

## Описание процесса окорки круглых лесоматериалов и горбылей

Е.В. Палкин<sup>a</sup>, Т.С. Розанова<sup>b</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий» 31, Красноярск, Россия

<sup>a</sup>palestu@yandex.ru, <sup>b</sup>tanyar2005@mail.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-5419-7852>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-9749-557X>

Статья поступила 11.10.2018, принята 5.11.2018

*В статье представлены теоретическое описание взаимодействия цепного рабочего органа с сегментными и тонкомерными лесоматериалами в процессе их окорки, режимные параметры, влияние направления подачи и линейной скорости вращения цепей на удельную работу. Цепная окорка — это способ механического воздействия на кору лесоматериала, перемещающегося в осевом направлении через систему приводных горизонтальных и вертикальных вращающихся валов, на которых прикреплены отрезки обыкновенных круглозвенных цепей. За счет центробежной силы цепи приобретают определенную жесткость и, воздействуя на кору, сбивают ее с поверхности. Удельная работа окорки рассчитывалась как произведение длительности процесса (с) на разницу показаний рабочего и холостого ходов (Вт), отнесенное к объему снятой коры (м<sup>3</sup>), Дж/м<sup>3</sup>. Представленные математические модели, описывающие механику процесса взаимодействия цепей и окоряемой поверхности, позволяющие определить режимные параметры с минимальными энергетическими затратами при высоком качестве обработки, вносят вклад в развитие теории механической окорки. Полученные в результате исследования математические зависимости свидетельствуют, что окорка цепным способом более эффективна при попутной подаче лесоматериала по сравнению с встречной подачей. Результаты исследования позволяют решать прикладные задачи выбора параметров и режимов работы при разработке цепных окорочных станков.*

**Ключевые слова:** теоретические исследования; окорка лесоматериала; гибкий цепной рабочий орган; круглый тонкомерный лесоматериал; сегментный лесоматериал; горбыль; математические модели; удельная работа; режимы окорки.

## Description of debarking process of round timber and slabs

E.V. Palkin<sup>a</sup>, T.S. Rozanova<sup>b</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

apalestu@yandex.ru, btanyar2005@mail.ru

<sup>a</sup><https://orcid.org/0000-0002-5419-7852>, <sup>b</sup><https://orcid.org/0000-0001-9749-557X>

Received 11.10.2018, accepted 5.11.2018

*The article presents some theoretical description of the interaction of the chain working body with segmental and small-diameter timber in the process of debarking, operating parameters, the influence of flow direction and linear speed of rotation of the flails on the specific job. Chain debarking is a method of mechanical action on the bark of timber moving in the axial direction through a system of horizontal and vertical driving shafts on which segments of ordinary round-link chains are attached. Due to the centrifugal force, the chains acquire a certain stiffness and, acting on the cortex, knock it off the surface. Specific work debarking was calculated as the product of the duration (sec) the difference between the readings of the working and idle strokes (W), divided by the volume of removed bark (m<sup>3</sup>), J/m<sup>3</sup>. The presented mathematical models describing the mechanics of the process of interaction between the chains and the debarking surface, which make it possible to determine the regime parameters with minimal energy expenditures with high quality processing, contribute to the development of the theory of mechanical debarking. The mathematical dependences, obtained as a result of the study, indicate that chain debarking is more efficient when passing timber as compared to the counter feed. The results of the study allow to solve applied problems of choosing parameters and operating modes when developing chain debarking machines.*

**Keywords:** theoretical studies; timber debarking; chain working body; round small-diameter timber; segmental timber; slabs; mathematical models; specific work; modes of debarking.

### Введение

Развитие лесопромышленного комплекса России возможно только на основе рационального лесопользования и инновационных технологий глубокой переработки древесины, что является залогом эффективности и конкурентоспособности производства. Эффективность использования древесного сырья и качество готовой продукции во многом зависят от возможностей и способов окорки лесоматериалов, поэтому на боль-

шинстве деревообрабатывающих производств переработка древесины начинается с ее окорки — процесса удаления коры. В настоящее время технологии очистки древесины от коры внедрены не на всех отраслевых предприятиях. Эффективному использованию древесины кусковых и лесосечных отходов производства препятствует наличие коры на их боковых поверхностях. Окорка таких древесных отходов, как горбыльные доски и низкотоварная древесина, позволит дополнитель-

но вовлечь в производство до 30 % всего объема. Под низкотоварной древесиной принято понимать древесину, имеющую товарную стоимость ниже себестоимости ее заготовки и переработки при существующих технологиях. К ней прежде всего относится мягколиственная и тонкомерная древесина, которая не пользуется спросом у переработчиков древесины либо имеет закупочную цену, не оправдывающую затрат на ее заготовку [1–5]. Нарастающий дефицит древесного сырья направляет интересы лесопромышленников в сторону использования безотходных технологий, заставляет шире использовать низкотоварную древесину, поступающую в отходы [6].

