

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

Научная статья

УДК 676.051.32

doi: 10.28983/asj.y2024i9pp147-154

Изучение эффективности работы дисковой рубильной машины

Сергей Владимирович Фокин¹, Полина Юрьевна Медведева¹, Ольга Александровна Фомина²

¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, г. Саратов, Россия

² Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия

e-mail: feht@mail.ru

Аннотация. Лесные плантации, как эффективный метод управления процессом выращивания древесины, привлекают к себе все больше внимания мирового лесного хозяйства. Использование плантаций позволило сократить восстановление древесины в естественных лесах на 20 %. Однако реализация таких проектов необходима только при определенных социальных и экономических стимулах. Поэтому необходимо не только восстанавливать леса, но и выращивать их с учетом специфических потребностей, включая производство топливной щепы. Для максимально эффективной переработки тонкомерного древесного сырья рекомендуется использовать мобильные рубильные машины. В настоящее время большинство измельчителей, применяемых на практике, не обладают эффективными механизмами выброса щепы, что приводит к ограниченному объему вырабатываемого материала и высокой степени энергоемкости рабочего процесса. Поэтому проведенное исследование имеет большую актуальность. В данной работе представлены результаты лабораторных исследований по изучению влияния технологических параметров измельчения древесного материала с использованием дисковой рубильной машины на эффективность выброса полученной щепы. В процессе исследования были определены связи между технологическими параметрами нового механизма выброса щепы и производительностью машины для измельчения древесного сырья. Лабораторные исследования проводились на экспериментальной установке для измельчения древесных остатков, оснащенной усовершенствованным механизмом транспортировки щепы из дисковой рубильной машины, который использовался как в лабораторных условиях, так и в полевых испытаниях. Для измерений был использован бесконтактный оптический датчик оборотов ВС-401, подключенный к тензометрической станции и персональному компьютеру. План многофакторного эксперимента включал изменение передаточного числа приводных шкивов для различных параметров частоты вращения рубильного диска. Исследования проводились с трехкратным повторением. Обработка результатов осуществлялась с помощью программного комплекса «Тахометр» и прикладной программы Statistica 7.0 на персональном компьютере. Геометрические характеристики щепы были определены на основании анализа фракционного состава, полученного с помощью сит анализатора. Для этого были использованы образцы щепы, полученные после измельчения остатков от рубки специальной дисковой рубильной машины с прямыми ножами.

Ключевые слова: лесные плантации; механическая переработка древесного сырья; выброс щепы; конструктивно-технологические параметры измельчителей древесины

Для цитирования: Фокин С. В., Медведева П. Ю., Фомина О. А. Изучение эффективности работы дисковой рубильной машины // Аграрный научный журнал. 2024, № 9, С. 147–154. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp147-154>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Study of the efficiency of disk chopping machines

Sergey V. Fokin¹, Polina Yu. Medvedeva², Olga A. Fomina²

¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia

² Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

e-mail: feht@mail.ru

Abstract. Forest plantations, as an effective method of managing the growing process of timber, are attracting more and more attention of the world forestry. The use of plantations has reduced timber regeneration in natural





forests by 20 %. However, the realization of such projects is required only under certain social and economic incentives. Therefore, it is necessary not only to restore forests, but also to grow them to meet specific needs, including the production of fuel chips. To maximize the efficient processing of fine wood raw materials, it is recommended to use mobile chippers. At present, most of the chippers used in practice do not have effective mechanisms for chip ejection, which leads to a limited volume of produced material and a high degree of energy intensity of the working process. Therefore, the conducted research is of great relevance. This paper presents the results of laboratory studies on the influence of technological parameters of wood material shredding using a disk chipper on the efficiency of ejection of the resulting chips. In the process of research, the relationships between the technological parameters of the new mechanism of chip ejection and the productivity of the machine for ejecting the wood raw materials were determined. Laboratory studies were conducted on an experimental wood residue shredding machine equipped with an improved mechanism of chip transportation from a disk chipper, which was used both in laboratory conditions and in field tests. For measurements a VS-401 non-contact optical rotation sensor was used, connected to a strain gauge station and a personal computer. The multifactorial experiment plan included changing the drive pulley gear ratio for different chopping disk speed parameters. The studies were carried out with three times repetition. Processing of the results was carried out using the "Tachometer" software and the Statistica 7.0 application program on a personal computer. Geometric characteristics of wood chips were determined based on the analysis of fractional composition obtained with the help of analyzer sieves. For this purpose, chip samples were used obtained after chopping of chipping residues from a special disk chipper with straight knives.

