) dt,$$

где  $[t_0, t_0 + \tau]$  – промежуток времени, в течение которого действует сила.

Величина ударной силы будет определять ускорения, с которыми движутся взаимодействующие бревна, а задача определения координат и скоростей сведется к интегрированию дифференциальных уравнений.

Рассмотрим движение отрезка древесины массой ( $m$ ), который движется под действием силы ( $\bar{Q}$ ), зависящей от радиуса вектора перемещения ( $\bar{r}$ ) и скорости:

$$\bar{V} = \dot{\bar{r}} = \frac{d\bar{r}}{dt},$$

где  $t$  – время перемещения, с.

В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\begin{cases} m\bar{V} = \bar{Q}(t, \bar{r}, \bar{V}) \\ \dot{\bar{r}} = \bar{V} \end{cases} \quad (1)$$

Каждое векторное равенство (1) эквивалентно системе трех скалярных, представляющих собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений шестого порядка, решение которого задает параметры перемещения отрезков древесины. В дополнение к конечной силе ( $\bar{Q}$ ) на отрезок древесины действует ударная сила ( $\bar{F}$ ). На интервале времени  $(t_0, t_0 + \tau)$  запишем систему (1) в интегральной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \cdot [\bar{V}(t_0 + \tau) - \bar{V}(t_0)] = \bar{I} + \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \bar{Q}(t) dt \\ \bar{r}(t_0 + \tau) - \bar{r}(t_0) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \bar{V}(t) dt \end{array} \right. \quad (2)$$

Переходя в системе выражений (2) к пределу при  $\tau \rightarrow 0$ , получим разностные уравнения импульсного движения в виде

$$m \Delta \bar{V} = m(\bar{V}_1 - \bar{V}_2) = \bar{I}, \quad (3)$$

где  $\bar{V}_1$  и  $\bar{V}_2$  - скорости в начальный и конечный момент действия импульса.

Выражение (3) целесообразно обобщать для случая, когда на бревна действует сразу несколько ударных сил  $(\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_L)$ , такой эффект наблюдается при групповой обработке. Исходя из закона независимости действия сил в механике:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^L \bar{I}_i.$$

Рассмотрим систему из нескольких взаимодействующих отрезков древесины с массами  $m_j$  ( $j = 1, 2, \dots, k$ ). На каждый из них действует некоторая внешняя сила  $(\bar{Q}_j)$ , а так же внутренние силы  $(\bar{R}_{ji})$ , отражающие попарные взаимодействия. В соответствии с третьим законом Ньютона будут справедливы соотношения

$$\bar{R}_{ij} = -\bar{R}_{ji}.$$

Рассмотрим импульсное движение системы взаимодействующих отрезков древесины с учетом того, что  $\bar{F}_j$  - ударная сила, действующая на отрезок древесины с номером  $j$ . По аналогии с (1) уравнение движения  $j$  отрезка можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_j \bar{V}_j = \bar{Q}_j + \bar{F}_j + \sum_{i=1}^k \bar{R}_{ji} \\ \dot{\bar{r}}_j = \bar{V}_j \end{array} \right. \quad (4)$$

Изменяя индекс  $j$  в пределах от 1 до  $k$  получим систему дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие отрезков древесины. Для получения уравнений импульсного движения достаточно проинтегрировать (4) на интервале действия ударных сил. Пренебрегая в полученных соотношениях членами, исчезающими вместе с  $\tau \rightarrow 0$ , запишем эти уравнения в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_j \Delta \bar{V}_j = \bar{I}_j + \sum_{i=1}^k \bar{I}_{ji} \\ \bar{I}_{ji} = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \bar{R}_{ji}(t) dt \end{array} \right. ,$$

где  $\bar{I}_{ji}$  - ударные импульсы, обусловленные взаимодействием отрезков древесины друг с другом.

Физическая сущность процесса окорки ударным способом заключается в том, что при ударе происходит ослабление силы сцепления коры с древесиной и с каждым ударом эта связь коры и древесины ослабевает, ослабление связи происходит до тех пор, пока не произойдет окончательная ее утрата, и вследствие чего, произойдет отделение участка коры.