В качестве перспективных вариантов крупномасштабных производств, перерабатывающих низкотоварную древесину на товарную продукцию, можно назвать производства различных видов твердого топлива — топливных пеллет (гранул) и брикетов [7; 8]. При производстве древесных топливных гранул перерабатываются и лесосечные отходы: тонкомерная и дровяная древесина, искривленные стволы. Гранулы можно изготавливать как из чистой древесины, так и из древесины в смеси с корой. Гранулы с низким содержанием коры (до 0,5 %) имеют самый низкий процент зольности и считаются наиболее экологически чистым продуктом высокого качества, поэтому они наиболее востребованы на рынке. Производство топливных гранул из отходов деревообработки и низкотоварной древесины является динамично развивающимся сегментом лесопромышленного бизнеса России, о чем говорят результаты анализа отраслевых информационных сайтов за последние годы, например, таких, как Lesprom Network [9; 10].

Существующее окорочное оборудование преимущественно ориентировано на обработку древесных стволов правильной геометрической формы. Для получения качественной и конкурентной продукции из низкотоварной древесины и кусковых отходов потребуются увеличение степени их очистки от коры, но при этом растут потери древесины. Согласно исследованиям [8; 11; 12], потери древесины при очистке в окорочных барабанах могут составлять 1–4 %. Это больше, чем при хранении круглых лесоматериалов (0,1–0,5 %), измельчении на щепу и сортировке щепы (0,5–2,5 %), транспортировке (0–0,5 %) и хранении щепы (0,1–1,5 %). Окорка древесины — достаточно сложный механический процесс, эффективная реализация которого невозможна без учета всех влияющих на него факторов.

Одним из вариантов решения проблемы очистки от коры горбыля и низкотоварной древесины предлагается внедрение окорочных установок с гибкими рабочими органами — цепями (ГЦРО), закрепленными на вращающихся приводных валах (барабанах). Эффективное использование вышеперечисленных древесных отходов путем внедрения технологии цепной окорки с ее дальнейшей переработкой предполагает изучение основных особенностей этого процесса, выявление сравнительных показателей и конструктивных схем оборудования [13].

Перспективным направлением является применение универсального ГЦРО для обработки горбыля и низкотоварной древесины. Цепной орган обладает многофункциональными возможностями. Может применяться как при индивидуальной, так и при групповой обработке стволов поваленных деревьев с совмещением технологических операций по удалению сучьев и ветвей кроны и окорки, в том числе в рециклинге отходов [14; 15]. Изучение особенностей ГЦРО стимулирует создание отечественных сучкорезно-окорочно-рубительных технологических комплексов — «лесных комбайнов» [16; 17].

*Цель работы* — совершенствование технологии окорки путем применения оборудования с ГЦРО для обработки горбыля и низкотоварной древесины.

*Задача* — разработать теоретические основы технологических, конструктивных и энергетических параметров процесса цепной окорки, получить математические модели взаимодействия цепей и обрабатываемой поверхности и привести технические решения, позволяющие использовать цепную окорку при обработке горбыля и низкотоварной древесины.

**Методы.** Для обеспечения рабочих условий цепной окорки (полное снятие коры при минимальном повреждении древесины) необходимо придать определенную скорость вращения приводному валу (барабану) с закрепленными на нем одним концом цепями. Разработаны математические модели, связывающие характеристики вращающихся на валу цепей и условия приведения в работоспособное состояние. Установлены кинематические соотношения подачи и скорости окорки, предложен новый термин — подача на один удар (расстояние между соседними ударами цепей) [18].

При цепной окорке кора разрушается в результате воздействия на нее в нормальном направлении ударной силы. Определяющим в этом случае является предел прочности коры на сжатие поперек волокон. Одной из главных характеристик процесса цепной окорки принят интегральный показатель — удельная работа окорки  $k$ , которая является частным от деления работы окорки  $A$  на объем снятой коры  $G$ , т. е.:

$$k = \frac{A}{G} = \frac{N \cdot T}{G}, \quad (1)$$

где  $N$  — мощность, затрачиваемая на окорку;  $T$  — время, в течение которого проходит процесс.

Размерность удельной работы окорки Дж/м<sup>3</sup> [19]. При рассмотрении схемы взаимодействия цепей с корой были сделаны следующие допущения: рассматривается случай продольной окорки лесоматериалов, движущихся в направлении, перпендикулярном оси окорочного вала; цепь представлена в виде набора точечных масс звеньев с шарнирной связью между ними; поверхность взаимодействия плоская.

Рассмотрим схему взаимодействия, когда движения подачи нет (рис. 1). Цепь, вращаясь с  $\omega$ , подходит к обрабатываемой поверхности, и первое звено касается ее с линейной скоростью  $V$ .

