

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9103

УДК 630*231.322

Статья

Математическая модель процесса очистки порубочных остатков от минеральных загрязнений в установке барабанного типа

Трушевский Павел Владимирович

директор ООО «Сибирский биоуголь» (Калуга, Российская Федерация),

pavel.trushevskii@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Якутск, Российская Федерация), ola.ola07@mail.ru

Охлопкова Марфа Константиновна

кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова (Якутск, Российская Федерация), otk1268@mail.ru

Перфильев Павел Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация), p.perfilev@narfu.ru

Ревяко Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт, Донской государственный аграрный университет (Новочеркасск, Российская Федерация), revyako77@mail.ru

Макуев Валентин Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ имени Н. Э. Баумана (Мытищи, Российская Федерация), makuev@mgul.ac.ru

Получена: 10 октября 2025 / Принята: 10 апреля 2026 / Опубликовано: 1 мая 2026

Аннотация: Эффективная переработка порубочных остатков в большинстве случаев предусматривает их измельчение, которое выполняется при помощи мобильных рубительных машин. При этом возникает проблема, заключающаяся в загрязнённости порубочных остатков частицами почвогрунта, что приводит к быстрому износу ножей рубительных машин. Анализ показал, что

предварительная очистка порубочных остатков от минеральных частиц позволяет значительно снизить скорость резания. Ранее в качестве простого и эффективного средства очистки порубочных остатков было предложено использование мобильных установок барабанного типа, во много аналогичных мобильным окорочным барабанам. В настоящей статье представлена математическая модель, основанная на приближении образующей тела вращения, моделирующей элементы перерабатываемых порубочных остатков, на основе сплайн-интерполяции с учётом геометрических размеров предмета труда (диаметра в месте вершинного распила и длины, сбега), а также параметров их распределения. Установлено, что распределение параметров моделей порубочных остатков, образующихся при заготовке древесины сосны, соответствует логарифмически-нормальному закону распределения. Использование полученных результатов представляется перспективным при проведении исследований в области имитационного моделирования процессов переработки отходов лесосечных работ и бережливого лесопользования, совершенствования планирования и управления комплексным циклом лесопереработки.

Ключевые слова: порубочные остатки; очистка лесосек; измельчение порубочных остатков; очистка порубочных остатков

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9103

Article

Mathematical model of the process of cleaning felling residues from mineral contamination in a drum-type installation

Pavel Trushevsky

Director of Siberian Biougol LLC (Kaluga, Russian Federation), pavel.trushevskii@mail.ru

Olga Kunitskaya

D. Sc. in engineering, professor, Arctic State Agrotechnological University (Yakutsk, Russian Federation), ola.ola07@mail.ru

Marfa Okhlopkova

Ph. D. in engineering, associate professor, Northeastern Federal University named after M. K. Ammosov (Yakutsk, Russian Federation), omk1268@mail.ru

Pavel Perfiliev

Ph. D. in engineering, associate professor, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation), p.perfilev@narfu.ru

Sergey Revyako

Ph. D. in engineering, associate professor, Novochoerkassk Engineering and Land Reclamation Institute, Don State Agrarian University (Novochoerkassk, Russian Federation), revyako77@mail.ru

Valentin Makuev

D. Sc. in engineering, professor, Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi, Russian Federation), makuev@mgul.ac.ru

Received: 10 October 2025 / Accepted: 10 April 2026 / Published: 1 May 2026

Abstract: Effective processing of felling residues in most cases involves their grinding, which is performed using mobile chopping machines. However, there is a problem of felling residues contamination with soil particles, which leads to rapid wear of chopping machines knives. The analysis showed that pre-cleaning of felling residues from mineral particles can significantly reduce the cutting speed. Previously, the use of mobile drum-type installations, much similar to mobile ham drums, was proposed as a simple and effective means of cleaning chopping residues. This article presents a mathematical model based on the approximation of the rotation body generatrix, which models the

elements of processed felling residues. The model is based on spline interpolation, taking into account the geometric dimensions of the object of labor (diameter at the point of the vertex cut and length, taperage), as well as the parameters of their distribution. The authors claim that the distribution of the parameters of the models of felling residues formed during harvesting of pine wood corresponds to the logarithmically normal distribution law. The use of the obtained results seems promising when conducting research in the field of simulation modeling of waste processing of logging operations and lean forest management, improving the planning and management of a complex cycle of timber processing.

Keywords: felling residues; clearing of cutting areas; crushing of felling residues; cleaning of felling residues

1. Введение

Вопрос качественной очистки вырубок от порубочных остатков в России является большой проблемой. Особенно остро она встала с появлением в нормативной документации варианта «оставление на месте образования». При этом порубочные остатки, покрывающие лесосеку, являются существенным источником пожарной и фитопатологической опасности, препятствуют возобновлению леса [1—7]. Особенно большой проблемой в условиях лесов на многолетней мерзлоте, с резко континентальным климатом, является сильная горимость порубочных остатков, которые летом быстро высыхают и при этом крайне медленно разлагаются, из-за сильной заторможенности почвенной биоты [8—10].

Порубочные остатки потенциально являются ценным энергетическим сырьём. Известны разработки, относящиеся к производству энергетических брикетов из измельчённых отходов лесозаготовки непосредственно на лесных терминалах [11—16]. Однако обязательная операция технологического процесса их производства — операция измельчения осложняется наличием в сырье большого количества примесей в виде налипших частиц почвогрунта [12], [13], [15]. Рабочие органы оборудования для измельчения быстро приходят в негодность, их заточка требует остановки процесса производства брикетов и дополнительных затрат. Также значительно изнашивается и технологическое оборудование брикетного пресса. В этой связи перед измельчением целесообразно выполнять предварительную очистку порубочных остатков от примесей, причём способ очистки должен быть экономичным и реализуемым в условиях леса.

Известны мобильные барабанные машины, предназначенные для окорки лесоматериалов [12]. Ранее обсуждалась и возможность их использования для очистки сырья — порубочных остатков от почвогрунта [12], [13], [15]. Предварительно был получен положительный практический опыт, однако на сегодняшний день научно обоснованных сведений по обозначенному вопросу практически не представлено [12], [13], [15]. Недостаток научных результатов затрудняет обоснование параметров и режимов работы мобильного оборудования для очистки отходов лесозаготовки от налипшего почвогрунта; исследования, результаты которых изложены в настоящей статье, были направлены на его восполнение.