Для рассмотрения сущности процесса отделения коры от древесины рассмотрим два типа взаимодействия бревен: при положительной температуре - "мягкое" взаимодействие; при отрицательной температуре - "жесткое", "мягкое" - допускает относительное перемещение тел, что сопровождается плавным изменением внутренних сил  $\bar{R}_{ji}$ , которые могут быть отнесены к конечным; "жесткое" - характеризуется возникновением значительных усилий, которые приводят к деформации. Им отвечают ударные импульсы  $\bar{I}_{ji}$ . В качестве модели "мягкого"

взаимодействия рассмотрим систему двух тел соединенных упругими волокнами пренебрежимо малой массы (рис. 1, а)

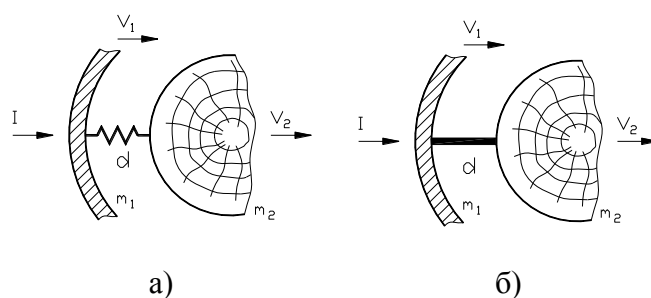


Рис. 1. Расчетная схема

Внутренняя сила ( $\bar{R}_{12}$ ), возникающая в системе направлена вдоль прямой соединяющей тела, а ее величина является линейной функцией расстояния между ними:

$$R_{12} = C(d + x_1 - x_2),$$

где  $C$  – жесткость соединительных волокон;  $d$  – длина волокон в ненапряженном состоянии;  $x_1$  и  $x_2$  – координаты коры и непосредственно древесины.

Допустим, что в начальный момент времени система находится в равновесии, а затем к телу массой  $m_1$  прикладывается ударная сила  $F$ , равная  $I/\tau$  в интервале времени  $t \in (0, \tau)$  и нулю вне этого интервала.

В этом случае уравнения движения тел в соответствии со вторым законом Ньютона будут иметь вид

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = \frac{I}{\tau} - \tilde{N}(d + x_1 - x_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = \tilde{N}(d + x_1 - x_2) \end{cases} \quad (5)$$

В силу допущений начальные значения переменных задаются равенствами

$$x_1(0) = 0; \quad x_2(0) = d; \quad \dot{x}_1(0) = 0; \quad \dot{x}_2(0) = 0. \quad (6)$$

Система выражений (5), (6) линейна и допускает явное аналитическое решение, которое в интервале  $(0; \tau)$  имеет вид:

$$x_1 = \frac{I}{\tau(m_1 + m_2)} \left( \frac{1}{2} t^2 + \frac{m_2}{\tilde{N}} - \frac{1}{\omega^2} - \frac{m_2}{m_1 \omega^2} \cos \omega t \right);$$

$$x_2 = \frac{I \cdot d}{\tau(m_1 + m_2)} \left( \frac{1}{2} t^2 - \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\omega^2} \cos \omega t \right),$$

где  $\omega^2 = \frac{\tilde{N}(m_1 + m_2)}{m_1 \cdot m_2}$ .

К моменту окончания удара  $t = \tau$  и координаты получают приращение порядка  $\tau$ , а для скоростей будут справедливы следующие выражения

$$\begin{cases} \dot{x}_1(\tau) = \frac{I}{m_1 + m_2} \left( 1 + \frac{m_2}{m_1} \cdot \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau} \right) \\ \dot{x}_2(\tau) = \frac{I}{m_1 + m_2} \left( 1 - \frac{\sin \omega \tau}{\omega \tau} \right) \end{cases} \quad (7)$$

Выражения (7) есть решение прямой задачи – воздействие удара на систему тел. Анализируя его можно прийти к выводу, что конечный результат определяется не малостью промежуточного времени  $\tau$ , а зависит от величины произведения  $\omega \tau$ . В предельном случае при  $\omega \tau \rightarrow 0$ , который соответствует "мягкому" взаимодействию древесины при положительной температуре, имеем

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(\tau) &= \frac{I}{m_1} \\ \dot{x}_2(\tau) &= 0 \end{aligned}$$

Скорости коры и древесины различны, то есть происходит процесс отделения коры от древесины – окорка.

Другой случай  $\omega t \rightarrow \infty$  соответствующий "жесткому" взаимодействию мороженой древесины (см. рис. 1, б)

$$\dot{x}_1(\tau) = \dot{x}_2(\tau) = \frac{I}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

Выражение (8) показывает, что скорости коры и древесины одинаковы, то есть отделение коры от древесины не наступило. Физический смысл выражения (4) – "жесткое" взаимодействие при помощи жесткой связи длиной  $d$  накладывает ограничения на скорости коры и древесины, что и затрудняет окорку мороженой и засохшей древесины.