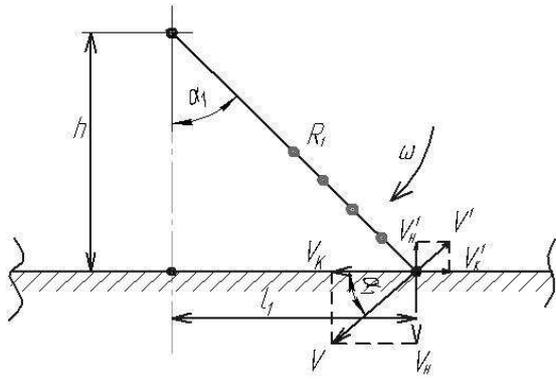


Рис. 1. Момент касания поверхности первым звеном, где  $h$  — расстояние от центра вала до поверхности лесоматериала

Происходит косой удар под углом  $\alpha_1$  к поверхности. Если бы масса первого звена  $m$  не находилась под действием центробежной силы и звено не было бы связано с остальными звеньями, то, согласно теории удара, произошел бы обыкновенный отскок (рикошет). Угол отскока не равен углу падения и определяется величиной коэффициента мгновенного трения, который зависит от состояния шероховатости поверхности и находится экспериментальным путем. При абсолютно гладкой поверхности угол отражения равен углу падения, а при шероховатой — меньше. В нашем случае этого не произойдет. Отскок произойдет по закону маятника, т. е. в обратном направлении по дуге качания. Скорость его  $V^1$  будет равна произведению линейной скорости в момент касания с поверхностью  $V$  на коэффициент упругого восстановления  $k_e$ . Нормальные ( $V_H$  и  $V_H^1$ ) и касательные ( $V_K$  и  $V_K^1$ ) составляющие этих скоростей направлены в противоположные стороны.

Кинетическая энергия удара массы  $m$  со скоростью  $V_H$  в нормальном направлении равна:

$$E_y^H = \frac{m \cdot V_H^2}{2} = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2}. \quad (2)$$

Энергия упругого восстановления:

$$E_6^H = \frac{m \cdot (V_H^1)^2}{2} = \frac{m \cdot V^2 \cdot k_e^2 \sin^2 \alpha_1}{2}. \quad (3)$$

Соответственно, энергия разрушения поверхности первым звеном:

$$E_1^P = E_y^H - E_6^H = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2} - \frac{m \cdot V^2 k_e^2 \sin^2 \alpha_1}{2} = \frac{m \cdot V^2 \sin^2 \alpha_1}{2} \cdot (1 - k_e^2) \quad (4)$$

Эта энергия полностью пойдет на деформирование коры в нормальном направлении, т.е. на сжатие её поперек волокон.

Точка контакта первого звена с поверхностью (I) находится на расстоянии  $l_1 = R_1 \sin \alpha_1$  от вертикали, проходящей через центр вала. Аналогично точка касания второго звена (II) (рис. 2) будет находиться на рас-

стоянии  $l_2 = R_2 \sin \alpha_2$ . Масса первого звена за этот промежуток времени переместится по поверхности объекта из точки (I) в точку (I<sup>1</sup>) на расстояние  $l_1 - l_2 - t$  (т. е.  $R_1 \sin \alpha_1 - R_2 \sin \alpha_2 - t$ ), совершая работу трения.

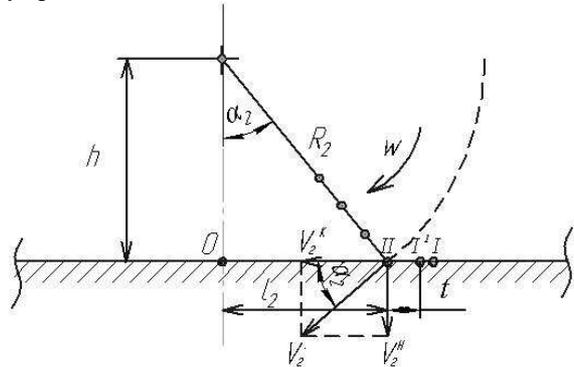


Рис. 2. Момент касания второго звена

Кинетическая энергия разрушения вторым звеном будет:

$$E_2^P = \frac{m}{2} (\omega R_2 \sin \alpha_2)^2 (1 - k_e^2)$$

или:

$$E_2^P = \frac{m \cdot V_2^2 \sin^2 \alpha_2}{2} \cdot (1 - k_e^2). \quad (5)$$

Эта величина меньше, чем  $E_1^P$ , так как  $R_2 < R_1$  и  $\alpha_2 < \alpha_1$ .

Таким образом, за один оборот вала цепью будет нанесен ряд ударов уменьшающейся силы, от максимума в точке (I) до нуля в точке под осью вала. Общая энергия разрушения в нормальном направлении:

$$E_H^P = \frac{m \omega^2}{2} (1 - k_e^2) Z \sum_{i=1}^{i=n_3} (R_i \cdot \sin \alpha_i)^2$$

или:

$$E_H^P = \frac{m}{2} (1 - k_e^2) Z \sum_{i=1}^{i=n_3} (V_i \cdot \sin \alpha_i)^2, \quad (6)$$

где  $n_3$  — количество звеньев, участвующих в контакте (в целых числах);  $Z$  — число рядов цепей на окорочном валу.

$$n_3 = \frac{R_i - h}{t}. \quad (7)$$

Расстояние между точками ударов также уменьшается. Если  $l_1^2 = R_1^2 - h^2$  а  $l_2^2 = (R_1 - t)^2 - h^2$ , то  $l_1^2 - l_2^2 = 2Rt - t^2$ ;  $l_2^2 - l_3^2 = 2Rt - 3t^2$ ;  $l_3^2 - l_4^2 = 2Rt - 5t^2$  и т. д.