Keywords: forest plantations; mechanical processing of wood raw materials; wood chips ejection; structural and technological parameters of wood chippers

For citation: Fokin S. V., Medvedeva P. Yu., Fomina O. A. Study of the efficiency of disk chopping machines. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(9): 147–154. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i9pp147-154>.

Введение. В современном производстве энергетической древесины используются как стационарные, так и мобильные дробилки. Однако чаще всего используется мобильное оборудование, которое агрегируется с тракторами общего назначения. Отмечается, что они обладают преимуществами, позволяющими легко перемещать их к местам заготовки сырья, не требуя при этом производства работ, связанных с обеспечением процесса переработки лесных отходов, направленных на построение базовых оснований и установки вспомогательного энергетического оборудования для переработки древесины [3, 5, 15, 17].

Проблема эффективного проектирования рубильных устройств для производства щепы остается актуальной [2, 4, 11]. Преднамеренное обоснование конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих эффективный выброс полученной щепы из дисковой рубильной машины, требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. Процесс удаления щепы из кожуха измельчителя изучали Н. М. Вальщиков, А. В. Житков, Г. П. Аликин, В. М. Рубцов, Е. М. Лаунтерс, М. Л. Фридман, А. А. Гусаров, Н. П. Рушнов, В. А. Толпыго и др. [1, 9, 16].

Предшествующий научный опыт подтверждал, что выброс произведенной щепы является завершающим этапом производства древесного топлива, от которого зависят характеристики получаемого продукта, представленные в содержании различных фракций, в том числе элементов малого размера. Данные мелкие частицы оказывают существенное влияние на транспортировку частиц из дробилки. Поэтому необходим анализ скорости и траектории движения щепы с учетом конструкции применяемых ножей, лопаток и формы щепопровода измельчителя.

В связи с этим имеется потребность в дальнейшем исследовании способов эвакуации конечного продукта из рубильных машин с целью усовершенствования конструктивно-технологических параметров данных машин.

Цель исследования – анализ результатов, полученных при проведении лабораторных исследований по определению связи между параметрами рабочего процесса выброса щепы, выполняемого по новой инновационной технологической схеме с производительностью машины.

Материалы и методы. Данная работа выполнена в рамках исследования по созданию эффективного оборудования для переработки древесного сырья, в частности измельчения тонкомерной продукции лесных плантации. Объект исследования: мобильная дисковая рубильная машина. Предмет исследования: рабочий процесс эвакуации конечного продукта в виде щепы из дисковой рубильной машины.



Для оценки воздействия технологических параметров на работоспособность нового измельчителя древесных отходов были проведены лабораторные исследования с использованием метода многовариантного экспериментального проектирования [7, 14]. С целью получения математической модели технологического процесса измельчения древесных отходов был проведен полный факторный эксперимент. Исходя из требования максимальной массы измельченных древесных отходов в единицу времени, были определены значения основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на работоспособность измельчителя тонкомерной древесины.

Результаты теоретических исследований процесса измельчения древесного сырья при рубке отходов лесозаготовки помогли выявить параметры, которые значимо влияют на эффективность работы оборудования и размерные характеристики щепы:

скорость диска измельчителя, $1/с - n_{рд}$;

скорость транспортирования конечного продукта, $м/с - v_b$;

вероятность выхода щепы с началом движения диска p_1 ;

снижение мощности на выброс щепы, $Вт - N_b$;

число отверстий в кожухе диска измельчителя, шт. – m ;

эффективность функционирования устройства, $кг/с - P$.

При исследовании воздействия вышеуказанных факторов на качество работы измельчительной установки использовалась последовательность операций, при которой вращающийся диск постепенно измельчает древесное сырье, перемещающееся в зону рубки при помощи механизма подачи в виде вращающихся вокруг своей оси вальцов. Затем полученная масса щепы, случайным образом распределенная в корпусе диска, транспортируется для дальнейшего изучения в приемный бункер, производится взвешивание измельченной массы полученного продукта [13].

Такие основные конструктивные показатели устройства, как диаметр измельчающего диска, количество закрылков и ножей, размер отверстий в кожухе, конструктивная характеристика щепопровода, оставались неизменными в ходе проведения исследований.

