

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СБОРА ЩЕПЫ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ

А.А. Платонов^{1✉}, С.В. Прокопенко¹, М.А. Платонова²

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), Россия, 39408, Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

²АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, д. 73а
paa7@rambler.ru

Рассмотрено современное состояние технических средств измельчения порубочных остатков в России и в мире. Показана перспективность создания нового измельчителя, обеспечивающего направленный сбор щепы в приемный контейнер в условиях ограниченного пространства выполнения лесохозяйственных работ. Представлена математическая модель системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков, позволяющая исследовать воздействие на показатели эффективности такого сбора более 25 конструктивно-технологических параметров как самого измельчителя, так и режимов его применения. Раскрыта зависимость максимальной амплитуды смещения штока привода подвижного патрубка указанной системы от взаимного расположения и геометрических характеристик контейнера для щепы и патрубка, в том числе от величины максимального угла его поворота. Выявлено, что увеличение в 10 раз объема насыпающейся в приемный контейнер щепы при часовой производительности измельчителя 2,5...4,5 м³/ч приводит к возрастанию требуемого времени насыпания на 12...21,6 мин. Установлена частота колебаний подвижного патрубка 0,08...0,17 Гц (5...10 мин⁻¹) для наиболее полного заполнения приемного контейнера щепой. Изложенные результаты можно использовать на производственных предприятиях, занимающихся содержанием и эксплуатацией территорий различных объектов.

Ключевые слова: нежелательная растительность, измельчение, щепа, сбор, приемный контейнер, подвижный патрубок, частота колебаний, амплитуда

Ссылка для цитирования: Платонов А.А., Прокопенко С.В., Платонова М.А. Математическое и имитационное моделирование системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 5. С. 148–158. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-148-158

В современном лесном хозяйстве задача рационального использования лесных ресурсов требует срочного решения. Одним из перспективных направлений при этом является внедрение инновационных технологий лесозаготовки и деревопереработки, ориентированных на сокращение или полную ликвидацию формирующихся отходов. В условиях, когда образование таких отходов является неотъемлемой частью процесса например, в рамках лесохозяйственной деятельности при очистке территорий линейных инфраструктурных объектов от нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР), ключевым направлением устойчивого развития лесного хозяйства становится эффективное вовлечение в хозяйственный оборот образующихся древесных отходов и низкокачественной древесины путем их трансформации в ценную технологическую и топливную щепу.

В рамках традиционных технологий и используемого для них оборудования при измельчении порубочных остатков есть возможность выбора способа выгрузки щепы: на поверхность земли либо непосредственно в грузовой отсек транспортного средства. Однако при ограниченных площадях, предназначенных для выполнения лесохозяйственных работ, и невозможности направленного размещения щепы на очищаемой территории уместно осуществлять сбор измельченных порубочных остатков в приемную емкость. Особую значимость при этом приобретает задача модернизации конструкций измельчителей порубочных остатков, способных эффективно осуществлять целенаправленный сбор образующейся технологической или топливной щепы.

На основе всестороннего анализа современных научных трудов российских и зарубежных исследователей, посвященных данной тематике, было выявлено, что центральное место в их работах занимают создание и оптимизация конструктивных элементов как принципиально

нового, так и существующего оборудования, осуществляющих непосредственное измельчение порубочных остатков. Так, в работах [1–5] авторы изложили материалы выполненных исследований по оптимизации мощности, скорости вращения, количества режущих ножей, способов подачи перерабатываемых порубочных остатков в машину и отводу от нее щепы, а также представили математические модели, позволяющие рассчитать необходимые рабочие параметры измельчения древесины для определенных значений скорости движения машины или скорости вращения барабана [6]. Пристальное внимание современные исследователи уделяют производительности различных систем измельчения лесной биомассы [7], их энергопотреблению [8] и эргономической составляющей выполняемых работ [9], в том числе в целях выявления областей для дальнейших исследований. В частности, в работе [10] проанализированы факторы задержки технологических операций при измельчении древесины на лесных придорожных площадках. Акцентируется внимание исследователей также на характеристиках формирующейся древесной щепы [11], влиянии на щепу видовой принадлежности измельчаемых порубочных остатков [12, 13], оценивается воздействие условий хранения щепы на ее энергетические свойства [14] и возможность возгорания за счет самонагрева [15–17], в том числе в прессованных тюках. Так, в работах [18, 19] представлены материалы исследований эффективности уплотнения древесной щепы с помощью промышленного компактора, а также показано, что измельченная древесина, спрессованная в тюки, обернутые водонепроницаемой пленкой, может стать эффективным решением при использовании традиционной лесохозяйственной техники, а погрузка и транспортировка тюков со щепой могут осуществляться с помощью оборудования, обычно используемого в других агролесоводческих работах, в частности фронтальных погрузчиков для тракторов.

В некоторых работах, особенно зарубежных, щепа рассматривается как потенциальный источник дохода от лесозаготовительных работ [20–22], в том числе с учетом незаконной добычи лесных ресурсов [23], как источник биоэнергии [24–30].

Отдельно отметим немногочисленные работы отечественных ученых в рассматриваемой области направленного сбора щепы. В исследовании коллектива авторов [31] обоснованы оптимальные технологические процессы и технические решения для производства топливной щепы с применением мобильных рубильных

установок, оснащенных интегрированными накопительными бункерами. Полученная щепа перегружается в съемные контейнеры автопоездов, размещаемые на лесосеках, для последующей транспортировки к энергетическим объектам.

Особый интерес вызывает цикл работ [32–34], посвященных исследованию и совершенствованию технологий измельчения порубочных остатков с их загрузкой в мягкие контейнеры, в которых представлены разработанные математические модели существующего технологического процесса уборки энергетической ивы с использованием мягких контейнеров, проведены имитационные эксперименты и даны рекомендации по применимости такой технологии в небольших фермерских хозяйствах, а также по организации поставок щепы с применением водных артерий [35].

Обзор литературы в целом продемонстрировал перспективность создания нового измельчителя порубочных остатков, обеспечивающего направленный сбор технологической или топливной щепы в приемный контейнер. Теоретические аспекты проектирования и функционирования таких устройств изучены не в полном объеме, что обуславливает потребность в углублении исследований, в частности, с помощью математического моделирования.

Цель работы

Цель работы — повышение эффективности направленного сбора щепы в условиях узкоограниченного пространства, предусмотренного для выполнения лесохозяйственных работ, путем обоснования параметров измельчителя порубочных остатков на основе математического и имитационного моделирования.