Касательная составляющая линейной скорости первого звена в точке (I)  $V_K = \omega R_1 \cdot \cos \alpha_1$ , а в точке O, находящейся под осью вращения, —  $V_K^0 = \omega h$ . Если учесть, что  $h = R_1 \cdot \cos \alpha_1$ , то получится, что эти скорости равны. Отсюда следует вывод, что все звенья цепи, вступающие

в контакт с обрабатываемой поверхностью, двигаются по ней с одинаковой скоростью  $V_K$ , равной  $\omega h$ .

В отсутствие скорости надвигания при следующем обороте звенья цепи ударят по тем же самым местам. При наличии скорости подачи (надвигания)  $U$  удар будет происходить с некоторым сдвигом, шагом удара  $e$  относительно предыдущих точек. Величину этого шага можно определить из основного кинематического соотношения:

$$\frac{U}{V_K} = \frac{e \cdot Z}{2\pi R}, \quad (8)$$

откуда:

$$e = \frac{2\pi R \cdot U}{Z \cdot V_K}. \quad (9)$$

Разрушение коры от ударов звеньев цепи в нормальном направлении происходит только в первой половине общей зоны контакта от точки (I) до точки O (рис. 3).

Составляющая линейной скорости  $V_K$  дает энергию разрушения в касательной плоскости первым звеном (рис. 2).

$$E_K^P = \frac{m \cdot V^2 \cos^2 \alpha_1}{2} \cdot (1 - k_e^2). \quad (10)$$

Если энергия в нормальном направлении полностью поглотится деформацией коры (вплоть до прессования), то энергия в касательном направлении будет востребована лишь частично. Она затратится на скальвание вдоль волокон, перемещение массы  $m$  по поверхности (контакт массы с поверхностью может и не потеряться за счет прижима центробежной силой, а если и потеряется, то через несколько мгновений после отскока восстановится, и цепь будет волочиться), истирание не сколотых остатков коры и т. п. Все эти составляющие значительно меньше деформативной. Наиболее существенное из них — волочение цепи по поверхности обработки.

Сила трения при перемещении звена массой  $m$  равна  $mg\mu$ , где  $\mu$  — коэффициент трения металла звена по древесине или коре. Энергия на горизонтальное перемещение первого звена равна  $mg\mu \cdot 2l_1$ , второго звена —  $mg\mu \cdot 2l_2$  и т. д. Общая энергия на перемещение цепи по обрабатываемой поверхности за один оборот вала:

$$E^H = 2mg\mu n_3 \sum_{i=1}^{i=n} l_i \cdot Z. \quad (11)$$

По абсолютной величине эта энергия значительно меньше, чем  $E^P$ . Остаток энергии в касательном направлении, очевидно, тратится на движение цепи и к процессу непосредственно окорки никакого отношения иметь не будет.

Общая энергия, создаваемая первым звеном, определится как сумма (8) и (14):

$$E_p = \frac{m \cdot V^2 (1 - k_e^2)}{2}. \quad (12)$$

Рассматривая последовательно работу звеньев в касательной плоскости и суммируя ее с энергией в нормальной плоскости, приходим к выводу, что общая энергия разрушения, которую способна отдать цепь за один оборот:

$$E = \frac{m(1 - k_e^2)Z}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2,$$

или:

$$E = \frac{mw^2(1 - k_e^2)Z}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} R_i^2. \quad (13)$$

Это количество энергии может быть как недостаточным для окорки, так и излишним. Все зависит от конкретных условий. Идеальный случай — это когда создаваемой цепи энергии хватит для 100%-ной окорки. Решить такой случай можно было бы аппаратом оптимизации, но для этого нужно знать свойства коры не только на сдвиг или скальвание вдоль волокон (что более или менее изучено), но и на смятие поперек волокон и удар (что совершенно не изучено).

Поэтому попробуем предсказать основные закономерности. Выдвинем условие, что за один проход цепью полностью происходит окорка без лишних затрат энергии. Тогда удельная работа окорки  $k$  выразится как общая энергия разрушения цепью, отнесенная к объему снятой коры  $G$  (Дж/м<sup>3</sup>). За один оборот этот объем равен:

$$G = e \cdot F \cdot Z, \quad (14)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения участка удаляемой коры.

Из кинематического соотношения  $e = \frac{2\pi R_1 U}{V_K \cdot Z}$ .