Начальные величины исследуемых факторов, полученные из экспериментальной матрицы, предназначались для качественной оценки работы экспериментального варианта машины [8, 12]. Проведение исследования базировалось на оптимизации производительности измельчителя с получением максимальной массы измельчаемого древесного сырья в единицу времени при минимальных характеристиках энергонасыщенности процесса рубки сырья. Теоретическое обоснование процесса измельчения древесного сырья подтвердили, что частота вращения диска и интенсивность транспортирования щепы являются базовыми элементами эффективности работы машины. Их предельные значения находились в области значений, определяющих максимальную массу полученной щепы в единицу времени:

скорость диска измельчителя, $1/с - n_d$ (15–20);

число отверстий в кожухе диска измельчителя, шт. – m (150–240);

интенсивность транспортирования конечного продукта, $м/с - v_b$ (2,3–2,4).

При проведении экспериментов с рубильной машиной вносились изменения в параметры процесса рубки в соответствии с техническими требованиями к клиноременному вариатору, учитывая возможные изменения скоростей и условия рубки древесных отходов.

Программный комплекс тензометрической станции Zet 017-T8 и бесконтактный оптический датчик оборотов ВС 401 с использованием общепринятой методики применялись при исследовании влияния вращательных характеристик диска, числа отверстий в кожухе диска измельчителя, интенсивности транспортирования конечного продукта на показатели работы опытного образца машины. При проведении опытов интенсивность транспортирования конечного продукта определялась с помощью ручного электронного анемометра АРЭ-М-М [6, 10].

Для разработки матричной и многомерной экспериментальной схемы использовалась компьютерная программа Statgraphics Plus для Windows. При проектировании применялся ротационный дизайн с равномерно распределенной дисперсией откликов во всех точках плана, включая центральную часть. Для расчета результатов исследования использовались специализированные приложения, основанные на методах математической статистики.



Для получения модели, описывающей взаимосвязь между скоростью вращения диска, числом отверстий в кожухе диска измельчителя и интенсивностью транспортирования конечного продукта на эффективность работы машины, были выбраны значения, наиболее точно отражающие процесс выброса стружки с учетом производительности механизма выброса щепы и определения геометрических размеров элементов конечного продукта.

Методы математической статистики позволяют оценить значимость и достоверность результатов проведенного нами регрессионного анализа. Коэффициент корреляции отображает степень взаимодействия с различными параметрами. Согласно стандартам, значение коэффициента корреляции должно быть от 0,7 до 0,9. Если величина превышает указанные пределы, это свидетельствует о сильной и очень сильной связи между факторами. Показатель коэффициента корреляции ниже 0,3 указывает на слабую связь, а значения от 0,3 до 0,5 считаются умеренной связью. Значение от 0,51 до 0,7 указывает на значимую связь между факторами.

Адекватность регрессионных выражений определяется полученной точностью значений зависимой переменной. Чтобы считаться адекватными, регрессионные выражения должны описывать не менее 70 % значений зависимой переменной. При этом стандартное отклонение не должно превышать 5 % от значения зависимой переменной. Данное условие свидетельствует о том, что значения не будут сильно отклоняться от среднего значения, что в свою очередь позволяет правильно определять корреляционную связь между параметрами.

Необходимо, чтобы расчетные коэффициенты уравнения регрессии и свободного члена были значимыми на уровне 5 %. Данный факт свидетельствует о том, что они достаточно значимы и оказывают достаточно большое влияние на величину зависимой переменной. Автокорреляция параметров остатков регрессии не должна быть менее 30 % ($r < 0,30$) при их нормальном распределении. Меньшие значения суммы квадратов остатков дают стандартные ошибки с небольшими значениями. Полученные уравнения регрессии оценивают при помощи критерия Фишера и уровня значимости выражения (p -уровень) [16, 17].

Результаты исследований. После проведения многофакторного эксперимента исследовалось влияние различных технологических параметров на массу измельченных порубочных остатков. Эксперимент проводился с использованием опытного прототипа машины, оборудованной новым механизмом выброса щепы. В ходе исследования были получены данные о массе измельченных порубочных остатков и фракционном составе полученной щепы. Для установления зависимости между технологическими параметрами машины и ее производительностью в измельчении порубочных остатков был проведен регрессионный анализ. Анализ полученных результатов выполнялся с использованием специализированных прикладных программ MS Excel и Statistica. Полученные зависимости представлены в таблице.