Материалы и методы

Изучен измельчитель порубочных остатков, приводимый в движение от вала отбора мощности трактора типа BELARUS-82.1. Основное внимание уделено его конструктивно-технологическим характеристикам и режимам работы при измельчении НДКР, что послужило предметом исследования. Предлагается конструктивно-технологическая схема системы, предназначенной для сбора щепы от измельчителя, позволяющая формировать направленный поток измельченных порубочных остатков даже в условиях ограниченного пространства, что обеспечивает их эффективную подачу в расположенную поблизости приемную емкость. Для равномерного заполнения емкости, увеличения ее

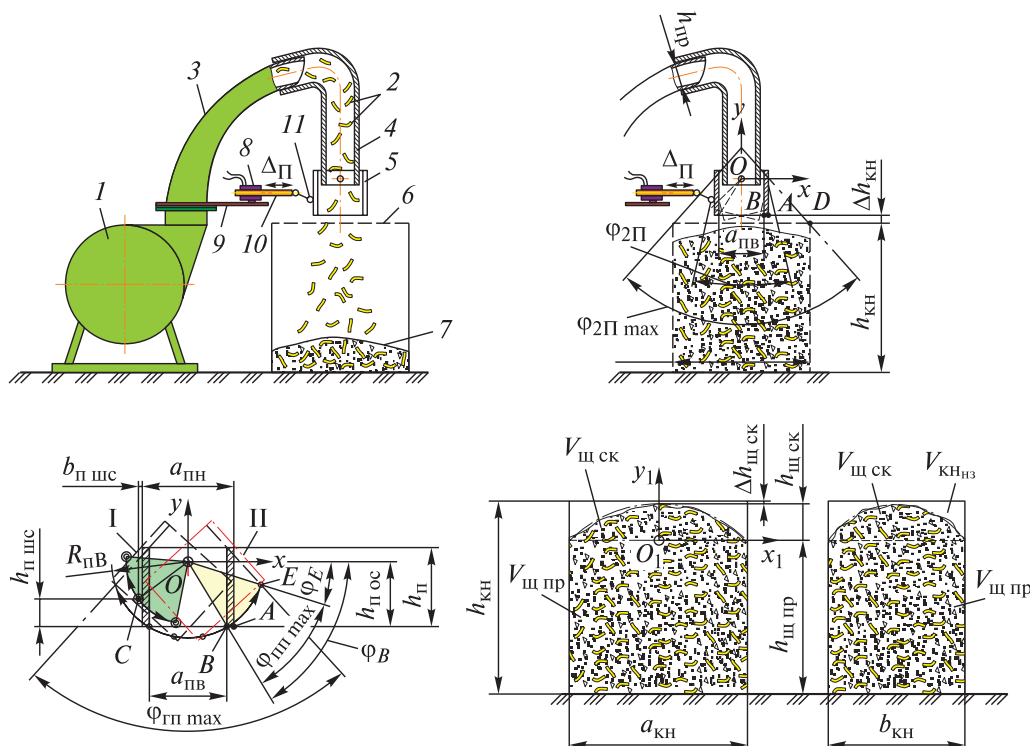


Рис. 1. Элементы формирования насыпи щепы в приемном контейнере
Fig. 1. Elements of forming a wood chip mound in a receiving container

вместимости и снижения затрат на утилизацию порубочных остатков, измельченным частицам придается дополнительный направленный импульс, достигаемый с помощью подвижного патрубка, который управляется линейным актуатором. На разработанную конструкцию получен патент на полезную модель [36].

В ходе исследования использовались методы математического моделирования, описывающие механические процессы в системе сбора щепы, а также численные методы решения уравнений, фиксирующих взаимодействие компонентов измельчителя порубочных остатков.

Результаты и обсуждение

В соответствии с патентом на полезную модель [36] моделируемый измельчитель представляет собой базовое устройство 1 для измельчения древесно-кустарниковой растительности (рис. 1), части которой в виде щепы 2 центробежной силой транспортируются по щепопроводу 3 и съемному гусаку 4, через поворотный патрубок 5 попадая в приемный контейнер 6, где формируют собой насыпь 7. Для обеспечения возможности поворота патрубка 5 применяется линейный привод 8, установленный на раме 9. Поступательное движение

штока 10 указанного привода обуславливает воздействие через тягу 11 на поворотный патрубок 5, обеспечивая его возвратно-вращательное движение. В результате измельченным частям порубочных остатков придается дополнительный направленный импульс движения в целях их более рационального распределения в приемной емкости.

В результате научного исследования разработана математическая модель системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков, предусматривающая учет физико-механических особенностей порубочных остатков, особенности конструктивных элементов системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков, а именно съемного гусака и приемного контейнера, технологических режимов процесса сбора измельченных порубочных остатков при их контакте с внутренними стенками указанного контейнера и поворотного патрубка.

На основе полученной математической модели (1) можно получить оценку эффективности работы измельчителя порубочных остатков с учетом стесненных лесных условий его работы, а также выявить оптимальные значения конструктивных параметров и режимов работы рассматриваемого технического средства.

$$\Delta_{\Pi} = \left| - \left(b_{\Pi, \text{ш.с}} + \frac{a_{\Pi, \text{н}}}{2} \right) \cdot \cos \varphi_{\Pi, \text{п.п. макс}} - (h_{\Pi, \text{ос}} - h_{\Pi, \text{ш.с}}) \cdot \sin \varphi_{\Pi, \text{п.п. макс}} \right| +$$

$$+ \left(- \left(b_{\Pi, \text{ш.с}} + \frac{a_{\Pi, \text{н}}}{2} \right) \cdot \cos \varphi_{\Pi, \text{п.п. макс}} + (h_{\Pi, \text{ос}} - h_{\Pi, \text{ш.с}}) \cdot \sin \varphi_{\Pi, \text{п.п. макс}} \right);$$

$$\varphi_{\Pi, \text{п.п. макс}} = \left| \arctg \left(2 \cdot \frac{h_{\Pi, \text{ос}}}{a_{\Pi, \text{в}}} \right) \right| -$$

$$\left| \arctg \left(\frac{\left(k_{\varphi_{\Pi}} \cdot \frac{-b_{\varphi} + \sqrt{b_{\varphi}^2 - 4 \cdot a_{\varphi} \cdot c_{\varphi}}}{2 \cdot a_{\varphi}} + b_{\Pi} \right)}{\frac{-b_{\varphi} + \sqrt{b_{\varphi}^2 - 4 \cdot a_{\varphi} \cdot c_{\varphi}}}{2 \cdot a_{\varphi}}} \right) \right|;$$

$$a_{\varphi} = k_{\varphi_{\Pi}}^2 + 1; \quad b_{\varphi} = 2 \cdot k_{\varphi_{\Pi}} \cdot b_{\Pi}; \quad c_{\varphi} = b_{\Pi}^2 - R_{\Pi, \text{в}}^2;$$

$$k_{\varphi_{\Pi}} = - \frac{2 \cdot (h_{\Pi} + \Delta h_{\text{кн}})}{a_{\text{кн}} - a_{\Pi, \text{в}}}; \quad b_{\Pi} = \frac{2 \cdot (h_{\Pi} + \Delta h_{\text{кн}}) \cdot a_{\text{кн}}}{2 - (h_{\Pi, \text{ос}} + \Delta h_{\text{кн}})};$$