В этой формуле берется  $V_K$ , а не  $V$ , потому что оно совпадает с  $U$  по направлению. Удельная работа окорки:

$$k = \frac{E}{e \cdot F \cdot Z} = \frac{E V_K}{2\pi R_1 U F}. \quad (15)$$

Таким образом, непосредственно на окорку затрачивается работа (9) и (14). Удельная работа цепной окорки определится:

$$k = \frac{mZ(1 - k_e^2)V_K}{4\pi R_1 U F} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 \sin^2 \alpha_i + \frac{2mg\mu n_3 Z V_K}{2\pi R_1 U F} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i$$

или:

$$k = \frac{mZV_K}{\pi R_1 U F} \cdot \left[ \frac{1 - k_e^2}{4} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 \sin^2 \alpha_i + g\mu n_3 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} l_i \right] \quad (16)$$

Из формулы видно, что график удельной работы окорки имеет кубическую зависимость от линейной скорости цепи, а от скорости подачи — обратную [20].

Рассмотрим деформации массива коры, происходящие в зоне контактирования. При встречном режиме окорки наблюдается несколько иное взаимодействие. Характер деформаций коры: первоначально идет про-

дольное смятие и прессование коры в горизонтальной плоскости с последующим возникновением загиба слоя коры по всей зоне контакта, и затем, по мере увеличения длины загиба, — излом и отбрасывание. Здесь большое значение в протекающих деформациях имеют продольное прессование и скалывание по камбиальному слою с последующим отрывом по ходу движения цепи. При встречном контактировании разрушенная кора горизонтальной составляющей силы удара впрессовывается в еще не разрушенный массив, увеличивая тем самым общие затраты энергии на совершение процесса окорки.

При попутном режиме окорки удаление элемента коры первоначально происходит с радиальным сжатием по корковому и лубяному слою коры и конечным переходом к скалыванию по камбиальному слою. Характер происходящих деформаций коры: первоначально идет смятие, прессование с превращением только периферийных участков в «гармошку», и затем идут скол, излом и отбрасывание. При попутной окорке первое взаимодействие приходится на элемент массива коры, который отрывается и удаляется. Древесина в этом случае находится в шадящем положении, и ее деформация может быть сведена к минимуму. С точки зрения энергетики процесса, затраты на подачу и движения окорочного вала складываются, что уменьшает общую мощность окорки.

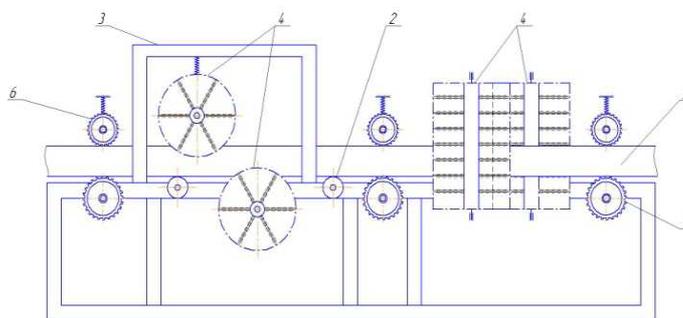
При встречной подаче рабочий орган надвигается, соответственно, в противоход движению подачи ствола лесоматериала. Возникает необходимость в более жестком сцеплении органов подачи с лесоматериалом и дополнительной мощности подачи. Также необходима более точная настройка контактов взаимодействия на величину толщины коры, что затруднительно, иначе первоначальный удар приходится по древесине уже окоренной поверхности, деформируя последнюю. Соответственно, данный способ требует более точного, сложного управления параметрами окорочного рабочего органа и более энергоемок.

Для увеличения площадей взаимодействия цепей с обрабатываемой поверхностью предлагаем последующий ряд цепей сместить на величину радиуса звена цепи в горизонтальной плоскости, т. е. расположить их в шахматном порядке на обрабатываемой поверхности.

При взаимодействии рядов конечных звеньев цепей и круглого лесоматериала в поперечном сечении выявлены зоны боковой поверхности бревна с недостаточной плотностью контактирования, что увеличивает площадь оставшейся коры и уменьшает степень окорки. Для их устранения при однократной обработке предлагается четырехсторонняя окорка зон эффективной окорки с максимальным взаимодействием.

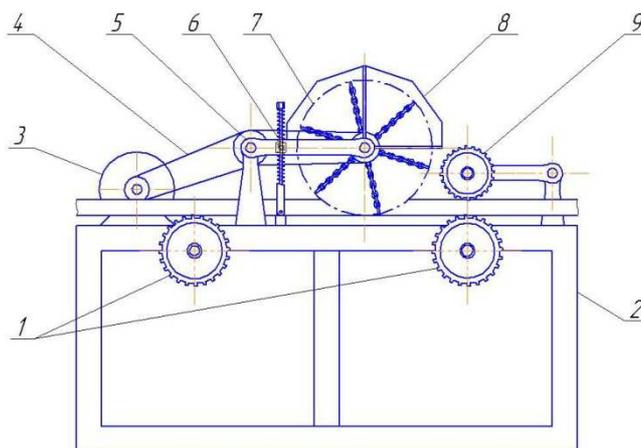
Для окорки низкотоварной древесины — тонкомерных круглых лесоматериалов — предлагается следующее техническое решение в виде конструктивной схемы установки (рис. 3). Вначале лесоматериал подается на входные ролики системы подачи, затем ствол попадает по воздействию двух вертикальных, подвижных в горизонтальной плоскости цепных головок, где обрабатываются боковые зоны эффективной окорки. Затем, после пары прижимных вальцов, ствол дерева идет на окорку нижней и верхней зон окорки, после чего попа-