2. Материалы и методы

В работе [17] были представлены результаты по обоснованию параметров групповой барабанной окорки. В определённом смысле процесс барабанной окорки и процесс удаления частиц почвогрунта можно считать схожими, поскольку в обоих случаях при обработке сырья, в первом случае — брёвен, во втором случае — вершин и ветвей, происходит:

- соударение их между собой;
- трение между собой и со стенками барабана;
- удар о стенку барабана.

Были успешно реализованы математические модели, раскрывающие механику процесса разрушения коры на брёвнах при ударе о стенку барабана [17], [18]. Представлены верифицированные теоретические положения, позволяющие рассчитывать число ударов, требуемое для очистки брёвен от коры, и иные показатели, влияющие на производительность и качество барабанной окорки; модели позволяют учесть размер и физико-механические свойства лесоматериалов [17], [18]. В их основе лежат уравнения механики контактного взаимодействия, описывающие распространение напряжений в массиве коры при контакте со стенкой на основе теории удара Герца.

В меньшей степени изучено соударение брёвен и трение их о стенку барабана — эти явления сравнительно меньше сказываются на удалении коры [17], [18]. Исследуемый нами случай отличается от окорки как геометрическими параметрами предмета труда, так и меньшим сцеплением удаляемого с него слоя, в связи с чем представляется целесообразным провести дальнейшие исследования и подробнее рассмотреть эффект соударения порубочных остатков. Также следует заметить, что форма порубочных остатков будет заметно отличаться от формы брёвен, считающейся цилиндрической [17], [18], что также требует дальнейшей проработки.

3. Результаты

Как и в случае окорки брёвен, в качестве модели материала будем использовать совокупность мягких шаров. Для адекватного описания механических явлений, возникающих при обработке лесосечных отходов, параметры моделей должны отвечать следующим условиям [17]:

- диаметры шаров-моделей должны быть согласованы с переменным диаметром вершин либо ветвей в поперечном сечении;
- суммарный объём и масса шаров-моделей должны быть согласованы с объёмом обрабатываемых вершин и ветвей.

Как было установлено в результате проведённых экспериментов по изучению объёма и размерных характеристик отходов лесосечных работ на пробных площадях, объём вершин деревьев и ветвей варьируется в широких пределах, а закономерности эмпирического распределения при этом сложны и чувствительны к условиям произрастания и технологии выполнения лесосечных работ [15]. В качестве входной характеристики сырья при моделировании возможно задаться высотой и диаметром дерева в вершинном отрезе, условно считая их нормально- и логарифмически-нормально распределёнными величинами [15].

Для учёта формы рассмотрим порубочные остатки как тела вращения с образующей в виде алгебраического полинома, что позволит учесть переменный сбеги — это обстоятельство существенно с точки зрения определения объёма вершины ввиду сравнительно быстрого убывания диаметра в поперечном сечении по длине. На настоящем этапе исследований ограничимся порубочными остатками, образующимися при заготовке древесины сосны. Отметим, что для совершенствования планирования и управления комплексным

циклом лесопереработки целесообразны дальнейшие исследования по накоплению эмпирической базы по размерным и иным характеристикам порубочных остатков.

С технической точки зрения в качестве полинома-приближения удобно воспользоваться моделью кубического интерполяционного сплайна с граничными условиями в виде условий свободного провисания (естественный сплайн). Уравнение образующей, задающее функцию диаметра поперечного сечения, в таком случае будет «гибко» передавать изменение поперечного сечения предмета труда и отвечать условиям интерполяции, неразрывности и гладкости, а программная реализация решения не представляет сложности при современном развитии программных средств.

Тогда с обозначениями по рисунку 1 запишем для диаметра поперечного сечения в общем виде:

$$d_x = \left\{ \begin{array}{l} s_i(x): s_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i, \\ d_i = k_f^i d, \\ s_i(x_i) = s_{i+1}(x_i), s'_i(x_i) = s'_{i+1}(x_i), s''_i(x_i) = s''_{i+1}(x_i), \\ s'''_1(0) = s'''_n(l) = 0 \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где i — номер сечения, k_f — коэффициент формы, a, b, c — числовые коэффициенты интерполяционного сплайна, d — диаметр i -го поперечного сечения, x — продольная координата.

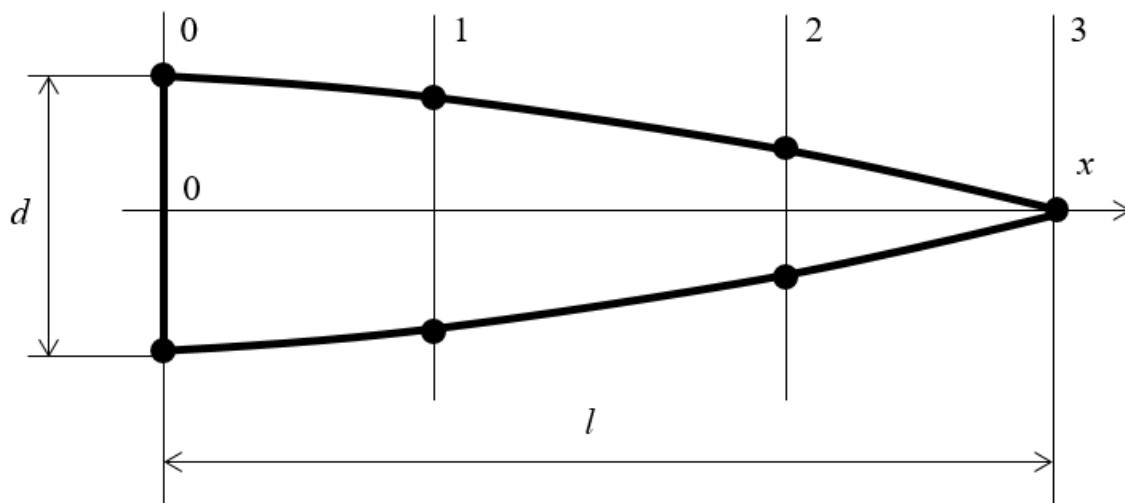


Рисунок 1. Схема к построению приближения образующей [рисунок авторов]