$$t_{3, \text{кн}} = \frac{60 \cdot a_{\text{кн}} \cdot b_{\text{кн}} \cdot h_{\text{кн}}}{W_{\text{и.ч}}};$$

$$t_{\text{в.п.п}} = \frac{60}{W_{\text{и.ч}}} \cdot \frac{\pi \cdot h_{\text{ш.с.к}}}{6} \cdot \left(3 \cdot \left(\frac{a_{\text{кн}}}{2} \right)^2 + h_{\text{ш.с.к}}^2 \right); \quad (1)$$

$$\xi_{\text{кн.ш}} = \frac{a_{\text{кн}} \cdot b_{\text{кн}} \cdot h_{\text{ш.пр}} + \frac{\pi \cdot (h_{\text{кн}} - h_{\text{ш.пр}})}{6} \cdot \left(3 \cdot \left(\frac{a_{\text{кн}}}{2} \right)^2 + (h_{\text{кн}} - h_{\text{ш.пр}})^2 \right)}{a_{\text{кн}} \cdot b_{\text{кн}} \cdot h_{\text{кн}}} \rightarrow 1$$

$$\vartheta_{\Pi} = \frac{1}{60 \cdot (1 - \xi_{\text{кн.ш}})}$$

$$\begin{cases} 0 \leq \frac{\varphi_{\Pi, \text{п}}}{2} \leq \arctg \left(\frac{a_{\text{кн}} - a_{\Pi, \text{в}}}{2 \cdot (h_{\Pi} + \Delta h_{\text{кн}})} \right); \\ a_{\text{ш}}, b_{\text{ш}}, h_{\text{ш}} \ll h_{\Pi, \text{р}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_{\text{кн}} \geq 2 \cdot R_{\Pi, \text{в}} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{a_{\Pi, \text{н}}}{2} \right)^2 + h_{\Pi, \text{ос}}^2} \\ h_{\text{кн}} \geq R_{\Pi, \text{в}} = \sqrt{\left(\frac{a_{\Pi, \text{н}}}{2} \right)^2 + h_{\Pi, \text{ос}}^2} \end{cases}.$$

Разработанная математическая модель (1) системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков позволяет исследовать воздействие на показатели эффективности такого сбора более 25 конструктивно-технологических параметров как самого измельчителя, так и режимов его применения. Взаимосвязь входных параметров и выходных показателей представ-

лена на рис. 2, на котором выделены три группы переменных, относящихся к модели.

В системе сбора щепы в измельчителе порубочных остатков (в том числе его неотъемлемой части — приемного контейнера) имеются следующие конструктивные параметры (см. рис. 2):

$a_{\Pi, \text{н}}$ и $a_{\Pi, \text{в}}$ — наружная и внутренняя длины подвижного патрубка, мм;

$b_{\Pi, \text{н}}$ и $b_{\Pi, \text{в}}$ — наружная и внутренняя ширины подвижного патрубка, мм;

h_{Π} — высота подвижного патрубка, мм;

$h_{\Pi, \text{р}}$ — наименьший внутренний размер поперечного сечения щепопровода, мм;

$h_{\Pi, \text{ос}}$ — расстояние от торца подвижного патрубка до центра оси его поворота, мм;

$b_{\Pi, \text{ш.с}}$ — расстояние от боковой поверхности подвижного патрубка до центра его шарнирного соединения с приводом, мм;

$h_{\Pi, \text{ш.с}}$ — расстояние от торца подвижного патрубка до центра его шарнирного соединения с приводом, мм;

$a_{\text{кн}}$, $b_{\text{кн}}$ и $h_{\text{кн}}$ — соответственно внутренние длина, ширина и высота приемного контейнера, мм;

$\Delta h_{\text{кн}}$ — расстояние от торца подвижного патрубка до верхней кромки приемного контейнера;

$R_{\Pi, \text{в}}$ — радиус вращения наружной торцевой части подвижного патрубка, мм;

$R_{\Pi, \text{н}}$ — радиус вращения внутренней торцевой части подвижного патрубка, мм;

φ_{Π} — угол попадания щепы внутрь приемного контейнера, град;

$\varphi_{\Pi, \text{п. макс}}$ — максимальный угол поворота подвижного патрубка, град.

$h_{\text{ш.с.к}}$ — высота формирующейся в приемном контейнере насыпи щепы, м;

$h_{\text{ш.пр}}$ — высота призматической части насыпавшейся в контейнер щепы, м.

Процесс сбора измельченных порубочных остатков характеризуется следующими технологическими режимами:

Δ_{Π} — амплитуда смещения штока привода подвижного патрубка, мм;

ϑ_{Π} — частота колебаний подвижного патрубка, мин⁻¹;

$W_{\text{и.ч}}$ — часовая производительность работы измельчителя порубочных остатков, м³/ч;

$t_{\text{в.п.п}}$ — время выстоя подвижного патрубка, мин.

Измельчаемые порубочные остатки имеют следующие параметры: $a_{\text{ш}}$, $b_{\text{ш}}$ и $h_{\text{ш}}$ — соответственно длина, ширина и высота одного элемента щепы, мм.

Эффективность системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков, определяемая

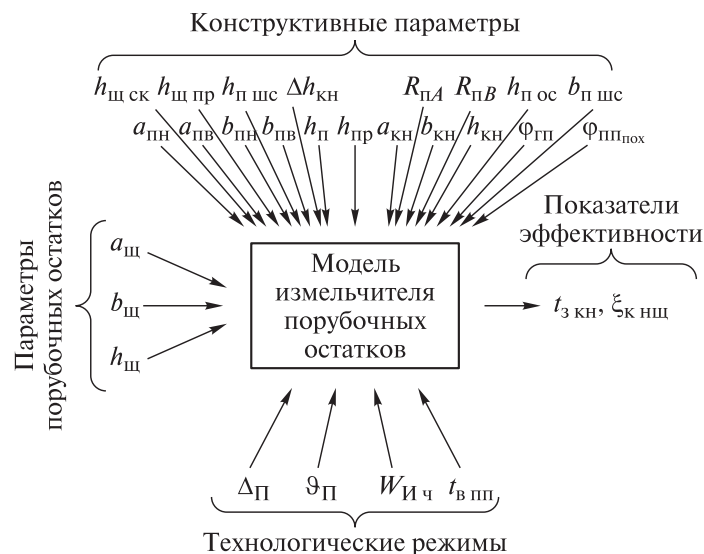


Рис. 2. Входные параметры и показатели эффективности математической модели системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков (объяснения с текста)

Fig. 2. Input parameters and performance indicators of the mathematical model of the wood chip gathering system in a logging waste chopper

в ходе теоретического исследования, характеризуется (1) двумя показателями: $t_{з.кн}$ — время формирования объема щепы, насыпающейся в приемный контейнер, мин.; $\xi_{кн.щ}$ — коэффициент заполнения приемного контейнера щепой.