дает в удерживающие вальцы и выходит из станка. Для обработки более крупных диаметров бревен цепные головки могут быть выполнены с возможностью передвижения в соответствующих рабочих плоскостях, подстраиваясь под различные диаметры.



**Рис. 5.** Окорочный станок с ЦРО для обработки тонкомерных лесоматериалов (вид сбоку): 1 — приводной вал системы подачи; 2 — рама станка; 3 — поддерживающий ролик; 4 — горизонтальные и вертикальные пары цепных головок; 5 — обрабатываемый ствол дерева; 6 — прижимной валец

Для цепной окорки горбыльных досок предлагается техническое решение в виде конструктивной схемы на базе деревообрабатывающего станка ЦА-2 (рис. 4). Доработка станка ЦА-2 произведена с учетом накопленного опыта, что позволяет рекомендовать ее для промышленного применения. Доработка выразилась в следующем. Для регулировки шага удара ЦРО вал предлагается сделать подвижным в вертикальной плоскости за счет шарнирного крепления к опоре с механизмом изменения высоты оси 6 относительно плоскости стола станка. Это позволит настраивать процесс окорки в области рациональных кинематических параметров. Двигатель отнесен назад, к краю станка, и клиноременной передачей связан с цепной головкой. За счет изменения диаметров валов изменится скорость вращения головки.



**Рис. 6.** Окорочный станок с ЦРО для обработки горбыльных досок (вид сбоку): 1 — приводные валы «лябухи» системы подачи; 2 — рама станка ЦА-2; 3 — приводной электрический двигатель; 4 — клиноременная передача; 5 — опора с маятниковым механизмом крепления цепной головки; 6 — механизм регулировки высоты окорочной головки; 7 — траектория движения звена ЦРО; 8 — защитный экран; 9 — прижимной валец

Таким образом, используя систему подачи серийного станка ЦА-2, мы можем получить станок для грубой окорки сегментных лесоматериалов — горбыльных досок.

**Результаты и их обсуждение.** На основании теоретических исследований процесса цепной окорки получены следующие основные результаты:

1) Уравнение основного кинематического соотношения, условия приведения цепных рабочих органов в работоспособное состояние, формулы расчета подачи на один удар (шаг окорки) и на оборот вала.

2) Математические модели: определения кинетической энергии удара цепи; объема разрушенной коры; удельной работы; общей энергии на перемещение цепи по обрабатываемой поверхности за один оборот вала. Проанализированы режимы при попутном и встречном контактировании. С точки зрения энергетики процесса выявлено, что попутная подача предпочтительнее. Применение математической модели удельной работы процесса окорки ЦРО позволяет определить затраты энергии на обработку лесоматериалов.

3) Предложен вариант размещения рядов цепей на приводном валу с учетом перекрытия свободных зон, определены зоны эффективной цепной окорки на боковой поверхности предмета труда.

4) Предложены технические решения — конструктивные схемы обработки сегментных лесоматериалов с верхним, регулируемым в вертикальной плоскости расположением цепной головки, и тонкомерного древесного ствола с четырех взаимно перпендикулярных сторон четырьмя цепными головками.

## Выводы

1. Представлены основы теоретического описания новой технологии окорки тонкомерных и сегментных лесоматериалов цепными рабочими органами.

2. Предложены математические модели, описывающие механику процесса взаимодействия цепей и окоряемой поверхности, позволяющие определить режимные параметры с минимальными энергетическими затратами при высоком качестве обработки, которые вносят вклад в развитие теории механической окорки.

3. Разработана методика геометрического моделирования области контактного взаимодействия цепей и тонкомерных круглых и сегментных лесоматериалов в процессе их очистки от коры.

4. Материалы статьи могут быть использованы для создания и совершенствования конструкций окорочно-оборудования с цепными рабочими органами, обеспечивающих выполнение требований к глубокой переработке древесины по энергосберегающим технологиям.

5. Перспективы дальнейших разработок по данной теме работы должны быть направлены на теоретическое описание и экспериментальное подтверждение комплексного взаимодействия цепного рабочего органа по обработке целого дерева с одновременным удалением зеленой кроны, сучьев и ветвей и окоркой поверхности ствола, что увеличит степень безотходности технологии. Это даст основание для применения цепного окорочного инструмента уже как многофункционального рабочего органа.