Figure 1. The scheme for constructing an approximation of the generatrix

Объём моделей-шаров для каждой ветви либо вершины будет являться переменной величиной вдоль оси x , согласованной с объёмом тела вращения с образующей по выражению (1) и высотой, равной d_x , тогда:

$$d_{ш,k} = \sqrt{\frac{3}{2} \int_{x_k}^{x_{k+1}} d_x^2 dx}, x_{k+1} = x_k + d_x(x_k) \quad (2)$$

Диаметр последнего шара рассчитаем по формуле

$$d_{ш,k} = \sqrt{\frac{3}{2} \int_{x_k}^l d_x^2 dx}, d_x < d_{lim} = 0,01 \quad (3)$$

Рассмотрим распределение шаров-моделей по диаметру и массе для лесосечных отходов после заготовки древесины сосны (вершины). Входные данные: диаметр d , длина l , плотность ρ считаются случайными величинами с параметрами распределения, указанными в таблице 1 по работе [15]. Также в таблице 1 указаны параметры распределения модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν , которые будут использоваться при реализации модели соударения.

Таблица 1. Параметры распределения модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν

Table 1. Distribution parameters of the elastic modulus E and the Poisson's ratio ν

Параметр	Распределение	μ	σ
Диаметр d , м	\sim LN	-2,5286	0,0983
Длина l , м	\sim N	4	0,4
Плотность ρ , кг/м ³	\sim N	760	76
Модуль упругости E , ГПа	\sim N	12,5	0,125
Коэффициент Пуассона ν	\sim N	0,25	0,025

Гистограммы распределения диаметров и масс шаров-моделей, полученные в результате обработки расчётных данных для выборки из 1000 тел вращения с образующей по формуле (3), приведены на рисунках 2, 3.

Анализ полученных данных показывает, что эмпирические законы распределения модельных значений массы и диаметра можно приблизить логарифмически-нормальным теоретическим законом с функцией плотности вероятности:

$$f_Y(y) = \frac{1}{y\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \frac{-(\ln y - \mu)^2}{2\sigma^2}, \quad (4)$$

где μ , σ — параметры теоретического закона, y — значение величины.

Для проведения расчётов была подготовлена программа, реализующая приближение образующей тела вращения, моделирующего порубочные остатки, на основе сплайн-интерполяции с учётом геометрических свойств предмета труда (диаметра в месте вершинного распила и длины, сбега), а также параметров их распределения. Программа позволяет рассчитывать характеристики шаров-моделей порубочных остатков, соударяющихся в процессе барабанной очистки от налипших частиц почвогрунта, согласующихся с размерными характеристиками обрабатываемых порубочных остатков. Включает процедуру оценки параметров логарифмически-нормального распределения величин диаметров и масс модельных шаров. Полученные результаты далее используем при моделировании соударений в ходе очистки порубочных остатков от налипшего почвогрунта.

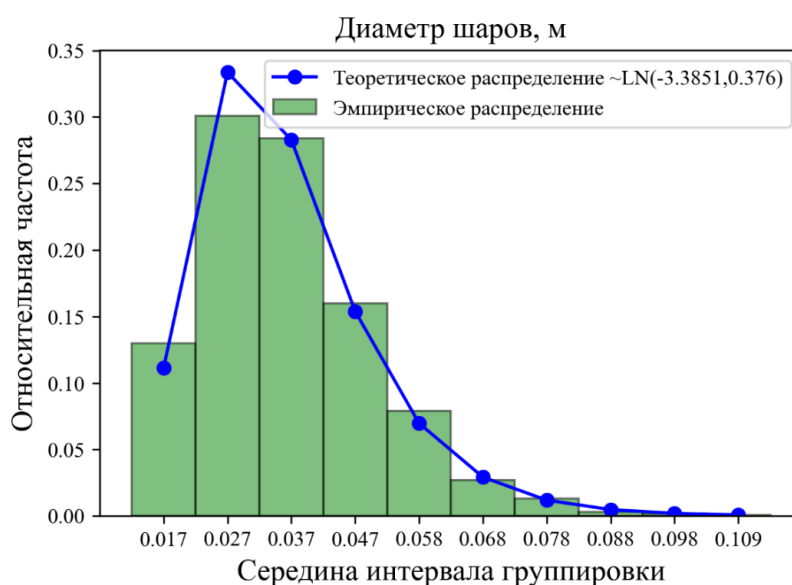


Рисунок 2. Распределение диаметра модельных шаров (порубочные остатки после заготовки древесины сосны) [рисунок авторов]

Figure 2. Distribution of the diameter of the model balls (felling residues after pine wood harvesting)

В таблице 2 приведены статистические характеристики для полученных параметров распределения модельных выборок шаров.

Таблица 2. Статистические данные для модельных выборок шаров

Table 2. Statistical data for model ball samples

Величина y	Распределение	Параметры распределения		Статистика χ^2
		μ	σ	
Диаметр $d_{ш}$, м	$\sim LN$	-3,3851	0,376	0,8801
Масса $m_{ш}$, м	$\sim LN$	-3,3007	0,1403	0,7129

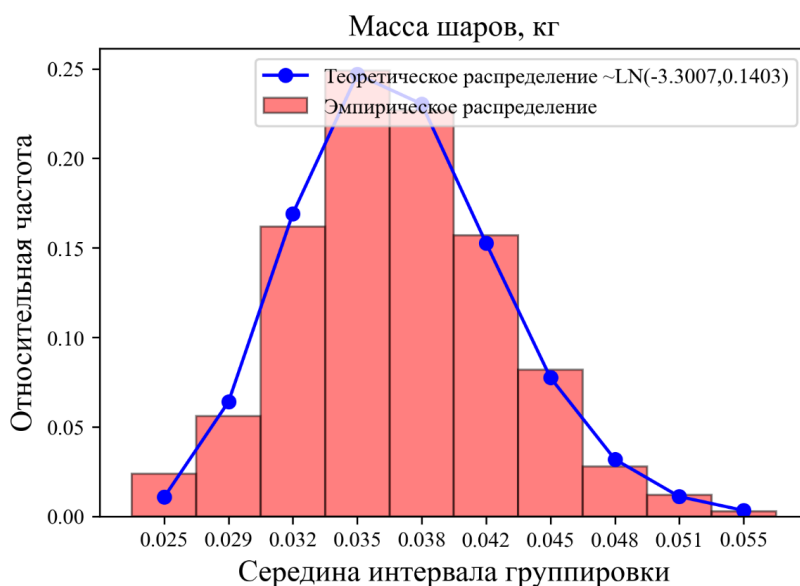


Рисунок 3. Распределение массы модельных шаров (порубочные остатки после заготовки древесины сосны) [рисунок авторов]

Figure 3. Mass distribution of model balls (felling residues after harvesting pine wood)

При разработке и исследовании модели соударения порубочных остатков между собой будем ориентироваться на работу [19], где подробно изложены теоретические положения, образующие модель контактного взаимодействия, результативно использованные при моделировании процессов, происходящих при соударении тел самой различной формы [17], [18], [20], [21]. Приведём основные уравнения, используемые при исследовании контактного взаимодействия сырья.