Научные изыскания предопределяют выявление характеристик системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков, при которых наблюдается возможно большее заполнение приемного контейнера щепой за возможно меньшее время

$$\begin{cases} \xi_{кн.щ} \rightarrow \max \\ t_{з.кн} \rightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

Имитационное моделирование работы системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков осуществлялось в следующих диапазонах наиболее вероятных начальных параметров измельчителя, подвижного патрубка и приемного контейнера:

- часовая производительность работы измельчителя порубочных остатков $W_{и.ч} = 2,5 \dots 4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- объем насыпаемой щепы $V_{щ} = 0,1 \dots 1 \text{ м}^3$ при внутренних параметрах приемного контейнера: длине $a_{кн} = 700 \dots 1200 \text{ мм}$, ширине $b_{кн} = 500 \dots 800 \text{ мм}$ и высоте $h_{кн} = 800 \dots 1200 \text{ мм}$;
- внутренняя длина подвижного патрубка $a_{п.в} = 200 \dots 300 \text{ мм}$ и его высота $h_{п} = 300 \dots 600 \text{ мм}$;
- расстояние от торца подвижного патрубка до центра оси его поворота $h_{п.ос} = 550 \dots 580 \text{ мм}$;

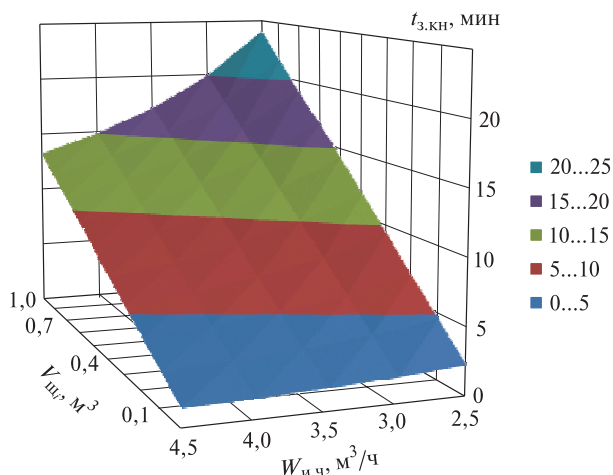


Рис. 3. Зависимость времени $t_{з.кн}$ формирования текущего объема $V_{щ}$ щепы от часовой производительности $W_{и.ч}$ работ измельчителя

Fig. 3. Dependence of time $t_{з.кн}$ of formation of current volume $V_{щ}$ of chips on hourly productivity $W_{и.ч}$ of the shredder work

- расстояние от боковой поверхности подвижного патрубка до центра его шарнирного соединения с приводом $b_{п.ш.с} = 30 \dots 50 \text{ мм}$;
- расстояние от торца подвижного патрубка до центра его шарнирного соединения с приводом $h_{п.ш.с} = 250 \dots 350 \text{ мм}$;
- расстояние от торца подвижного патрубка до верхней кромки приемного контейнера $\Delta h_{кн} = 15 \dots 40 \text{ мм}$.

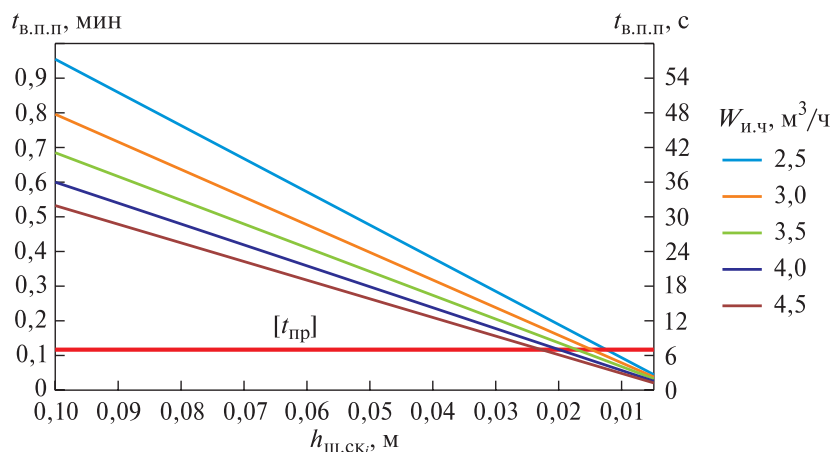


Рис. 4. Зависимость времени $t_{в.п.п}$ выстоя подвижного патрубка от высоты $h_{щ.ск}$ формирующейся в приемном контейнере насыпи щепы и часовой производительности измельчителя $W_{и.ч}$

Fig. 4. The dependence of the dwell time $t_{в.п.п}$ of the movable pipe on the height $h_{щ.ск}$ of the wood chip pile formed in the receiving container and the hourly productivity of the shredder $W_{и.ч}$

При исследовании зависимости

$$t_{з.кн} = f(V_{щ}; W_{и.ч})$$

выявлено (рис. 3), что при увеличении объемов, требующихся к насыпанию в приемный контейнер щепы, время их формирования увеличивается, при этом по абсолютным величинам большие темпы увеличения времени характерны для меньшей производительности измельчителя. Увеличение объема насыпающейся щепы в 10 раз и часовой производительности измельчителя $W_{и.ч} = 2,5$ ($4,5$) $\text{м}^3/\text{ч}$ приводит к возрастанию требуемого времени насыпания соответственно на 21,6 (12) мин. В целом увеличение производительности работы измельчителя с 2,5 до 4,5 $\text{м}^3/\text{ч}$ обеспечивает снижение требуемого времени на насыпание щепы в приемный контейнер в 1,8 раза.

Существенное значение для наиболее полного заполнения приемного контейнера щепой имеет объем высыпавшейся из подвижного патрубка щепы во время $t_{в.п.п}$ его нахождения («выстоя») в положениях I или II (см. рис. 1).