6. Использование цепного рабочего органа в качестве модуля в сучкорезно-окорочно-рубильных «лесных комбайнах» открывает новые перспективы его применения в получении раздельной измельченной древесины — технологической щепы, «зеленой лапки», сучьев и ветвей, коры, а также утилизации порубочных остатков. «Лесные комбайны» найдут применение в технологиях по производству щепы для изготовления целлюлозно-бумажной, плитной продукции, а также при подготовке сырья для производства «белых» пеллет (топливных гранул) в древесной биоэнергетике.

## Литература

1. Куницкая О.А., Григорьев И.В. Переработка низкотоварной древесины: проблемы и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология, 2015. № 9. С. 70-75.
2. Куницкая О.А. Ресурсы низкотоварной древесины в субъектах Российской Федерации // Наука, образование, инновации в приграничном регионе: материалы респуб. науч.-практической конф. Петрозаводск: ООО «Verso», 2015. С. 15-17.
3. Куницкая О.А. Низкотоварная древесина как проблема общероссийского масштаба // Материалы XI междунар. науч.-технической интернет-конф. «Леса России в XXI веке». СПб.: СПбГЛТУ, 2014. С. 85-95.
4. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С. Проблема заготовки и обработки низкотоварной древесины в Российской Федерации / ВГЛТА // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. по материалам междунар. заочной науч.-практической конф. Воронеж, 2014. № 2, Ч. 3. С. 78-82. DOI: 10.12737/3193.
5. Мохирев А.П., Аксенов Н.В., Шеварев О.В. О рациональном природопользовании и эксплуатации ресурсов в Красноярском крае [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2014. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (дата обращения: 15.07.2018).
6. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2, Ч. 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (дата обращения: 15.07.2018).
7. Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д., Горбунова Н.А., Бабурин М.И., Горохов Д.Г. Биотопливо из возобновляемого сырья: перспективы производства и потребления // Вестн. Моск. гос. ун-та леса - Лесной вестник. 2008. № 6. С. 91-96.
8. Лукин А.Е. Повышение эффективности групповой окорки длинномерных лесоматериалов снижением потерь древесины и энергоемкости: дис. ... канд. техн. наук Архангельск, 2016. 124 с.
9. «Русская лесная группа» построит в Иркутской обл. завод по производству пеллет мощностью 95 тыс. т. в год [Электронный ресурс] URL: <http://www.lesprom.com/ru/news/> (дата обращения: 03.06.2018).
10. «Русская лесная группа» приобрела у Некотек оборудование для двух предприятий по производству древесных топливных гранул [Электронный ресурс] // URL: <http://www.lesprom.com/ru/news/> (дата обращения: 03.06.2018).
11. Isokangas Ari. Analysis and management of wood room [Электронный ресурс] // University of Oulu, Oulu. 2010. 115 pp. <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-6261-6> (дата обращения: 15.12.2018).
12. Isokangas A., Ala-Kaila K., Ohenoja, M., Sorsa, A., Leiviska, K. Effect of log loading on the performance of wood room. NORDIC PULP & PAPER RESEARCH JOURNAL 2014. № 29 (2). P. 201-210.

13. Палкин Е.В., Грязнов Ю.П. Анализ способов окорки тонкомерной некондиционной древесины. Химико-лесной комплекс - проблемы и решения // Материалы науч.-практической конф. Красноярск, 2001. 248 с.

14. Шегельман И.Р., Галактионов О.Н., Васильев А.С., Суханов Ю.В. Рециклинг отходов: Актуальность возрастает // Инженерный вестник Дона. 2014. Т. 30, № 2. С. 28.

15. Галактионов О.Н. Совершенствование сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов: дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2016. 315 с.

16. Палкин Е.В., Васильев А.С. Потенциал совмещения операций очистки деревьев от сучьев и коры в рамках сквозных технологий лесопромышленных производств // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 25. № 4. 52 с.

17. Палкин Е.В., Крыщенко В.Н. Повышение конкурентоспособности путем применения многооперационных деревообрабатывающих машин - лесных комбайнов // Сб. ст. студентов и молодых ученых по итогам Всерос. науч.-практической конф. Красноярск. СибГТУ, 2009. Т. 1. 194 с.

18. Палкин Е.В., Грязнов Ю.П., Цикунов В.Г. Кинематические соотношения при окорке гибкими рабочими органами круглых лесоматериалов. Химико-лесной комплекс - проблемы и решения // научно-практическая конференция. Красноярск. 2003 14. с.

19. Палкин Е.В., Курицин В.Н. Применение энергетического метода при определении силовых параметров окорки цеповыми рабочими органами. Химико-лесной комплекс - проблемы и решения // Материалы науч.-практической конф. Красноярск, 2004. 111 с.

20. Палкин Е.В., Курицин В.Н. Анализ энергетических затрат в процессе цеповой окорки древесины // Вестн. КрасГАУ. 2013. Вып. 7. С. 229-234.