Результаты изучения влияния технологических параметров на массу измельченных порубочных остатков при помощи опытного образца машины для измельчения порубочных остатков, оснащенных новой конструкцией механизма выброса щепы

Results of studying the influence of technological parameters on the mass of shredded felling residues using a prototype machine for shredding felling residues equipped with a new design of chip ejection mechanism

Параметр \ Значение	Значение вероятности получения отрицательного значения	Стандартная ошибка значения вероятности получения отрицательного значения	Свободный коэффициент	Стандартная ошибка свободного коэффициента	T (44)	p-уровень
Период			7,64	18,24	0,41	0,67
Угловая скорость ω , $1/c$	0,85	0,071	1,83	0,15	12,02	1,7E-15
Количество отверстий в кожухе m , шт.	0,17	0,071	0,036	0,01	2,40	0,02
Скорость выброса щепы v , м/с	0,11	0,071	11,85	7,59	1,56	0,12

Примечание: Значение регрессии для зависимой переменной: P_КГ_МИН; значение корреляции 0,88; значение коэффициента детерминации 0,77; скорректированное значение коэффициента детерминации 0,76; $F(3,44)=50,905$; $p < 0,00000$; стандартная ошибка оценки: 2,44.

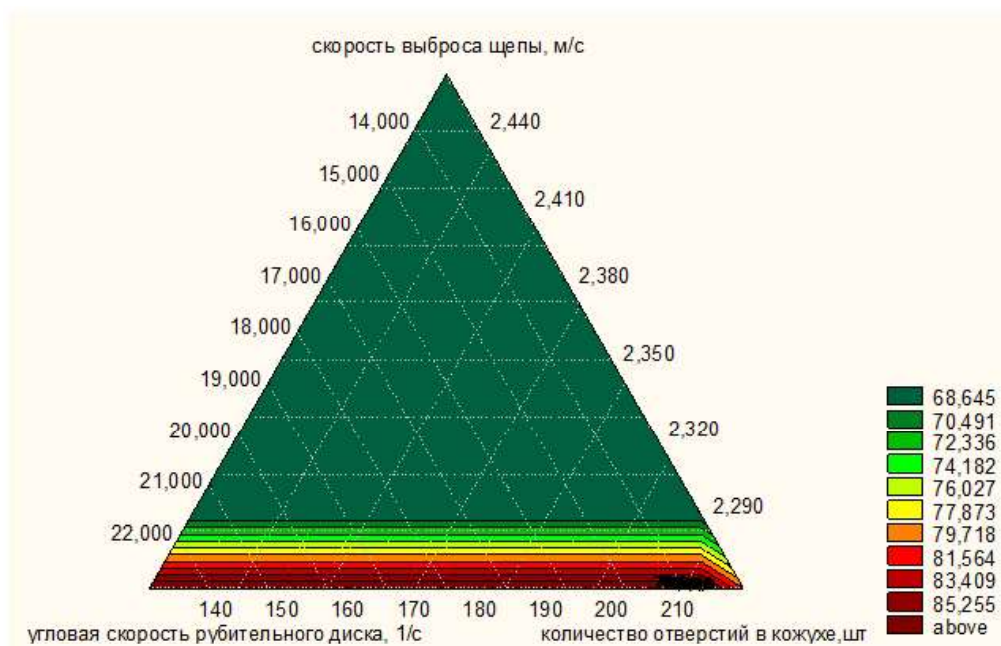
По окончании проведения математических расчетов было установлено, что производительность машины для измельчения порубочных остатков зависит от технологических параметров. Данная зависимость была описана с помощью регрессионного уравнения следующего вида:

$$P = 7,64 + 1,83 \omega + 0,03 m + 11,85 v, \quad (1)$$

где ω – факторы угловой скорости вращения рубильного диска; m – количество отверстий в кожухе; v – скорость выброса щепы. При этом $13,0 < \omega, 1/c < 23,0$; $130,0 < m, \text{шт.} < 220,0$; $2,26 < v, \text{м/с} < 2,46$.

Изучая коэффициенты уравнений, можно заметить, что коэффициенты факторов, влияющих на производительность устройства для измельчения порубочных остатков, тесно связаны между собой (коэффициент корреляции $R > 0,88$). Подтверждением этому служит то, что данные уравнения описывают свыше 84 % значений (коэффициент детерминации $R_1 > 0,78$). Из анализа коэффициентов уравнения по t -критерию видно, что факторы угловой скорости вращения рубильного диска и количества отверстий в кожухе статистически значимы на уровне 5 %. Кроме того, проведенный анализ коэффициентов регрессионного уравнения подтверждает его значимость согласно F -критерию и p -уровню.