Контактная сила, возникающая при соударении двух шаров с различной массой, определяется уравнением [19]

$$P = m_1 \frac{dv_1}{dt} = -m_2 \frac{dv_2}{dt}, \quad (5)$$

где индексы «1» и «2» вводятся для пары рассматриваемых шаров, m — масса шара, v — скорость центра тяжести шара, t — время.

Для последующих преобразований равенства (5) удобно переписать в виде:

$$-\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} P = \frac{d}{dt} (v_2 - v_1) = \frac{d^2 h}{dt^2}, \quad (6)$$

где h — контактное сближение центров тяжести шаров.

Из решения задачи о деформации пары соударяющихся мягких шаров-моделей также следует равенство [19]

$$P = kh^{\frac{3}{2}}, \quad (7)$$

где k — приведённая жёсткость [19]:

$$k = \frac{4}{3} R^{\frac{1}{2}} E^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

где использованы обозначения:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (10)$$

где R — радиус, E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона.

На основании второго закона Ньютона следует:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = -k h^{\frac{3}{2}}, \quad (11)$$

где m — приведённая масса:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (12)$$

Контактное сближение является функцией времени, $h = h(t)$, интегрирование (11) с учётом начального условия

$$V = \left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=0} = v_2 - v_1|_{t=0}, \quad (13)$$

где V — начальная скорость сближения центров тяжести шаров, приводит к следующей записи [19]:

$$\frac{1}{2} \left(V^2 - \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \right) = \frac{5}{2} \frac{k}{m} h^{\frac{5}{2}}. \quad (14)$$

По уравнению (14) найдём величину h^* , соответствующую условию $\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=t^*} = 0$, т. е. максимальное контактное сближение [19]:

$$\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=t^*} = 0, h^* = \left(\frac{5mV^2}{4k} \right)^{\frac{2}{5}} = \left(\frac{15mV^2}{16R^{\frac{1}{2}}E^{\frac{3}{2}}} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (15)$$

С учётом уравнения для перемещения при переменной скорости из уравнения (14) следует формула, связывающая время контакта и сближение центров тяжести шаров [19]:

$$t = \frac{h^*}{V} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{h}{h^*} \right)^{\frac{5}{2}}}} d \frac{h}{h^*}, \quad (16)$$

тогда для времени удара (вплоть до достижения значения сближения $h = h^*$) запишем по [19]:

$$T = 2t^* = \frac{2h^*}{V} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{h}{h^*}\right)^2}} d\frac{h}{h^*} \approx 2,94 \frac{h}{V} \approx 2,87 \left(\frac{m^2}{RE^2V}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Таким образом, приведены уравнения для расчёта времени удара и максимальной силы при контакте шаров-моделей с учётом их геометрических параметров и физико-механических свойств. Получено уравнение для приближения закономерности изменения контактной силы за время удара [19]:

$$P(t) = P^* \sin \omega t = P^* \sin \frac{\pi t}{2t^*}. \quad (18)$$

Скорость V найдём следующим образом. Рассмотрим свободное падение шара «1» и положим, что в момент столкновения шар «2» неподвижен, тогда:

$$v_1 = \sqrt{2g(D - d_1)}, v_2 = 0, V = v_1 + v_2 = \sqrt{2g(D - d_1)}. \quad (19)$$

где D — диаметр барабана, g — ускорение свободного падения.

После определения основных зависимостей, характеризующих взаимодействие шаров-моделей, перейдём непосредственно к вопросу очистки сырья от налипших частиц грунта. Для случая барабанной окорки при определении числа ударов, необходимого для удаления коры, учитывают случайных характер процесса [22—24] и рассматривают сумму элементарных площадей поверхности бревна, контактировавшей со стенками барабана [17], [18].

Механизм очистки порубочных остатков изучен на сегодняшний день слабо, однако в смежных областях знания подобные процессы описывают с учётом вибрации материала, возникающей в результате ударного воздействия [25], [26]. В нашей работе воспользуемся следующими соображениями:

- степень загрязнения порубочных остатков почвогрунтом охарактеризуем некоторой долей площади поверхности модельного шара;
- рассмотрим перемещение элементарного сечения модели при колебании после удара как функцию времени, тогда произведение пути и длины контура сечения по размерности будет соответствовать площади;
- условимся считать эту площадь очищенной от частиц почвогрунта, которые много жёстче лесосечных отходов и могут считаться недеформируемыми.

Запишем в общем виде уравнение колебаний тела с учётом затухания (схема на рисунке 4) [25]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + cx = F(t), \quad (20)$$

где m — масса тела, n — коэффициент демпфирования, c — жёсткость, $F(t)$ — сила, воздействующая на тело.