При исследовании зависимости $t_{в.п.п} = f(h_{щ.ск})$ времени выстоя подвижного патрубка от высоты $h_{щ.ск}$ (м) формирующейся в приемном контейнере насыпи щепы выявлено (рис. 4) следующее. Обеспечение текущего объема щепы с высотой насыпи в контейнере $h_{щ.ск} = 0,09 \dots 0,1$ м и выше достигается при времени выстоя подвижного патрубка (в вышеуказанных крайних положениях I и II) $t_{в.п.п} = 0,47 \dots 0,95$ мин. (28...57 с) и более, при этом меньшие значения характерны для большей производительности

измельчителя порубочных остатков. С приближением основного (призматического) уровня щепы в приемном контейнере к верхней кромке указанного контейнера (т. е. с уменьшением параметра $h_{щ.ск}$) необходимо обеспечивать снижение времени выстоя подвижного патрубка. Значение производительности измельчителя при $h_{щ.ск} \rightarrow 0$ оказывает не столь существенное влияние на время выстоя подвижного патрубка, которое (при необходимости подсыпания щепы в контейнер на высоту $h_{щ.ск} = 0,005 \dots 0,01$ м) варьируется в пределах $t_{в.п.п} = 0,02 \dots 0,09$ мин (1...5 с). Однако при этом следует учитывать время срабатывания привода подвижного патрубка $[t_{пр}]$, которое в зависимости от типа привода и его геометрических и кинематических характеристик может оказаться больше величины $t_{в.п.п}$. Вследствие этого, временным обеспечением перемещения, а именно поворота подвижного патрубка, является быстрое действие его привода, выражаемое граничным условием $t_{в.п.п} \geq [t_{пр}]$.

При исследовании зависимости $\vartheta_{II} = f(\xi_{кн.щ})$ частоты ϑ_{II} колебаний подвижного патрубка (при заполнении через него приемного контейнера щепой) от коэффициента заполнения щепой $\xi_{кн.щ}$ указанного контейнера выявлено следующее (рис. 5).

При небольших объемах наполнения приемного контейнера щепой ($\xi_{кн.щ}$ до 50...70 %) потребность в колебаниях подвижного патрубка невелика и составляет $\vartheta_{II} = 0,03 \dots 0,05$ Гц (2...3 мин^{-1}). С увеличением объема щепы, поступившей в приемный контейнер, для наибо-

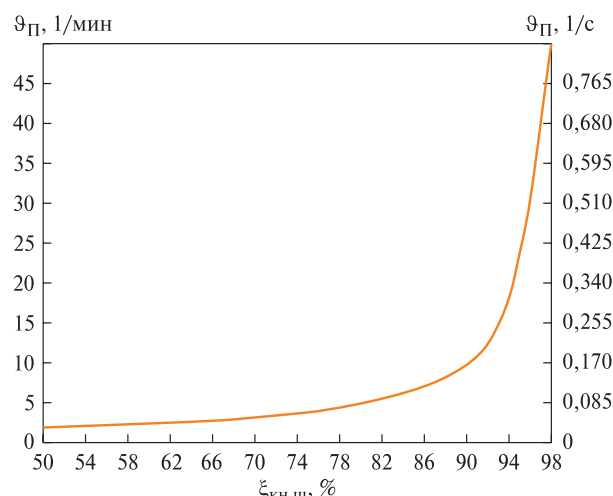


Рис. 5. Зависимость частоты ϑ_{Π} колебаний подвижного патрубка от коэффициента заполнения щепой $\xi_{\text{кн.щ}}$ приемного контейнера

Fig. 5. Dependence of the oscillation frequency ϑ_{Π} of the movable pipe on the filling factor $\xi_{\text{кн.щ}}$ of the receiving container

лее полного его заполнения ($\xi_{\text{кн.щ}} \rightarrow 1$) частота колебаний (возвратно-вращательных движений) подвижного патрубка возрастает, и при наполнении приемного контейнера до уровня $\xi_{\text{кн.щ}} = 80 \dots 90$ % составляет $\vartheta_{\Pi} = 0,08 \dots 0,17$ Гц ($5 \dots 10$ мин⁻¹).

При дальнейшем заполнении приемного контейнера ($\xi_{\text{кн.щ}} > 90$ %) частота колебаний патрубка резко возрастает, достигая значений $\vartheta_{\Pi} = 0,31 \dots 0,83$ Гц ($18 \dots 50$ мин⁻¹). Однако применение указанных значений частоты колебаний подвижного патрубка для рассматриваемых значений часовой производительности работы измельчителя $W_{\text{и.ч}} = 2,5 \dots 4,5$ м³/ч нецелесообразно, поскольку за один выстой патрубка не обеспечивается сколь-либо значительного поступления объемов щепы в приемный контейнер.

Выводы

1. При ограниченных площадях для выполнения лесохозяйственных работ и невозможности направленного размещения щепы на очищаемой территории уместно осуществлять сбор измельченных порубочных остатков в приемную емкость, при этом теоретические аспекты функционирования и проектирования таких устройств изучены не в полном объеме.

2. Разработанная математическая модель вибрационного привода системы сбора щепы в измельчителе порубочных остатков позволяет исследовать воздействие на показатели эффек-

тивности такого сбора более 25 конструктивно-технологических параметров как самого измельчителя, так и режимов его применения.

3. При сборе измельченных порубочных остатков в приемный контейнер максимальная амплитуда Δ_{Π} (в миллиметрах) смещения штока привода подвижного патрубка зависит от взаимного расположения и геометрических характеристик приемного контейнера и указанного патрубка, в том числе от значения максимального угла $\Phi_{\text{п.п.мах}}$ его поворота.

4. Увеличение в 10 раз объема насыпающейся в приемный контейнер щепы при часовой производительности измельчителя $W_{\text{и.ч}} = 2,5 \dots 4,5$ м³/ч приводит к возрастанию требуемого времени насыпания на $12 \dots 21,6$ мин. Возрастание производительности работы измельчителя с $2,5$ до $4,5$ м³/ч обеспечивает снижение требуемого времени насыпания щепы в приемный контейнер в 1,8 раза. Обеспечение текущего объема щепы в контейнере с высотой насыпи $0,09 \dots 0,1$ м и выше достигается при времени выстоя подвижного патрубка $0,47 \dots 0,95$ мин ($28 \dots 57$ с) и более.

5. Для объемов наполнения приемного контейнера щепой $\xi_{\text{кн.щ}} \leq 50 \dots 70$ % колебания подвижного патрубка осуществляются с частотой $\vartheta_{\Pi} = 0,03 \dots 0,05$ Гц ($2 \dots 3$ мин⁻¹). Для наиболее полного заполнения приемного контейнера частота колебаний подвижного патрубка составляет $\vartheta_{\Pi} = 0,08 \dots 0,17$ Гц ($5 \dots 10$ мин⁻¹).