Анализируя поверхность отклика, созданной с использованием уравнения (1), можно сделать вывод о влиянии угловой скорости вращения рубильного диска ($\omega, 1/c$), количества отверстий в кожухе ($m, \text{шт.}$) и скорости выброса щепы ($v, \text{м/с}$) на производительность дисковой рубильной машины ($P, \text{кг/мин}$), см. рисунок. Очевидно, что с увеличением угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 22 1/с производительность машины для измельчения порубочных остатков остается на уровне 66 кг/мин, а увеличение скорости выброса щепы с 2,29 до 2,44 м/с является следствием данного процесса.



Закономерность влияния скорости вращения рубильного диска ($\omega, 1/c$), количества отверстий в кожухе ($m, \text{шт.}$) и скорости выброса щепы ($v, \text{м/с}$) на производительность дисковой рубильной машины ($P, \text{кг/мин}$)

Regularity of influence of rotation speed of chopping disk ($\omega, 1/s$), number of holes in the hood ($m, \text{pcs.}$) and chip ejection speed ($v, \text{m/s}$) on productivity of disk chipper ($P, \text{kg/min}$)

Важно отметить, что количество отверстий в кожухе рубильного диска практически не оказывает влияния на производительность рубильной машины в данном диапазоне угловой скорости вращения. Однако при превышении угловой скорости свыше 22 1/с увеличение количества отверстий в кожухе до 200 шт. и более приводит к повышению производительности рубильной машины с 66 до 83 кг/мин (25 %).

Результаты исследования влияния скорости вращения рубильного диска ($\omega, 1/c$) и количества отверстий в кожухе ($m, \text{шт.}$) на производительность дисковой рубильной машины ($P, \text{кг/мин}$) показали, что она может быть описана регрессионным уравнением следующего вида:



$$P = 35,49 + 1,83 \omega + 0,036 m. \quad (2)$$

Проведенный анализ уравнений показывает, что коэффициенты, влияющие на производительность устройства для измельчения порубочных остатков, имеют тесную взаимосвязь ($R > 0,87$). Данное уравнение объясняет более 76 % значений ($R_1 > 0,76$). Анализ коэффициентов показал, что факторы угловой скорости вращения рубильного диска (ω) и количества отверстий в кожухе (m) оказывают значительное влияние.

Результаты экспериментов показали, что увеличение угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 24 $1/c$ и изменение количества отверстий в кожухе с 120 до 180 шт. приводит к увеличению производительности дисковой рубильной машины с 66 до 83 кг/мин (25 %).

При дальнейшем увеличении угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 24 $1/c$ и изменении количества отверстий в кожухе с 180 до 240 шт. производительность машины возрастает с 83 до 86 кг/мин (3 %). Эти результаты подтверждают правильность теоретических исследований и позволяют сделать вывод о том, что оптимальное количество отверстий в кожухе рубильной машины составляет 200 шт.

По результатам проведенного исследования обнаружилось, что скорость вращения измельчителя (ω , $1/c$) и скорость выброса щепы из дисковой рубильной машины (v , м/с) оказывают значительное влияние на производительность этой машины (P , кг/мин). Математические расчеты позволили выявить следующую взаимосвязь между этими факторами:

$$P = 14,06 + 1,83 \omega + 11,85 v. \quad (3)$$

Результат проведенной проверки адекватности уравнения показал, что оно тесно связано с другими переменными (коэффициент корреляции $R > 0,86$). Используемые уравнения описывают более 74 % значений (коэффициент детерминации $R_1 > 0,74$). Анализ коэффициентов уравнения по t -критерию помог выявить значимость факторов, таких как угловая скорость вращения рубильного диска (ω).

Результаты графических исследований, основанных на данном выражении, позволяют сделать вывод, что скорость вращения рубильного диска (ω , $1/c$) и скорость выброса щепы из дисковой рубильной машины (v , м/с) оказывают существенное влияние на производительность машины (P , кг/мин). Увеличение угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 24 $1/c$ и скорости выброса щепы из дисковой рубильной машины с 2,24 до 2,30 м/с приводит к увеличению производительности машины для измельчения порубочных остатков с 66 до 83 кг/мин (25 %). При дальнейшем увеличении угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 24 $1/c$ и скорости выброса щепы из дисковой рубильной машины с 2,30 до 2,48 м/с производительность машины возрастает с 83 до 86 кг/мин (3 %).