Запишем с учётом времени удара T и функции контактной силы от времени $P(t)$:

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} + n_1 \frac{dx_1}{dt} + kx_1 = P(t) \text{Heaviside}(T - t), \quad (21)$$

$$x_1|_{t=0} = 0, \frac{dx_1}{dt}|_{t=0} = v_1$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + n_2 \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = P(t)\text{Heaviside}(T - t),$$

$$x_2|_{t=0} = 0, \frac{dx_2}{dt}|_{t=0} = v_2$$

Из решения уравнений (21) получим перемещения элементарных сечений шаров и скорости, с которыми они совершаются. Тогда путь как сумму перемещений найдём по известной формуле математического анализа:

$$s = \int_0^t \sqrt{1 - \left(\frac{dx}{dt}\right)^2} dt. \quad (22)$$

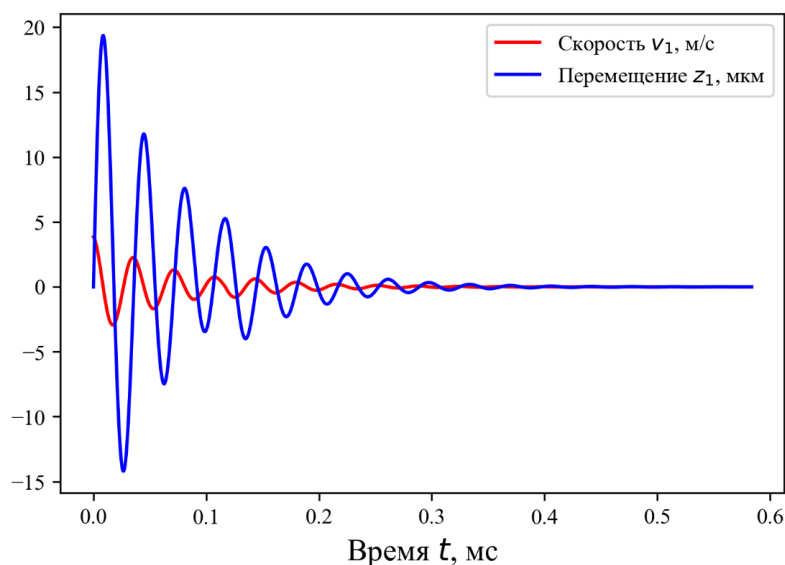
Характерный пример решения уравнений (21) для пары шаров с параметрами по таблице 1 приведён на рисунке 4.

С учётом суммарной площади, «затронутой» колебаниями, возникающими после соударения шаров, запишем для доли поверхности шара, очищенной от налипшего грунта:

$$S_{\text{ш}} = \frac{s\pi d_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}}, \quad (23)$$

где F — площадь поверхности шара с диаметров $d_{\text{ш}}$, а число соударений, требуемое для полной очистки от налипшего почвогрунта, определится так:

$$N = \left\lceil \frac{F_{\text{ш}}}{S_{\text{ш}}} \right\rceil + 1. \quad (24)$$



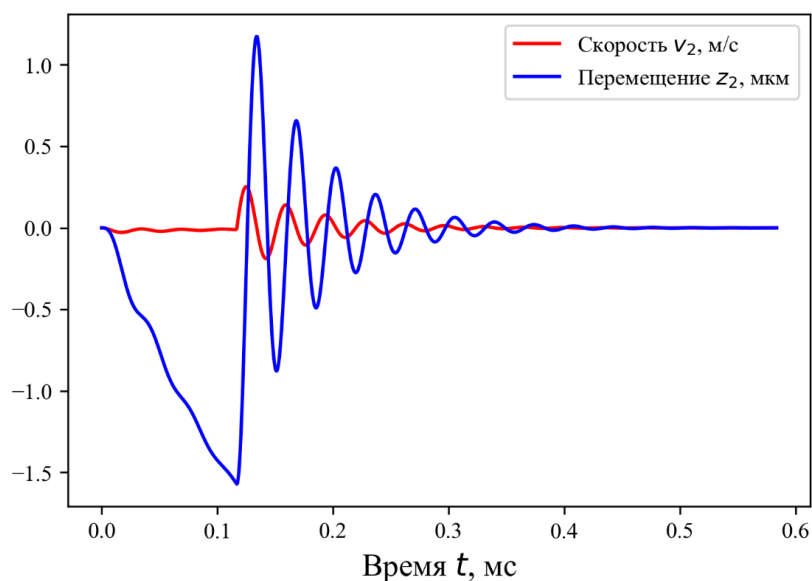


Рисунок 4. Пример решения уравнений колебаний шаров-моделей после соударения [рисунок авторов]

Figure 4. An example of solving the equations of oscillation of model balls after a collision

Для проведения расчётов по сформулированной математической модели процесса очистки порубочных остатков подготовлена компьютерная программа, позволяющая моделировать процесс при варьировании параметров соударяющихся тел. Программа реализует имитационную математическую модель соударения мягких шаров-моделей порубочных остатков в процессе очистки от налипших частиц почвогрунта. Расчёты выполняются при варьировании массы и размерных характеристик, а также механических свойств шаров-моделей с учётом статистических законов распределений. Основу модели соударения, реализованной в программе, составляют уравнения механики контактного взаимодействия и динамики, учитывающие нелинейные функции контактной силы от деформации соударяющихся тел. В результате получены гистограммы прогнозируемого числа соударений (оборотов барабана), которое потребуется для очистки порубочных остатков (рисунок 5). Анализ полученных данных показывает, что требуемое число ударов распределено по закону, соответствующему логарифмически-нормальному закону распределения с параметрами: $\mu = -3,3007$, $\sigma = 0,1403$. В таком случае степень очистки порубочных остатков — доля шаров-моделей, очищенных от почвогрунта, связана с числом соударений (числом оборотов барабана) в соответствии с графиком, приведённым на рисунке 6.

Важно, что частота вращения барабана должна быть ограничена, в противном случае обрабатываемые порубочные остатки окажутся прижатыми к стенкам центробежной силой и соударений происходить не будет. Критическая частота вращения для машин барабанного типа обоснована в работе [26] и при диаметре барабана $D = 0,8$ м составляет 30 об./мин.