При исследовании процесса перемещения древесины в окорочном барабане было установлено, что она перемещается послойного по криволинейным траекториям, подобным внутренней поверхности барабана (рис. 2). Внешний слой древесины перемещается по траектории, задаваемой внутренней поверхностью барабана и поверхностью обрушения древесины. Все остальные слои движутся по подобным траекториям с меньшими радиусами кривизны. Хаотическое перемещение бревен из одного слоя в другой не нарушает общего баланса древесины в слоях, благодаря чему суммарное количество движения слоя и его энергия остаются постоянными. Установлено, что определяющее влияние на процесс смещения одного слоя относительно другого оказывает вес вышерасположенной древесины, если ее проекция на направление перемещения слоя древесины отлична от нуля. Замедление перемещения одного слоя древесины относительно другого характеризуется коэффициентом смещения ( $K_{i,i+1}$ ), величина которого определяется скоростями соседних слоев древесины

$$K_{i,i+1} = \frac{v_i - v_{i+1}}{v_i},$$

где  $v_i$  и  $v_{i+1}$  – скорости перемещения соседних слоев древесины.

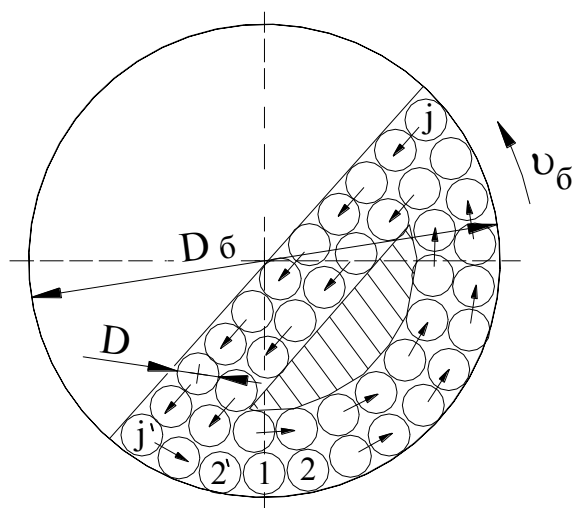


Рис. 2. Расчетная схема послойного перемещения древесины

Так как слой состоит из определенного количества отрезков древесины, то скорость слоя можно рассматривать как среднюю арифметическую скоростей составляющих его отрезков древесины:

$$v_i = \frac{(v_{1,i} + v_{2,i} + \dots + v_{z,i}) + (v_{2',i} + v_{3',i} + \dots + v_{z',i})}{z + z'};$$

$$v_{i+1} = \frac{(v_{1,i+1} + v_{2,i+1} + \dots + v_{w,i+1}) + (v_{2^{\setminus},i+1} + v_{3^{\setminus},i+1} + \dots + v_{w^{\setminus},i+1})}{w + w^{\setminus}},$$

где  $v_{1,i}, v_{2,i}, \dots, v_{z,i}$  – скорости бревен  $i$ -го слоя правее первого отрезка;  $v_{2^{\setminus},i}, v_{3^{\setminus},i}, \dots, v_{z^{\setminus},i}$  – скорости бревен  $i$ -го слоя левее первого отрезка;  $v_{1,i+1}, v_{2,i+1}, \dots, v_{w,i+1}$  – скорости бревен  $i+1$ -го слоя правее первого отрезка;  $v_{2^{\setminus},i+1}, v_{3^{\setminus},i+1}, \dots, v_{w^{\setminus},i+1}$  – скорости бревен  $i+1$ -го слоя левее первого отрезка;  $z$  – число бревен в  $i$ -ом слое правее первого отрезка;  $z^{\setminus}$  – число бревен в  $i$ -ом слое левее первого отрезка;  $w$  – число бревен в  $i+1$ -ом слое правее первого отрезка;  $w^{\setminus}$  – число бревен в  $i+1$ -ом слое левее первого отрезка.

Так как скорость отрезков древесины первого слоя известна и равна скорости внутренней поверхности барабана, то расчет скоростей целесообразно начать со второго слоя.

$$\begin{cases} v_{2,1} = v_a - a_{1-2,1} \cdot t_{1-2,1}; \\ v_{3,1} = v_{2,1} - a_{2-3,1} \cdot t_{2-3,1}; \\ \dots \\ v_{j,1} = v_{(j-1)-j,1} - a_{(j-1)-j,1} \cdot t_{(j-1)-j,1}. \end{cases}$$

где  $t_{1-2,1}, t_{2-3,1}, \dots, t_{(j-1)-j,1}$  – время перемещения бревна из положения 1 в 2, из 2 в 3, ..., из  $j-1$  в  $j$ ;  $j$  – количество бревен во внешнем слое справа от первого отрезка;  $a_{1-2,1}, a_{2-3,1}, \dots, a_{(j-1)-j,1}$  – ускорения бревен между положениями 1-2, 2-3, ...,  $(j-1)-j$ .