#### References

1. Kunickaya O.A., Grigor'ev I.V. Processing of low-grade wood: problems and prospects // Energiya: ehkonomika, tekhnika, ehkologiya, 2015. № 9. P. 70-75.

2. Kunickaya O.A. Low-wood resources in the subjects of the Russian Federation // Nauka, obrazovanie, innovacii v prigranichnom regione: materialy respub. nauch.-prakticheskoy konf. Petrozavodsk: ООО «Verso», 2015. P. 15-17.

3. Kunickaya O.A. Low-wood as a problem of the all-Russian scale // Materialy XI mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy internet-konf. «Les Rossii v XXI veke». SPb.: SPbGLTU, 2014. P. 85-95.

4. Kunickaya O.A., Burmistrova S.S. The problem of harvesting and processing of low-grade wood in the Russian Federation / VGLTA // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauch. tr. po materialam mezhdunar. zaochnoy nauch.-prakticheskoy konf. Voronezh, 2014. № 2, Ch. 3. P. 78-82. DOI: 10.12737/3193.

5. Mohirev A.P., Aksenov N.V., Sheverev O.V. Environmental management and resource exploitation in the Krasnoyarsk region [Elektronnyj resurs] // Engineering journal of Don. E-journal. 2014. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (data obrashcheniya: 15.07.2018).

6. Mohirev A.P., Bezrukih Yu.A., Medvedev S.O. Processing of wood wastes of timber industry complex as a factor of sustainable use of natural resources [Elektronnyj resurs] // Engineering

journal of Don. E-journal. 2015. № 2, Ch. 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3011> (data obrashcheniya: 15.07.2018).

7. Ivankin A.N., Neklyudov A.D., Gorbunova N.A., Baburina M.I., Gorohov D.G. Biofuels from renewable raw materials: perspectives for production and consumption // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2008. № 6. P. 91-96.

8. Lukin A.E. Improving the efficiency of debarking group of long timber reducing wood losses and energy consumption: dis. ... kand. tekhn. nauk Arhangel'sk, 2016. 124 p.

9. "Russian timber group" will construct in the Irkutsk region factory on manufacture of pellets with a capacity of 95 thousand t in a year. «Russkaya lesnaya gruppа» postroit v Irkutskoj obl. zavod po proizvodstvu pellet moshchnost'yu 95 tys. t. v gd [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.lesprom.com/ru/news/> (data obrashcheniya: 03.06.2018).

10. "Russian forest group" acquired from Hekotek equipment for two enterprises for the production of wood fuel pellets [Elektronnyj resurs] // URL: <http://www.lesprom.com/ru/news/> (data obrashcheniya: 03.06.2018).

11. Isokangas Ari. Analysis and management of wood room [Elektronnyj resurs] // University of Oulu, Oulu. 2010. 115 pp. <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-951-42-6261-6> (data obrashcheniya: 15.12.2018).

12. Isokangas A., Ala-Kaila K., Ohenoja, M., Sorsa, A., Leiviska, K. Effect of log loading on the performance of wood room. NORDIC PULP & PAPER RESEARCH JOURNAL 2014. № 29 (2). P. 201-210.

13. Palkin E.V., Gryaznov Yu.P. Analysis of methods of debarking of thin-gauge substandard wood. Chemical-forest complex-problems and solutions // Materialy nauch.-prakticheskoy konf. Krasnoyarsk, 2001. 248 p.

14. Shegel'man I.R., Galaktionov O.N., Vasil'ev A.S., Suhanov Yh.V. Waste Recycling: Relevance increases // Engineering journal of Don. E-journal. 2014. Т. 30, № 2. 28 p.

15. Galaktionov O.N. Improvement of end-to-end technological processes of logging operations with recycling of logging waste: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Petrozavodsk, 2016. 315 p.

16. Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. Potential of combining operations of cleaning trees from twigs and bark in the framework of end-to-end technologies of timber industry // Engineering journal of Don. E-journal. 2013. Т. 25. № 4. 52 p.

17. Palkin E.V., Kryshchenko V.N. Increasing competitiveness through the use of multi-operational woodworking machines-forest harvesters // Sb. st. studentov i molodyh uchenyh po itogam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. Krasnoyarsk. SibGTU, 2009. Т. 1. 194 p.

18. Palkin E.V., Gryaznov Yu.P., Cikunov V.G. Kinematic relations at debarking by flexible working bodies of round timber. Chemical-forest complex - problems and solutions // nauchno-prakticheskayakonferenciya. Krasnoyarsk. 2003. 14 p.

19. Palkin E.V., Kuricin V.N. Application of the energy method in determining the power parameters of debarking chain working bodies. Chemical-forest complex-problems and solutions // Materialy nauch.-prakticheskoy konf. Krasnoyarsk, 2004. 111 p.

20. Palkin E.V., Kuricin V.N. Analysis of energy consumption in the process chepovoy debarking of wood // Vestn. KrasGAU. 2013. Vyp. 7. P. 229-234.