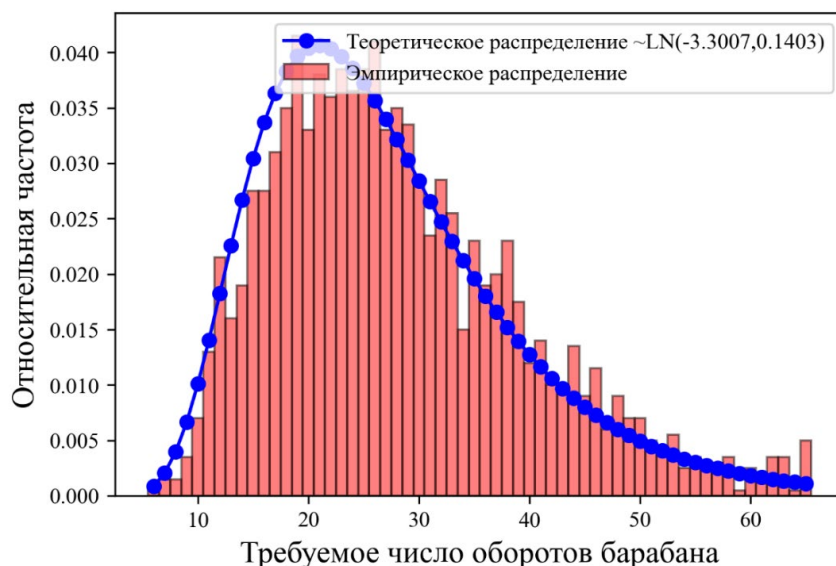


Рисунок 5. Число ударов (оборотов барабана), требующееся для очистки порубочных остатков от налипшего почвогрунта (сосна) [рисунок авторов]

Figure 5. The number of strokes (revolutions of the drum) required to clean the felling residues from the adhering soil (pine)

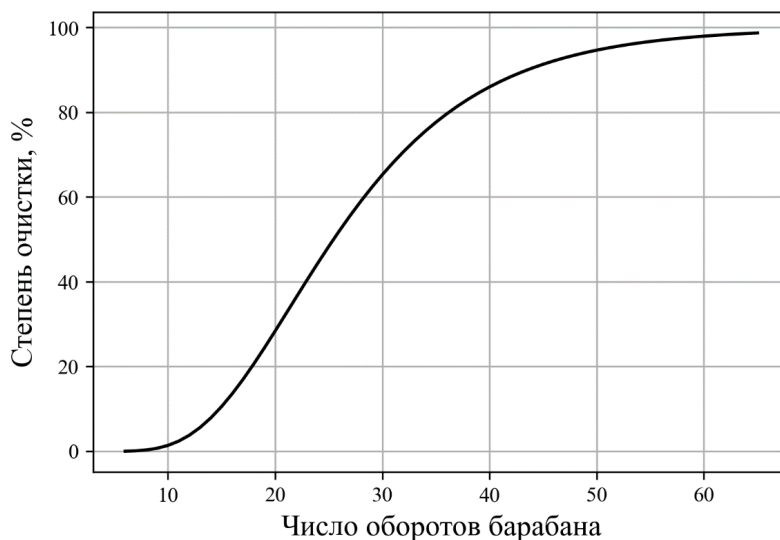


Рисунок 6. Связь степени очистки порубочных остатков от налипших частиц почвогрунта и числа оборотов барабана (порубочные остатки после заготовки древесины сосны, диаметр барабана 0,8 м) [рисунок авторов]

Figure 6. Relationship between the degree of felling residues cleaning from adhering soil particles and the number of drum revolutions (felling residues after pine wood harvesting, drum diameter 0.8 m)

Проиллюстрируем применение полученных результатов моделирования для оценки производительности операции очистки порубочных остатков от налипших частиц почвогрунта. При диаметре барабана $D = 0,8$ м, коэффициенте загрузки $K_6 = 0,6$ и коэффициенте полндревесности порубочных остатков $K_d = 0,25$ получим прогноз производительности очистки с учётом требуемой степени в соответствии с графиком на рисунке 7.

Таким образом, при степени очистки более 80 % прогнозируемая производительность составит 15—25 пл. м³/ч по сырью. Реализация вычислений показывает, что подготовленная программа позволяет рассчитать параметры закона распределения числа соударений, требующихся для заданной степени очистки порубочных остатков, а также оценить производительность машины барабанного типа, использующейся при обработке сырья.

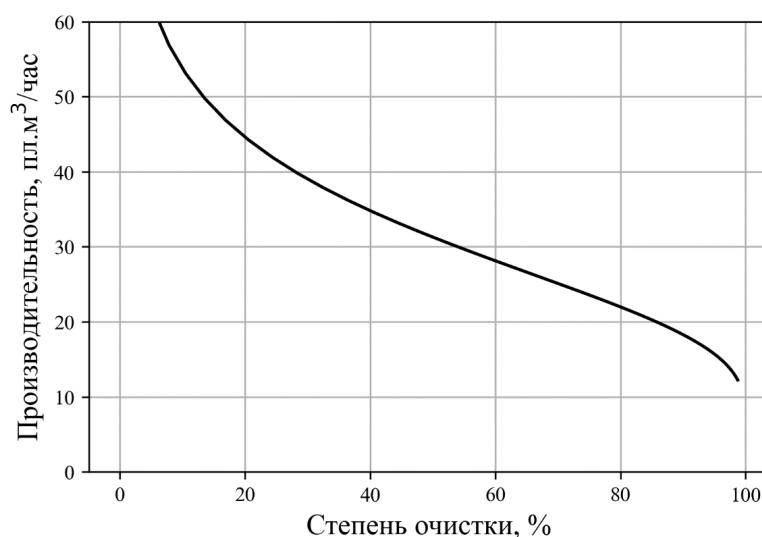


Рисунок 7. Прогнозируемая производительность операции очистки порубочных остатков от налипших частиц почвогрунта и степени очистки (порубочные остатки после заготовки древесины сосны, диаметр барабана 0,8 м) [рисунок авторов]

Figure 7. Projected productivity of the operation of felling residues cleaning from adhering soil particles and the degree of cleaning (felling residues after pine wood harvesting, drum diameter 0.8 m)

4. Обсуждение и заключение

Таким образом, в результате выполненных исследований разработаны математическая модель и программа, реализующая приближение образующей тела вращения, моделирующего порубочные остатки, на основе сплайн-интерполяции с учётом геометрических свойств предмета труда (диаметра в месте вершинного распила и длины, сбега), а также параметров их распределения. Программа позволяет рассчитывать характеристики шаров-моделей порубочных остатков, соударяющихся в процессе барабанной очистки от налипших частиц почвогрунта, согласующихся с размерными характеристиками обрабатываемых

порубочных остатков; включает процедуру оценки параметров логарифмически-нормального распределения величин диаметров и масс модельных шаров.

В результате проведённых расчётов установлено, что распределение параметров моделей порубочных остатков, образующихся при заготовке древесины сосны, соответствует логарифмически-нормальному закону распределения. В частности, в исследуемом случае параметры распределения для масс и диаметров указаны в таблице 2.