Список литературы

- [1] Красовский В.В., Гербер Ю.Б. Экспериментальное исследование и оптимизация скорости резания для повышения эффективности малогабаритного дискового измельчителя растительных остатков // Инженерные технологии и системы, 2025. Т. 35. № 1. С. 84–100. DOI: 10.15507/2658-4123.035.202501.084-100
- [2] Малюков С.В., Аксенов А.А., Малюкова М.А. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубильных машин // Лесотехнический журнал, 2021. Т. 11, № 4. С. 139–149. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12
- [3] Фокин С.В., Медведева П.Ю., Фомина О.А. Изучение эффективности работы дисковой рубильной машины // Аграрный научный журнал, 2024. № 9. С. 147–154. DOI: 10.28983/asj.y2024i9pp147-154
- [4] Фомина О.А., Фокин С.В., Касторнова А.В. Влияние перфораций в корпусе измельчающего диска на показатели эффективности выброса древесной щепы // Аграрный научный журнал, 2025. № 5. С. 143–150. DOI: 10.28983/asj.y2025i5pp143-150
- [5] Krilek J., Gendek A., Aniszewska M. Research of chipper knives with a modified cutting edge for the production of dimensionally uniform wood chips // BioResources, 2024, v. 19, pp. 3653–3667. DOI: 10.15376/biores.19.2.3653-3667

- [6] Vasile C., Bădescu G., Mihail M. Mathematical modeling and graphical representation with AUTOCAD of the functioning of vegetable remains shredders // *Annals of the University of Craiova – Agriculture Montanology Cadastre Series*, 2025, v. 55(2), pp. 236–243. DOI: 10.52846/aamc.v55i2.1710
- [7] Bergström D., Di Fulvio F. Review of efficiencies in comminuting forest fuels // *International J. of Forest Engineering*, 2018, v. 30, pp. 1–11. DOI: 10.1080/14942119.2019.1550314
- [8] Nasr G., Ibrahim M., Hashim F. Development of a machine for chopping wood residues // *Wood Research*, 2021, v. 66, pp. 1055–1063. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/66.6.10551063
- [9] Bačić M., Landekić M., Pandur Z. Forestry Ergonomics Publications in the Last Decade: A Review // *Forests*, 2024, v. 15(4), p. 616. DOI: 10.3390/f15040616
- [10] Belbo H., Vivestad H. Predicting delay factors when chipping wood at forest roadside landings // *International J. of Forest Engineering*, 2018, v. 29, pp. 1–10. DOI: 10.1080/14942119.2018.1462594
- [11] Gard-Timmerfors J., Sjölund T., Jönsson L. New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips // *Holzforschung*, 2019, v. 74(2), pp. 116–122. DOI: 10.1515/hf-2018-0279
- [12] Altgen M., Gedde K., Ross L. Physical and chemical characterization of post-consumer wood chips for recycling // *Waste Management*, 2025, v. 200, p. 114762. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114762
- [13] Gard-Timmerfors J., Salehi H., Larsson S. The impact of using different wood qualities and wood species on chips produced using a novel type of pilot drum chipper // *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2021, v. 36(2). DOI: 10.1515/npprj-2019-0096
- [14] Pérez S., Fernández I., Ortiz F. Long-term storage and fuel quality of residual Eucalyptus globulus biomass // *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 211, p. 118268. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.118268
- [15] Wästerlund I., Nilsson P., Gref R. Influence of storage on properties of wood chip material // *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(4), pp. 182–191. DOI: 10.17221/46/2016-JFS
- [16] Anerud E., Bergström D., Routa J. Sieving and Covering of Wood Chips Improves Storability // *Energies*, 2022, v. 15(8), p. 2953. DOI: 10.3390/en15082953
- [17] Gejdoš M., Lieskovský M. Wood Chip Storage in Small Scale Piles as a Tool to Eliminate Selected Risks // *Forests*, 2021, v. 12(3), p. 289. DOI: 10.3390/f12030289
- [18] Manzone M. Efficiency of a compactor in wood chip volume reduction // *Biomass and Bioenergy*, 2015, v. 80, pp. 303–306. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.06.007
- [19] Manzone M. Storage of woodchips in pressed bales // *Fuel Processing Technology*, 2017, v. 157. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.11.010
- [20] Grünberg J., Ghaffariyan M., Jourgholami M. Criteria for Assessing the Sustainability of Logging Operations – A Systematic Review // *Current Forestry Reports*, 2023, v. 9, pp. 1–20. DOI: 10.1007/s40725-023-00198-x
- [21] Suhartana S., Yuniawati Y., Gandaseca S. Potential of Wood Harvesting Residues and Residual Stand Damage due to Timber Harvesting: A Case Study at PT Austral Byna in Central Kalimantan, Indonesia // *International J. of Forestry Research*, 2022, v. 325, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2022/3251945
- [22] Waluyo T., Utomo P., Yuniawati Y. Logging Waste Dynamics and Efficiency under Reduced Impact Logging in Tropical Natural Forests // *Salud, Ciencia y Tecnología*, 2025, v. 5, p. 2431. DOI: 10.56294/saludcyt20252431
- [23] Boateng R., Agyeman J., Inyong S. Exploring Species Extraction Volume and Residues of Illegal and Conventional Logging Operations // *Asian J. of Environment & Ecology*, 2023, v. 20, pp. 59–68. DOI: 10.9734/ajee/2023/v20i2437
- [24] Franzen K., Favero A., Milliken C. Assessing GHG Emissions Implications of Forest Residue Use for Energy Production // *GCB Bioenergy*, 2025, v. 17(6). DOI: 10.1111/gcbb.70045
- [25] Balcioglu G., Jeswani H., Azapagic A. Energy from forest residues in Turkey: An environmental and economic life cycle assessment of different technologies // *Science of The Total Environment*, 2023, v. 874(1), p. 162316. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162316
- [26] Gasperini T., Leoni E., Duca D. Monitoring of Woody Biomass Quality in Italy over a Five-Year Period to Support Sustainability // *Resources*, 2024, v. 13(9). DOI: 10.3390/resources13090115
- [27] Kozuch A., Cywicka D., Górna A. Forest Biomass in Bioenergy Production in the Changing Geopolitical Environment of the EU // *Energies*, 2024, v. 17(3), p. 554. DOI: 10.3390/en17030554
- [28] La Scalia G., Adelfio L., La Fata C. Economic and Environmental Assessment of Biomass Power Plants in Southern Italy // *Sustainability*, 2022, v. 14(15), p. 9676. DOI: 10.3390/su14159676
- [29] Rincione R., Longo S., Cellura M. Life Cycle Assessment of Wood Chips from Residual Biomass: A Case Study // *International J. of Sustainable Development and Planning*, 2023, v. 18(7), pp. 2253–2258. DOI: 10.18280/ijstdp.180730
- [30] Virbickas L., Kliopova I., Stunženas E. Environmental Impact Assessment of Logging Residue Utilization for Increased Bioenergy Production from Scots Pine Forest Stands in Lithuania Using a Life Cycle Approach // *Sustainability*, 2025, v. 17, p. 8438. DOI: 10.3390/su17188438
- [31] Вавилов А.В., Пашковский М.Н., Соколовский Ю.В. Разработка технологического процесса заготовки топливной щепы из лесосечных отходов с ее сбором в съемные контейнеры и доставкой к энергетическим установкам // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*, 2009. № 2. С. 6–10.
- [32] Карпачев С.П., Запруднов В.И. Моделирование технологии уборки «энергетической» ивы с использованием мягких контейнеров // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2024. Т. 28. № 6. С. 127–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-127-138
- [33] Карпачев С.П., Запруднов В.И., Шмырев В.И., Шмырев Д.В., Камусин А.А., Редькин А.К. Моделирование технологических процессов освоения биоресурсов леса с использованием мягких контейнеров на лесосеке // *Техника и оборудование для села*, 2017. № 2. С. 45–48.
- [34] Карпачев С.П., Посыпанов С.В. Моделирование технологии уборки и переработки быстрорастущей ивы на щепу с использованием мягких контейнеров и мобильного наполнителя // *Аграрный научный журнал*, 2025. № 9. С. 121–128. DOI: 10.28983/asj.y2025i9pp121-128