Найденные значения скоростей слоев древесины позволили рассчитать коэффициенты смещения соседних слоев древесины и смещения первого слоя относительно внутренней поверхности барабана. Было установлено, что они находятся в интервале 0,85-0,95. Эффективность окорки древесины, зависящая от смещения слоев древесины, будет определяться величиной работы сил трения, которая прямо пропорциональна величине этого смещения.

Изучение процесса перемещения отрезков древесины в окорочном барабане, их ударного взаимодействия и физической сущности процесса отделения коры от древесины, позволили построить математическую модель, позволяющую определять оптимальное время окорки в зависимости от требуемого качества, породы древесины, размеров обрабатываемых бревен, параметров и режима работы окорочного оборудования, которая имеет вид:

$$T = \frac{\ln \left( \frac{100 \cdot \sum_{i=0}^{b-1} \frac{a^i}{i!}}{100 - K} \right) \cdot \pi \cdot D_a^2 \cdot L \cdot K_\zeta \cdot 0,85 \cdot K_{\tilde{\gamma}} \cdot \frac{K_{\hat{\epsilon}}}{100} \cdot \frac{\beta}{2 \cdot \pi}}{4 \cdot a \cdot n_{\hat{a}} \cdot S_{\check{\gamma}\check{\epsilon}\check{\delta}} \cdot K_{\check{\gamma}\check{\delta}} \cdot D}, \quad (9)$$

где  $b$  – число ударов, необходимое для полной окорки элементарного участка, расположенного на поверхности окариваемого бревна;  $a$  – среднее количество ударов, получаемых одним элементарным участком за все время обработки;  $K$  – требуемое качество окорки, %;  $D_a$  – внутренний диаметр барабана, м;  $L$  – средняя длина обрабатываемых бревен, м;  $K_\zeta$  – коэффициент заполнения барабана;  $K_{\tilde{\gamma}}$  – коэффициент полнодревесности укладки бревен в барабане;  $K_{\hat{\epsilon}}$  – доля коры в общей биомассе ствола дерева, %;  $\beta$  – угол динамического обрушения, рад;  $n_{\hat{a}}$  – частота вращения барабана,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{\check{\gamma}\check{\epsilon}\check{\delta}}$  – площадь элементарного участка,  $\text{м}^2$ ;  $K_{\check{\gamma}\check{\delta}}$  – коэффициент, характеризующий породу древесины;  $D$  – средний диаметр обрабатываемых бревен, м.

Численные значения величин  $a, b, S_{\check{\gamma}\check{\epsilon}\check{\delta}}$  были установлены в результате экспериментальных исследований [6].

Результаты исследований, представленные в работах [ФТА, патенты] показали, что одним из направлений совершенствования окорочного оборудования является выбор оптимального режима его работы. Для подбора оптимального режима работы окорочного оборудования с учетом различных факторов, касающихся как параметров обрабатываемого сырья, так и параметров окорочного оборудования может быть использована математическая модель (9) которая позволяет определить оптимальное время окорки в зависимости от требуемого качества, породы древесины, геометрических размеров обрабатываемых бревен, параметров и режима работы окорочного оборудования.

*Работа выполняется при финансовой поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности.*

## Литература

1. Шегельман И. Р. Анализ процесса групповой окорки при положительной и отрицательной температурах / И.Р. Шегельман, А.С. Васильев, А.Ю. Лапатин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2012. – Вып. 2. С.65-69.
2. Шегельман И. Р. Исследование направлений модернизации техники и технологии лесозаготовок / И. Р. Шегельман // Инженерный вестник Дона [Электронный журнал]. – 2012. – № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/866/>
3. Шегельман И. Р. Моделирование технологического процесса очистки древесины в корообдирочном барабане с применением метода дискретных элементов / Шегельман И.Р., Васильев А.С., Колесников Г.Н. – 2008. – № 184. – С. 257.
4. Шегельман И.Р. Функционально-технологический анализ: Методология и приложения. – М: ИПиИ, 2000. – 96 с.
5. Васильев А.С. Технические решения, защищенные правоохранными документами Российской Федерации в отношении оборудования для окорки лесоматериалов / Инженерный вестник Дона. Вып. 2. Ростов-на-Дону, 2012. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/latest/n2y2012/831/>
6. Васильев А.С. Обоснование технических решений, повышающих эффективность режимов групповой окорки древесного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01: защищена 18.12.2004 – Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. – 19 с.
7. Васильев А. С. Пути повышения эффективности процесса окорки лесоматериалов / Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: материалы третьей республиканской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, докторантов. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. С. 5-7.