Сформулирована математическая модель и подготовлена программа, позволяющая рассчитывать показатели процесса соударения порубочных остатков при варьировании параметров соударяющихся тел. Программа реализует имитационный подход, расчёты выполняются при варьировании массы и размерных характеристик, а также механических свойств моделей с учётом статистических законов их распределений. Основу модели соударения, реализованной в программе, составляют уравнения механики контактного взаимодействия и динамики, учитывающие нелинейные функции контактной силы от деформации соударяющихся тел. Программа позволяет рассчитать параметры закона распределения числа соударений, требующихся для заданной степени очистки порубочных остатков, а также оценить производительность машины барабанного типа, использующейся при обработке сырья.

Анализ полученных данных показывает, что требуемое число ударов распределено по закону, соответствующему логарифмически-нормальному закону распределения с параметрами: $\mu = -3,3007$, $\sigma = 0,1403$. В таком случае степень очистки порубочных остатков — доля шаров-моделей, очищенных от почвогрунта, связана с числом соударений (числом оборотов барабана) в соответствии с графиком, приведённым на рисунке 6.

Расчёты показали, что при степени очистки от почвогрунта более 80 % прогнозируемая производительность барабанной машины составит 15—25 пл. м³/ч по сырью. Реализация вычислений показывает, что подготовленная программа позволяет рассчитать параметры закона распределения числа соударений, требующихся для заданной степени очистки порубочных остатков, а также оценить производительность машины барабанного типа, использующейся при обработке сырья.

Таким образом, использование полученных результатов представляется перспективным при проведении исследований в области имитационного моделирования процессов переработки отходов лесосечных работ и бережливого лесопользования, совершенствования планирования и управления комплексным циклом лесопереработки, однако для этого целесообразны дальнейшие исследования по накоплению эмпирической базы по размерным и иным характеристикам порубочных остатков.

Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 23-16-00092/, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Список литературы

1. Запасы лесных горючих материалов в ельниках-черничниках / М. А. Салямова, О. И. Григорьева, Е. Ю. Матвиенко [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 2 (20). С. 17—27.
2. Характеристики горючести лесных горючих материалов в ельниках-черничниках / М. А. Салямова, О. И. Григорьева, Е. Ю. Матвиенко [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2025. № 3 (21). С. 4—18.
3. Новые технические и технологические решения в сфере тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, В. А. Савченкова, И. В. Григорьев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2024. Т. 28, № 4. С. 66—77.
4. Оценка лесовосстановления в Республике Саха (Якутия) / О. Х. Блашкевич, Н. Е. Горохова, А. А. Назаров [и др.] // Вестник АГАТУ. 2024. № 4 (16). С. 67—137.
5. *Гринько О. И., Должиков И. С., Григорьева О. И.* Лесопожарные комплексы на базе мини-тракторов // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всерос. научно-практ. конф. / Под ред. Ю. М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 101—105.
6. Исследование применения иглофильтров в составе вакуумных установок для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами / А. С. Лоренц, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 124—129.
7. *Гринько О. И., Григорьева О. И., Григорьев И. В.* Влияние лесных пожаров на лесную экосистему // Вестник АГАТУ. 2023. № 3 (11). С. 45—72.
8. *Рудов С. Е., Григорьева О. И., Григорьев И. В.* Эффективное восстановление лесов на вечной мерзлоте // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2022. С. 38—41.
9. *Григорьева О. И., Гринько О. И., Николаева Ф. В.* Весенний отжиг для снижения пожароопасности лесов // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Восьмой Всерос. национал. научно-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2022. С. 54—55.
10. Долгосрочные последствия воздействия движителей лесных машин на почвогрунты северных лесов / В. М. Дьяченко, В. А. Каляшов, И. С. Должиков [и др.] // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2024. № 3 (15). С. 22—31.
11. Исследование энергетического баланса лесных терминалов, функционирующих на биотопливных источниках энергии / И. А. Маганов, Е. А. Тихонов, С. В. Петруша [и др.] // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14, № 3 (55). С. 5—22.
12. Анализ технических и технологических решений очистки лесосек от порубочных остатков / П. В. Трушевский, О. А. Куницкая, И. С. Должиков [и др.] // Resources and Technology. 2023. Т. 20, № 4. С. 89—138.
13. *Трушевский П. В., Николаев В. В., Григорьев И. В.* Пути повышения эффективности использования порубочных остатков в энергетических целях на лесных терминалах // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. науч. конф. учёных и студентов. Воронеж, 2024. С. 198—202.
14. Пути повышения эффективности лесозаготовительных работ за счёт использования порубочных остатков / П. В. Трушевский, В. В. Николаев, И. В. Григорьев [и др.] //

Лесной и химический комплексы — проблемы и решения: Сб. материалов по итогам XXX Всерос. научно-практ. конф. Красноярск, 2024. С. 78—81.

15. Определение доступного запаса порубочных остатков на лесосеке после сплошной рубки по скандинавской технологии / П. В. Трушевский, И. С. Должиков, И. В. Григорьев [и др.] // *Resources and Technology*. 2024. Т. 21, № 3. С. 57—74.
16. Трушевский П. В., Куницкая О. А., Николаев В. В. Конструктивные решения мобильных установок для производства биотоплива из измельчённой древесины // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. научно-практ. конф. молодых учёных и студентов. Воронеж, 2023. С. 183—188.
17. Шатино В. Я., Григорьев И. В., Гулько А. Е. Анализ методов расчёта параметров и обоснование математической модели разрушения коры при групповой окорке древесины // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 8 (121). С. 92—96.
18. Гулько А. Е. Повышение эффективности производства технологической щепы при барабанной окорке: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. СПб., 2013. 197 с.
19. Johnson K. L. Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University press, 1987. 452 p.
20. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 224 с.
21. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.
22. Бойков С. П. Теория процессов очистки древесины от коры. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. 152 с.
23. Исследование закономерностей изменения силы соударений с целью снижения потерь при окорке древесины в барабане / С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников, Ю. В. Никонова [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2008. № 185. С. 195—202.
24. Васильев С. Б., Доспехова Н. А., Колесников Г. Н. Численное моделирование взаимодействия еловых балансов неодинакового диаметра в корообдирочном барабане // *Resources and Technology*. 2013. Т. 10, № 1. С. 24—38.
25. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний. Л.: Наука, 1989. 252 с.
26. Олевский В. А. Размольное оборудование обогатительных фабрик. М.: ГНТИ литературы по горному делу, 1963. 448 с.