Заключение. Предложенная методика проведения лабораторных исследований позволяет не только определять зависимости, описывающие влияние различных технологических параметров на массу измельченных порубочных остатков, но и данные о фракционном составе производимой при различных режимах работы рубильной машины щепы.

Результаты обработки методами математической статистики, полученные в результате проведения многофакторного эксперимента значений технологических параметров, влияющих на массу измельченных порубочных остатков, позволяют утверждать, что наиболее значимыми факторами, влияющими на массу измельченного сырья, являются угловая скорость (ω , $1/c$) и количество отверстий в кожухе (m , шт.).

Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение угловой скорости вращения рубильного диска с 12 до 24 $1/c$ и скорости выброса щепы из дисковой рубильной машины с 2,24 до 2,30 м/с приводит к увеличению производительности машины для измельчения порубочных остатков с 66 до 83 кг/мин (25 %).

Также полученными исследованиями установлено, что между скоростью выброса щепы из дисковой рубильной машины и количеством отверстий в кожухе не наблюдается связи (коэффициент корреляции $R > 0,21$). Это свидетельствует о том, что скорость выброса щепы (v , м/с)



необходимо рассматривать как результат совместного влияния таких факторов, как скорость вращения рубильного диска (ω , 1/с) и количество отверстий в кожухе (n , шт.) на производительность дисковой рубильной машины (P , кг/мин).

Полученные в результате проведения лабораторных исследований математические зависимости можно использовать при проектировании рубильных машин для измельчения древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н. Биотоплива второго поколения: европейский опыт // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2012. Т. 2, № 8 (129). С. 61–64.
2. Беляев С. В., Левина М. С. Проблемы и перспективы получения и применения топлив из биомассы, снижающих выбросы парниковых газов // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 3. С. 83–100.
3. Германович А. О. Технологические процессы заготовки топливной щепы мобильными рубильными машинами // Междунар. науч. онлайн-конф.: Современные технологии деревообрабатывающей промышленности. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2018. С. 209–214.
4. Голякевич С. А. Анализ и перспективы использования лесозаготовительной техники в природно-производственных условиях Республики Беларусь // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 188–195.
5. Лой В. Н., Германович А. О., Чернявский В. В. Компоночные схемы самоходных рубильных машин // Мат-лы 85-й науч.-технич. конф. с междунар. участием: Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Минск, 2021. С. 40–41.
6. Лорсанова З. М. Дисперсионный анализ, как метод решения задач статистики в программе Excel // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 12–4 (56). С. 147–152.
7. Макаричев Ю. А., Иванников Ю. Н. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. 131 с.
8. Теория вероятностей и математическая статистика. Математические модели: учебник / Г. Ю. Ризниченко [и др.]. М.: Издательство Юрайт, 2023. 321 с.
9. Устройство для измельчения порубочных остатков: Патент на полезную модель № 195168 / С. В. Фокин О. А. Фомина; № 2019121482; заявл. 09.07.2019; опубл. 16.01.2020.
10. Фокин С. В., Бурлаков А. С. Теоретическое обоснование основных конструктивно-технологических параметров устройства для измельчения порубочных остатков // Инновационная деятельность. 2011. № 4–1 (17). С. 123–130.
11. Фокин С. В., Шпортко О. Н. О конструктивных схемах подачи сырья к измельчителю в дисковых рубильных машинах // Мат-лы науч.-технич. конф. с междунар. участием им. А. Ф. Ульянова: Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса. Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, 2023. С. 255–259.
12. Фокин С. В., Шпортко О. Н. Основные экологические и лесотехнические требования, предъявляемые к рубильным машинам фрезерного типа для измельчения древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2–1 (13–1). С. 144–146.
13. Фомина О. А. Обоснование параметров механизма выброса щепы рубильной машины для производства энергетической древесины на вырубках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.2001. Воронеж: Воронежский лесотехн. ун-т, 2022. 16 с.
14. Яшонков А. А. Основы научных исследований, организация и планирование эксперимента: учеб. пособие. Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2022. 41 с.
15. Böhlenius N., Nilsson U, Salk C. Liming increases early growth of poplars on forest sites with low soil pH // Biomass and Bioenergy. 2020. Vol. 138. 105572. Режим доступа: <https://sci-hub.ru/10.1016/j.biombioe.2020.105572>.
16. Djordjevich S. J., Djordjevich-Miloshevich S. B., Miloshevich S. M. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia // World Academy of Science, Engineering and Technology: International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2016. Vol. 10(7). P. 447–450.
17. Ljubojev N., Dukić-Mijatović M., Vojinovic Z. Renewable energy resources in agriculture: potential and legal framework in the Republic of Serbia // Economics of Agriculture. 2018. 65(3). 1227–1239. doi: 10.5937/ekoPolj1803227L.