- [35] Карпачев С.П., Посыпанов С.В. Моделирование технологии формирования комбинированных пучков с лесосечными отходами для лесосплава // Аграрный научный журнал, 2024. № 8. С. 122–129. DOI: 10.28983/asj.y2024i8pp122-129
- [36] Драпалюк М.В., Платонов А.А., Попиков П.И. Устройство для измельчения порубочных остат-

ков. Патент на полезную модель № 234571 U1 Российская Федерация, МПК В27L 11/00, заявл. 15.02.2025; опубл. 02.06.2025; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

Сведения об авторах

Платонов Алексей Александрович [✉] — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), paa7@rambler.ru

Прокопенко Станислав Вадимович — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), stanislav.prokopenko.86@mail.ru

Платонова Марина Алексеевна — канд. техн. наук, АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», platonova.map@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2026.

Одобрено после рецензирования 22.04.2026.

Принята к публикации 24.08.2026.

MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELING OF CHIPPED WOOD GATHERING IN CHOPPER

A.A. Platonov^{1✉}, **S.V. Prokopenko**¹, **M.A. Platonova**²

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva st., 39408, Voronezh, Russia

²Voronezh Institute of High Technologies, 73a, Lenin st., 394043, Voronezh, Russia

paa7@rambler.ru

The current state of technical means for crushing logging residues in Russia and worldwide is considered. The potential of creating a new chipper that ensures the targeted collection of wood chips into a receiving container in conditions of limited space during forestry operations is demonstrated. A mathematical model of a chip collection system in a logging residue shredder is presented, which allows one to study the impact of more than 25 design and technological parameters of both the shredder itself and its operating modes on the efficiency of such collection. It is disclosed that the maximum amplitude of the displacement of the drive rod of the movable branch pipe of the said system depends on the relative position and geometric characteristics of the chip container and the movable pipe, including the value of the maximum angle of its rotation. It was found that increasing the volume of chips poured into the receiving container by 10 times with an hourly productivity of the shredder of 2,5...4,5 m³/h leads to an increase in the required pouring time by 12...21,6 min. It has been shown that for the most complete filling of the receiving container with chips, the oscillation frequency of the movable pipe is 0,08...0,17 Hz (5...10 min⁻¹). The results of the work can be used by manufacturing enterprises involved in the maintenance and operation of territories of various facilities.

Keywords: unwanted vegetation, shredding, wood chips, collection, receiving container, movable pipe, vibration frequency, amplitude

Suggested citation: Platonov A.A., Prokopenko S.V., Platonova M.A. *Matematicheskoye i imitatsionnoye modelirovaniye sistemy sbora shchepy v izmel'chitele porubochnykh ostatkov* [Mathematical and simulation modeling of chipped wood gathering in chopper]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 5, pp. 148–158. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-5-148-158

References

- [1] Krasovsky V.V., Gerber Yu.B. *Eksperimental'noye issledovaniye i op-timizatsiya skorosti rezaniya dlya povysheniya effektivnosti malogabaritnogo diskovogo izmel'chatelya rastitel'nykh ostatkov* [Experimental study and optimization of cutting speed to increase the efficiency of a small-sized disc shredder of plant residues]. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* [Engineering technologies and systems], 2025, v. 35, no. 1, pp. 84–100. DOI: 10.15507/2658-4123.035.202501.084-100
- [2] Malyukov S.V., Aksenov A.A., Malyukova M.A. *Analiz konstruktivnykh i rezhimov raboty diskovykh rubitel'nykh mashin* [Analysis of designs and operating modes of disc chippers]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering J.], 2021, v. 11, no. 4, pp. 139–149. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12
- [3] Fokin S.V., Medvedeva P.Yu., Fomina O.A. *Izucheniye effektivnosti raboty diskovoy rubil'noy mashiny* [Studying the efficiency of a disk chipper]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], 2024, no. 9, pp. 147–154. DOI: 10.28983/asj.y2024i9pp147-154
- [4] Fomina O.A., Fokin S.V., Kastornova A.V. *Vliyaniye perforatsiy v korpuse izmel'chayushchego diska na pokazateli effektivnosti vybrosa drevesnoy shchepy* [Influence of perforations in the housing of a chopping disk on the efficiency of wood chip ejection]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian scientific journal], 2025, no. 5, pp. 143–150. DOI: 10.28983/asj.y2025i5pp143-150
- [5] Krilek J., Gendek A., Aniszewska M. Research of chipper knives with a modified cutting edge for the production of dimensionally uniform wood chips. *BioResources*, 2024, v. 19, pp. 3653–3667. DOI: 10.15376/biores.19.2.3653-3667
- [6] Vasile C., Bădescu G., Mihail M. Mathematical modeling and graphical representation with AUTOCAD of the functioning of vegetable remains shredders. *Annals of the University of Craiova – Agriculture Montanology Cadastre Series*, 2025, v. 55(2), pp. 236–243. DOI: 10.52846/aamc.v55i2.1710
- [7] Bergström D., Di Fulvio F. Review of efficiencies in comminuting forest fuels. *International J. of Forest Engineering*, 2018, v. 30, pp. 1–11. DOI: 10.1080/14942119.2019.1550314
- [8] Nasr G., Ibrahim M., Hashim F. Development of a machine for chopping wood residues. *Wood Research*, 2021, v. 66, pp. 1055–1063. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/66.6.10551063
- [9] Bačić M., Landekić M., Pandur Z. Forestry Ergonomics Publications in the Last Decade: A Review. *Forests*, 2024, v. 15(4), p. 616. DOI: 10.3390/f15040616
- [10] Belbo H., Vivestad H. Predicting delay factors when chipping wood at forest roadside landings. *International J. of Forest Engineering*, 2018, v. 29, pp. 1–10. DOI: 10.1080/14942119.2018.1462594
- [11] Gard-Timmerfors J., Sjölund T., Jönsson L. New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips. *Holzforschung*, 2019, v. 74(2), pp. 116–122. DOI: 10.1515/hf-2018-0279
- [12] Altgen M., Gedde K., Ross L. Physical and chemical characterization of post-consumer wood chips for recycling. *Waste Management*, 2025, v. 200, p. 114762. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114762
- [13] Gard-Timmerfors J., Salehi H., Larsson S. The impact of using different wood qualities and wood species on chips produced using a novel type of pilot drum chipper. *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 2021, v. 36(2). DOI: 10.1515/npprj-2019-0096
- [14] Pérez S., Fernández I., Ortiz F. Long-term storage and fuel quality of residual *Eucalyptus globulus* biomass. *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 211, p. 118268. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.118268
- [15] Wästerlund I., Nilsson P., Gref R. Influence of storage on properties of wood chip material. *J. of Forest Science*, 2017, v. 63(4), pp. 182–191. DOI: 10.17221/46/2016-JFS
- [16] Anerud E., Bergström D., Routa J. Sieving and Covering of Wood Chips Improves Storability. *Energies*, 2022, v. 15(8), p. 2953. DOI: 10.3390/en15082953
- [17] Gejdoš M., Lieskovský M. Wood Chip Storage in Small Scale Piles as a Tool to Eliminate Selected Risks. *Forests*, 2021, v. 12(3), p. 289. DOI: 10.3390/f12030289
- [18] Manzone M. Efficiency of a compactor in wood chip volume reduction. *Biomass and Bioenergy*, 2015, v. 80, pp. 303–306. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.06.007
- [19] Manzone M. Storage of woodchips in pressed bales. *Fuel Processing Technology*, 2017, v. 157. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.11.010
- [20] Grünberg J., Ghaffariyan M., Jourgholami M. Criteria for Assessing the Sustainability of Logging Operations – A Systematic Review. *Current Forestry Reports*, 2023, v. 9, pp. 1–20. DOI: 10.1007/s40725-023-00198-x
- [21] Suhartana S., Yuniawati Y., Gandaseca S. Potential of Wood Harvesting Residues and Residual Stand Damage due to Timber Harvesting: A Case Study at PT Austral Byna in Central Kalimantan, Indonesia. *International J. of Forestry Research*, 2022, v. 325, pp. 1–8. DOI: 10.1155/2022/3251945
- [22] Waluyo T., Utomo P., Yuniawati Y. Logging Waste Dynamics and Efficiency under Reduced Impact Logging in Tropical Natural Forests. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 2025, v. 5, p. 2431. DOI: 10.56294/saludcyt20252431
- [23] Boateng R., Agyeman J., Inyong S. Exploring Species Extraction Volume and Residues of Illegal and Conventional Logging Operations. *Asian J. of Environment & Ecology*, 2023, v. 20, pp. 59–68. DOI: 10.9734/ajee/2023/v20i2437
- [24] Franzen K., Favero A., Milliken C. Assessing GHG Emissions Implications of Forest Residue Use for Energy Production. *GCB Bioenergy*, 2025, v. 17(6). DOI: 10.1111/gcbb.70045
- [25] Balcioglu G., Jeswani H., Azapagic A. Energy from forest residues in Turkey: An environmental and economic life cycle assessment of different technologies. *Science of The Total Environment*, 2023, v. 874(1), p. 162316. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162316
- [26] Gasperini T., Leoni E., Duca D. Monitoring of Woody Biomass Quality in Italy over a Five-Year Period to Support Sustainability. *Resources*, 2024, v. 13(9). DOI: 10.3390/resources13090115