References

1. Salamova M. A., Grigoreva O. I., Matvienko E. Yu., Kalita G. A., Nikolaeva F. V. Reserves of forest combustible materials in spruce-blueberry forests. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2025, no. 2 (20), pp. 17—27. (In Russ.)
2. Salamova M. A., Grigoreva O. I., Matvienko E. Yu., Kalita G. A., Nikolaeva F. V. Characteristics of combustibility of forest combustible materials in spruce forests. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2025, no. 3 (21), pp. 4—18. (In Russ.)
3. Grigoreva O. I., Savchenkova V. A., Grigorev I. V., Dolzhikov I. S., Lorenz A. S., Grinko O. I. New technical and technological solutions in the field of extinguishing forest fires. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 66—77. (In Russ.)
4. Blashkevich O. Kh., Gorokhova N. E., Nazarov A. A., Dolzhikov I. S., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Assessment of reforestation in the Republic of Sakha (Yakutia). *AGATHU's Messenger*, 2024, no. 4 (16), pp. 67—137. (In Russ.)

5. Grinko O. I., Dolzhikov I. S., Grigoreva O. I. Forest fire complexes based on mini tractors. *Actual problems of forestry and wood processing: Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Edited by Yu. M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023, pp. 101—105. (In Russ.)
6. Lorenz A. S., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Ryabukhin P. B. Investigation of the use of needle filters as part of vacuum installations to increase the effectiveness of forest fire control. *Systems. Methods. Technologies*, 2023, no. 4 (60), pp. 124—129. (In Russ.)
7. Grinko O. I., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. The impact of forest fires on the forest ecosystem. *AGATHU's Messenger*, 2023, no. 3 (11), pp. 45—72. (In Russ.)
8. Rudov S. E., Grigoreva O. I., Grigorev I. V. Effective restoration of forests on permafrost. *Forest engineering, materials science and design. Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation)*. Minsk, 2022, pp. 38—41. (In Russ.)
9. Grigoreva O. I., Grinko O. I., Nikolaeva F. V. Spring annealing to reduce the fire hazard of forests. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2022, pp. 54—55. (In Russ.)
10. Dyachenko V. M., Kalyashov V. A., Dolzhikov I. S., Dmitriev A. S., Guryev A. Yu., Novgorodov D. V., Novikov M. S. Long-term effects of the impact of forest machinery propellers on the soils of northern forests. *Occupational safety and health in logging and woodworking industries*, 2024, no. 3 (15), pp. 22—31. (In Russ.)
11. Maganov I. A., Tikhonov E. A., Petrusha S. V., Trushevsky P. V., Morkovin V. A., Kunitskaya O. A. Investigation of the energy balance of forest terminals operating on biofuel energy sources. *Lesotechnical journal*, 2024, vol. 14, no. 3 (55), pp. 5—22. (In Russ.)
12. Trushevsky P. V., Kunitskaya O. A., Dolzhikov I. S., Makuyev V. A., Revyako S. I., Grigoreva O. I. Analysis of technical and technological solutions for clearing logging areas from logging residues. *Resources and Technology*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 89—138. (In Russ.)
13. Trushevsky P. V., Nikolaev V. V., Grigorev I. V. Ways to increase the efficiency of using felling residues for energy purposes at forest terminals. *Energy-saving and environmentally friendly technologies of the timber industry. Proceedings of the International Scientific Conference of Scientists and Students*. Voronezh, 2024, pp. 198—202. (In Russ.)
14. Trushevsky P. V., Nikolaev V. V., Grigorev I. V., Baranov A. N. Ways to increase the efficiency of logging operations through the use of felling residues. *Forest and chemical complexes - problems and solutions: Collection of materials on the results of the XXX All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2024, pp. 78—81. (In Russ.)
15. Trushevsky P. V., Dolzhikov I. S., Grigorev I. V., Grigoreva O. I., Revyako S. I., Baranov A. N. Determination of the available reserve of felling residues in a logging area after continuous logging using Scandinavian technology. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 57—74. (In Russ.)
16. Trushevsky P. V., Kunitskaya O. A., Nikolaev V. V. Constructive solutions for mobile installations for the production of biofuels from crushed wood. *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students*. Voronezh, 2023, pp. 183—188. (In Russ.)
17. Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Gulko A. E. Analysis of methods for calculating parameters and substantiation of a mathematical model of bark destruction during group hauling of wood. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University*, 2011, no. 8 (121), pp. 92—96. (In Russ.)

18. Gulko A. E. *Improving the efficiency of production of technological chips during drumming*: Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.21.01. Saint Petersburg, 2013. 197 p. (In Russ.)
19. Johnson K. L. *Contact mechanics*. Cambridge, Cambridge University press, 1987. 452 p.
20. Kolesnikov Yu. V., Morozov E. M. *Mechanics of contact fracture*. Moscow, LKI Publishing House, 2010. 224 p. (In Russ.)
21. Morozov E. M., Zernin M. V. *Contact problems of destruction mechanics*. Moscow, Book house «LIBROCOM», 2010. 544 p. (In Russ.)
22. Boikov S. P. *Theory of processes of cleaning wood from bark*. Leningrad, Publishing house of Leningrad State University, 1980. 152 p. (In Russ.)
23. Vasiliev S. B., Kolesnikov G. N., Nikonova Yu. V., Rakovskaya M. I. Investigation of patterns of changes in the impact force in order to reduce losses during chopping of wood in a drum. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy*, 2008, no. 185, pp. 195—202. (In Russ.)
24. Vasiliev S. B., Dospekhova N. A., Kolesnikov G. N. Numerical modeling of the interaction of spruce balances of unequal diameter in a bark and grease drum. *Resources and Technology*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 24—38. (In Russ.)
25. Panovko Ya. G. *Introduction to the theory of mechanical vibrations*. Leningrad, Nauka, 1989. 252 p. (In Russ.)
26. Olevsky V. A. *Grinding equipment of processing plants*. Moscow, GNTI literature on mining, 1963. 448 p. (In Russ.)

© Трушевский П. В., Куницкая О. А., Охлопкова М. К.,
Перфильев П. Н., Ревяко С. И., Макуев В. А., 2026