REFERENCES

1. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Persky S. N. Biofuels of the second generation: European experience. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2012;2(8):(129):61–64. (In Russ.).
2. Belyaev S. V., Levina M. S. Problems and Prospects of Production and Application of Biomass Fuels Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Resources and Technology*. 2022;19(3):83–100. (In Russ.).
3. Germanovich A. O. Technological processes of fuel chip preparation by mobile chopping machines. Proceedings of the international scientific and practical online conference: Modern technologies of woodworking industry. Minsk, 2018. 209–214. (In Russ.).
4. Golyakevich S.A. Analysis and prospects of logging technology in natural production conditions of the republic of Belarus. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*. Minsk, 2021;2(246):188–195. (In Russ.).
5. Loy V. N., Germanovich A. O., Chernyavsky V. V. Composition schemes of self-propelled chopping machines. *Proceedings of the 85th Scientific and Technical Conference with International Participation: Forest Engineering, Material Science and Design*. Minsk, 2021. 40–41. (In Russ.).
6. Lorsanova Z. M. Dispersion analysis as a method of solving statistical problems in Excel. *Actual Scientific Research in the Modern World*. 2019;12–4(56):147–152. (In Russ.).
7. Makarichev Yu. A., Ivannikov Yu. N. Methods of experiment planning and data processing. Samara, 2016. 131 p. (In Russ.).
8. Probability theory and mathematical statistics. Mathematical models / G. Y. Riznichenko, A. T. Terekhin, V. D. Myatlev, L. A. Panchenko. Moscow, 2023. 321 p. (In Russ.).
9. Device for chopping of felling residues: Patent for utility model / S. V. Fokin, O. A. Fomina; No. 2019121482; appl. 07/09/2019; publ. 01/16/2020. (In Russ.).
10. Fokin S. V., Burlakov A. S. Theoretical substantiation of the main design and technological parameters of the device for chopping felling residues. *Innovation Activity*. 2011;4–1(17):123–130. (In Russ.).
11. Fokin S. V., Shportko O. N. About constructive schemes of raw material feeding to the chopper in disk chopping machines. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference with International Participation Named after A. F. Ulyanov. Innovative Technical Support of Agroindustrial Complex*. Saratov: Saratov State Vavilov Agrarian, 2023. 255–259. (In Russ.).
12. Fokin S. V., Shportko O. N. Basic environmental and forestry requirements for milling-type wood chippers. *Actual Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2015;3;2–1(13–1):144–146. (In Russ.).
13. Fomina O. A. Justification of the parameters of the mechanism of chip ejection of the chipper machine for the production of energy wood on clearings. Voronezh: Voronezh Forest Engineering University, 2022. 16 p.
14. Yashonkov A. A. Fundamentals of scientific research, organization and planning of the experiment. Kerch, 2022. 41 p. (In Russ.).
15. Böhlenius N., Nilsson U, Salk C. Liming increases early growth of poplars on forest sites with low soil pH. *Biomass and Bioenergy*. 2020;(138):105572. Available at: <https://sci-hub.ru/10.1016/j.biombioe.2020.105572>.
16. Djordjevich S. J., Djordjevich-Miloshevich S. B., Miloshevich S. M. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia. *World Academy of Science, Engineering and Technology: International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2016;10(7):447–450.
17. Ljubojev N., Dukić-Mijatović M., Vojinovic Z. Renewable energy resources in agriculture: potential and legal framework in the Republic of Serbia. *Economics of Agriculture*. 2018;65(3):1227–1239. doi: 10.5937/eko-Polj1803227L.

*Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 2024; принята к публикации 13.04.2024.
The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 06.04.2024; accepted for publication 13.04.2024.*