- [27] Kozuch A., Cywicka D., Górna A. Forest Biomass in Bioenergy Production in the Changing Geopolitical Environment of the EU. *Energies*, 2024, v. 17(3), p. 554. DOI: 10.3390/en17030554
- [28] La Scalia G., Adelfio L., La Fata C. Economic and Environmental Assessment of Biomass Power Plants in Southern Italy. *Sustainability*, 2022, v. 14(15), p. 9676. DOI: 10.3390/su14159676
- [29] Rincione R., Longo S., Cellura M. Life Cycle Assessment of Wood Chips from Residual Biomass: A Case Study. *International J. of Sustainable Development and Planning*, 2023, v. 18(7), pp. 2253–2258. DOI: 10.18280/ijssdp.180730
- [30] Virbickas L., Kliopova I., Stunženas E. Environmental Impact Assessment of Logging Residue Utilization for Increased Bioenergy Production from Scots Pine Forest Stands in Lithuania Using a Life Cycle Approach. *Sustainability*, 2025, v. 17, p. 8438. DOI: 10.3390/su17188438
- [31] Vavilov A.V., Pashkovsky M.N., Sokolovsky Yu.V. *Razrabotka tekhnologicheskogo protsessa zagotovki toplivnoy shchepy iz lesosechnykh otkhodov s yeye sborom v s'yemnyye konteynery i dostavkoy k energeticheskim ustanovkam* [Development of a technological process for harvesting fuel chips from logging waste with its collection in removable containers and delivery to power plants]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Transactions of the Belarusian State Technological University. Series 2. Forestry and woodworking industry], 2009, no. 2, pp. 6–10.
- [32] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I. *Modelirovaniye tekhnologii uborki «energeticheskoy» ivy s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov* [Modelling of «energy» willow harvesting technology using soft containers]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 6, pp. 127–138. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-6-127-138
- [33] Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V., Kamusin A.A., Red'kin A.K. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov osvoyeniya bioresursov lesa s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov na lesoseke* [Modeling of technological processes for the development of forest bioresources using soft containers in a logging area]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2017, no. 2, pp. 45–48.
- [34] Karpachev S.P., Posypanov S.V. *Modelirovaniye tekhnologii uborki i pererabotki bystrorastushchey ivy na shchepu s ispol'zovaniyem myagkikh konteynerov i mobil'nogo napolnitelya* [Modeling the technology of harvesting and processing fast-growing willow into chips using soft containers and a mobile filler], *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific J.], 2025, no. 9, pp. 121–128. DOI: 10.28983/asj.y2025i9pp121-128
- [35] Karpachev S.P., Posypanov S.V. *Modelirovaniye tekhnologii formirovaniya kombinirovannykh puchkov s lesosechnymi otkhodami dlya lesosplava* [Modeling the technology of forming combined bundles with logging waste for timber rafting]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific J.], 2024, no. 8, pp. 122–129. DOI: 10.28983/asj.y2024i8pp122-129
- [36] Drapalyuk M.V., Platonov A.A., Popikov P.I. Utility Model Patent No. 234571 U1 Russian Federation, IPC B27L 11/00. *Ustroystvo dlya izmel'cheniya porubochnykh ostatkov* [Device for shredding logging residues]: declared 15.02.2025: published 02.06.2025; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov».

Author's information

Platonov Aleksey Aleksandrovich✉ — Cand. Sci. (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, paa7@rambler.ru

Prokopenko Stanislav Vadimovich — graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, stanislav.prokopenko.86@mail.ru

Platonova Marina Alekseyevna — Cand. Sci. (Tech.), Voronezh Institute of High Technologies, platonova.map@yandex.ru

Received 18.02.2026.

Approved after review 22.04.2026.

Accepted for publication 24.08.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest