

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8403

УДК: 630.37

Статья

Экспериментальное исследование энергоёмкости процесса производства технологической щепы на дисковых рубительных машинах

Петруша Сергей Витальевич

аспирант, Петрозаводский государственный университет, ros-nano@yandex.ru

Тихонов Евгений Андриянович

доктор технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет, tihonov@petrstu.ru

Получена: 7 февраля 2025 / Принята: 1 апреля 2025 / Опубликовано: 6 апреля 2025

Аннотация: В работе выполнено исследование энергоёмкости процесса производства древесной технологической щепы в древесно-подготовительном цехе АО «Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат». В статье представлен анализ актуальной для лесопромышленного комплекса проблемы энергоэффективности и целесообразности использования рубительных машин для производства щепы, используемой в качестве топлива для автономных энергоустановок. Актуальность этой проблемы обусловлена всё большим удалением мест лесозаготовки от территорий с развитой инфраструктурой и централизованных сетей энергоснабжения, что требует значительного снижения затрат на генерацию электроэнергии, например, таких как затраты топлива для дизельных генераторов, а также расходы на доставку этого топлива до мест заготовки леса. Основной целью этого исследования является экспериментальное определение удельного расхода электроэнергии дисковой рубительной машиной МР5-150 на производство 1 м³ древесной щепы. В ходе работы на рубительные машины древесно-подготовительного цеха АО «Кондопожский ЦБК» были установлены счётчики электроэнергии, показания которых регулярно фиксировались персоналом предприятия. Кроме этого, персонал фиксировал данные об общем потреблении древесной щепы предприятием и данные о количестве используемой привозной щепы, исходя из которых получилось определить объёмы щепы, производимой древесно-подготовительным цехом. В ходе работы также определено, что среднегодовой удельный расход электроэнергии на производство 1 м³ щепы, согласно

проведённому исследованию, составляет 3,97 кВт·ч/м³. При этом электродвигатели рубительных машин на предприятии работают при нагружении 20—25 % от номинальной мощности. Помимо этого, выявлено, что удельный расход электроэнергии на производство 1 м³ щепы значительно зависит от влажности древесины. Так, например, в январе удельный расход составлял 2,90 кВт·ч/м³ при влажности сырья более 40 %, а в июле — 5,35 кВт·ч/м³ при влажности сырья 26—40 %. Такие показатели получены при условии, что за сутки рубительные машины в древесно-подготовительном цехе АО «Кондопожский ЦБК» простаивают около 6 ч.

Ключевые слова: лесозаготовки; рубительные машины; технологическая щепка; энергоэффективность

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8403

Article

An experimental study of the energy intensity of the technological chip production process on disk chopping machines

Sergej Petrusha

Ph. D. student, Petrozavodsk State University, ros-nano@yandex.ru

Evgeny Tihonov

D. Sc. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University, tihonov@petsu.ru

Received: 7 February 2025 / Accepted: 1 April 2025 / Published: 6 April 2025

Abstract: The research was performed in the Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University. The object of the study was the production process of wood chips in the wood preparation workshop of JSC Kondopoga Pulp and Paper Mill. The article presents an analysis of the energy efficiency problem relevant to the timber industry and the feasibility of using chopping machines for the production of wood chips used as fuel for autonomous power plants. The increasing distance of logging sites from areas with developed infrastructure and centralized energy supply networks requires significant reduction in electricity generation costs, such as fuel costs for diesel generators, as well as the cost of delivering this fuel to logging sites. The purpose of this study was to experimentally determine the specific energy consumption of the MP5-150 disc chopping machine for the production of one cubic meter of wood chips. As part of the work, electricity meters were installed on the chopping machines of the Kondopoga Pulp and Paper Mill JSC, the readings of which were regularly recorded by the company's personnel. In addition, the staff recorded data on the consumption of wood chips by the enterprise and data on the amount of imported wood chips used. The average annual specific consumption for the production of one cubic meter of wood chips, according to the study, was 3.97 kWh/m³. At the same time, the electric motors of the chopping machines at the enterprise operated at a load of 20—25 % of the nominal. In addition, it was found that the specific energy consumption for the production of cubic meters of wood chips significantly depended on the moisture content of the wood. For example, in January, the specific consumption was 2.90 kWh/m³ with a moisture content of more than 40 %, and in July it was 5.35 kWh/m³

with a moisture content of 26—40 %. At the same time, it is very important to take into account that such indicators were obtained when the chopping machines in the wood preparation shop of JSC Kondopoga Pulp and Paper Mill were idle for about 6 hours per day.

Keywords: logging; chopping machines; technological chips; energy efficiency

1. Введение

В настоящее время производство древесной щепы является активно развивающимся направлением деятельности лесопромышленного комплекса (ЛПК) Российской Федерации. Во многом это обусловлено поисками решений вопросов энергоёмкости и экологии в ЛПК, являющихся наиболее важными в настоящее время [1], а также решения проблемы недостаточно полного использования древесных ресурсов [2].

Всё более явным становится удаление мест лесозаготовки от территорий с развитой инфраструктурой и централизованных сетей энергоснабжения. Удаление от централизованных сетей электроснабжения подразумевает получение электроэнергии с помощью дизельных генераторов. Однако их использование дорого обходится предприятиям лесопромышленного комплекса не только из-за затрат топлива для генерации электроэнергии, но и из-за расходов на доставку этого топлива. Помимо этого, использование дизельного топлива для генерации электроэнергии и для доставки топлива для генераторов оказывает значительное негативное влияние на экологию, увеличивая «углеродный след», высвобождая в атмосферу Земли углерод из ископаемого топлива [1].

В то же время увеличение логистических затрат в условиях лесных терминалов вынуждает лесопромышленные предприятия вывозить из леса только наиболее ценную древесину. При этом не выполняются или проводятся в недостаточном объёме переработка лесосечных отходов и многие необходимые лесохозяйственные работы, например, рубки прореживания, санитарные рубки, своевременное удаление сухостоя и т. д. [3].

Решением этих проблем может являться использование отходов и низкокачественной древесины в качестве топлива для автономных энергоустановок малой мощности [4]. На данный момент актуальным остаётся вопрос энергоэффективности таких установок. Для их работы используется топливная щепа, которая производится с использованием специальных агрегатов для измельчения древесины — рубительных машин.

Различают несколько типов рубительных машин. Среди них рубительные машины с приводом от трактора, с собственным бензиновым или дизельным двигателем и с приводом от электродвигателя. Помимо этого, рубительные машины можно разделить на группы в зависимости от типа рабочего органа. В таком случае можно выделить дисковые рубительные машины, рабочий орган которых выполнен в виде плоского или профильного (геликоидального) диска с ножами на нём, и барабанные рубительные машины, рабочий орган которых выполнен в виде барабана с ножами на внешней поверхности [5], [6]. Рассмотрим подробнее конкретные модели рубительных машин.

Рубительная машина итальянского производства Pezzolato РТН 30.70 имеет два различных варианта привода: от вала отбора мощности трактора и от собственного дизельного двигателя. Во втором варианте используется двигатель JOHN DEERE мощностью 129 кВт. Максимальный диаметр измельчаемого материала составляет 300 мм при использовании мягкой древесины и 200 мм при использовании твёрдой древесины. Размеры приёмного окна

составляют 640×300 мм. Заявленная производительность $18\text{--}25$ м³/ч. Диаметр барабана 520 мм. Ширина барабана 640 мм. Общая масса 3900 кг [7].

Одна из наиболее широко распространённых дисковых рубительных машин российского производства МР2-20. Она оснащается электродвигателем мощностью 75 кВт. Максимальный диаметр перерабатываемого сырья составляет 220 мм, при этом размеры приёмного окна равны 250×350 мм. Заявленная производительность до 20 м³/ч. Диаметр ножевого диска 1270 мм. Частота вращения диска 600 об./мин. Общая масса рубительной машины 6295 кг [8].

Ещё одна рубительная машина итальянской фирмы Pezzolato модели РТН 1000/1000 Electric. Привод данной модели осуществляется от электродвигателя мощностью 200 кВт. Размеры приёмного окна у этой модели равны 1000×600 мм. Максимальная производительность составляет $180\text{--}200$ м³/ч. Диаметр, как и ширина барабана, составляет 1000 мм [9].

Рубительная машина МР5-150 (фото 1) оснащена электродвигателем мощностью 630 кВт. Максимальный диаметр перерабатываемого сырья составляет 600 мм. Заявленная производительность $150\text{--}180$ м³/ч. Диаметр ножевого диска равен 2500 мм, он оснащён 15 ножами и вращается с частотой 375 об./мин [10]. Согласно исследованиям Н. С. Вольмана [11] и А. А. Санникова [12], число лопаток, создающих воздушный поток для выноса щепы из кожуха рубительной машины, должно соответствовать количеству режущих элементов.



Фото 1. Рубительная машина МР5-150 с приводом от электродвигателя [фото авторов]

Photo 1. Chopping machine MP5-150 with electric motor drive

Несмотря на существование множества различных производителей и моделей рубильных машин, остаётся открытым вопрос их энергоэффективности и целесообразности использования для производства топлива для автономных энергоустановок малой мощности. Существующие исследования основаны на математических моделях и паспортных данных рубильных машин об их энергопотреблении и производительности, что сложно считать достаточным обоснованием эффективности использования рубильных машин в таких энергоустановках.

Данное исследование посвящено вопросу определения удельного расхода электроэнергии на производство 1 м^3 технологической щепы экспериментальным путём и анализу эффективности использования электроэнергии на дисковых рубильных машинах MP5-150.

2. Материалы и методы

Исследование было проведено на предприятии АО «Кондопожский ЦБК». В рубильном отделе древесно-подготовительного цеха (ДПЦ) предприятия расположены две рубильные машины MP5-150. На рисунке 1 изображена схема рубильной машины MP5-150.

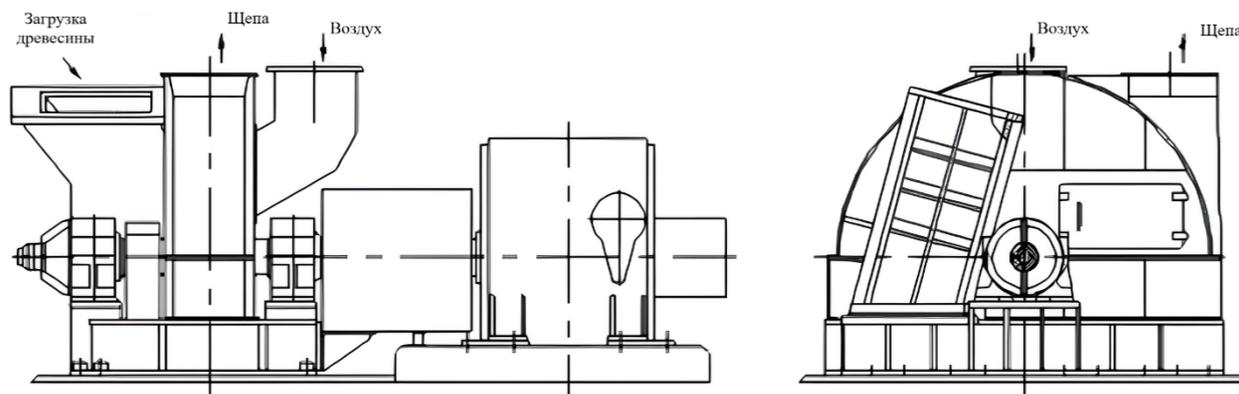


Рисунок 1. Схема рубильной машины MP5-150 [13]

Figure 1. The scheme of the chopping machine MP5-150

Дисковые ножевые рубильные машины MP5-150 с плоской поверхностью межножевых секторов предназначены для измельчения круглой древесины хвойных и лиственных пород на технологическую щепу для целлюлозно-бумажного, плитного и гидролизного производства. Направление подачи сырья в рубильные машины наклонное. Выброс щепы — вверх, в циклон.

Основные узлы рубильных машин — механизм рубки, приводной электродвигатель, муфта зубчатого типа, ленточный тормоз. Механизм рубки включает: ротор с подшипниковыми опорами, загрузочный патрон и кожух, установленные на общей раме сварной конструкции. Привод ротора рубильной машины MP5-150 — от асинхронного

электродвигателя с фазным ротором [13]. Диаметр ножевого диска рубительной машины 2500 мм, на диске расположены 15 ножей с углом заточки от 30 до 45°.

В течение года персонал АО «Кондопожский ЦБК» вел учёт электроэнергии, расходуемой рубительными машинами, а также определял объём щепы, произведённой ДПЦ.

На протяжении этого года работа в цеху шла сменами по 12 ч, в течение которых примерно час рубительная машина простаивала в связи с заменой ножей и ещё 3 ч работала на холостом ходу в связи с обедами, уборками и передачей смены.

Расход электроэнергии дисковыми рубительными машинами МР5-150 фиксируется с помощью счётчиков электроэнергии. Счётчики находятся на подстанции ДПЦ, они установлены и обслуживаются электротехнической службой предприятия.

На рубительной машине МР5-150 № 415 (по внутренней нумерации ДПЦ) установлен счётчик электроэнергии индукционный СА3У-И670Д, предназначенный для учёта активной и реактивной электроэнергии в однофазных и трёхфазных сетях переменного тока. Класс точности 2.0, выпускается по ГОСТ Р 52321-2005 [14].

На фото 2 изображён микропроцессорный счётчик электроэнергии ЭНЕРГОМЕРА СЕ303 S31. Это трёхфазный счётчик трансформаторного или непосредственного включения, предназначенный для измерения активной и реактивной электрической энергии, мощности, частоты напряжения, коэффициентов активной и реактивной мощностей, углов между векторами фазных напряжений и векторами фазных токов и напряжений, среднеквадратического значения напряжения, силы тока. Класс точности 0.5, соответствует ГОСТ 31819.22-2012 (IEC 62053-22:2003) [15]. Такой счётчик установлен на другой рубительной машине МР5-150 № 416 (по внутренней нумерации ДПЦ).

Показания этих счётчиков ежедневно записываются дежурным персоналом цеха технического обслуживания и ремонта в журнал учёта электроэнергии. Кроме этого, счётчик ЭНЕРГОМЕРА СЕ303 S31 имеет возможность измерения и вычисления текущих параметров сети, которые можно запросить через цифровые интерфейсы счётчика. С помощью этой функции было проведено исследование суточного потребления электроэнергии рубительной машиной.

Щепа из ДПЦ поступает на целлюлозный завод посредством пневмотранспорта, по этой причине оценка объёма произведённой щепы непосредственно на выходе из рубительных машин невозможна, поэтому объём рассчитывается исходя из количества загрузок варочных котлов.

Каждый варочный котёл имеет фиксированный объём загрузки 62 м³. Загрузка варочных котлов щепой производится из бункеров-накопителей через систему ленточных транспортёров и пересыпных устройств. Данные о количестве загрузок котлов фиксируются старшим варщиком и сменным мастером целлюлозного завода. Информация передаётся контрольным мастерам и ежемесячно заносится в журнал «Сменный рапорт работы АО "Кондопожский ЦБК"».



Фото 2. Микропроцессорный счётчик электроэнергии ЭНЕРГОМЕРА CE303 S31 [рисунок авторов]

Photo 2. Microprocessor-based electricity meter ENERГОМЕРА CE303 S31

Однако при производстве целлюлозы на предприятии, помимо щепы, произведённой рубительными машинами в ДПП, используется щепа, закупаемая у сторонних поставщиков. Она поставляется на производственную площадку АО «Кондопожский ЦБК» автомобильным, железнодорожным и водным транспортом. Железнодорожные вагоны и суда со щепой выгружаются на промежуточную площадку в грузовом порту, затем щепа перевозится на площадки хранения или непосредственно в производство. Щепа, поставляемая автомобильным транспортом, направляется на площадку хранения либо сразу в производство.

Данные о количестве привозной щепы, поступающей в производство, фиксируются экспертами компании «Шмидт и Олафсен». Ежедневно эксперты фиксируют данные в электронной таблице и передают их контрольному мастеру и производственным подразделениям. Данные о количестве привозной щепы и количестве загрузок варочных котлов можно использовать для расчёта объёма щепы, произведённой ДПП.

3. Результаты

В результате исследования количества произведённой щепы была составлена таблица 1.

Таблица 1. Количество загрузок котлов и произведённой щепы

Table 1. Number of boilers loadings and wood chips delivered

Месяц	Количество загруженных котлов, шт.	Объём привозной щепы, м ³
1	662	16 065,2
2	665	23 364,0
3	720	24 381,6
4	674	24 965,9
5	696	25 972,7
6	682	29 939,1
7	614	28 786,4
8	703	28 254,1
9	697	31 393,1
10	694	28 470,9
11	684	29 726,2
12	716	29 971,0

Исходя из полученных данных, можно найти количество щепы, производимой ДПЦ АО «Кондопожский ЦБК» по следующей формуле:

$$V_{\text{ДПЦ}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{прив}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{прив}}$ — объём привозной щепы, м³; $V_{\text{общ}}$ — общий объём щепы, потреблённый производством за месяц, который вычисляется по формуле

$$V_{\text{общ}} = N \cdot V_{\text{котла}}, \quad (2)$$

где N — количество загрузок варочных котлов за месяц, шт.; $V_{\text{котла}} = 62 \text{ м}^3$ — объём одного котла.

Объём произведённой ДПЦ щепы по месяцам представлен в таблице 2.

Данные о суммарном потреблении электроэнергии за месяц по счётчикам представлены в таблице 3. Данные о фактическом потреблении обозначены с учётом коэффициента трансформации $k = 1800$, указанного в документации электротехнической службы предприятия.

Таблица 2. Объем щепы, произведённой ДПЦ

Table 2. The volume of wood chips produced by the wood preparation workshop

Месяц	Объём щепы, потреблённой производством, м ³	Объём привозной щепы, м ³	Объём щепы, произведённой ДПЦ, м ³
1	41 044	16 065,2	24 978,8
2	41 230	23 364,0	17 866,0
3	44 640	24 381,6	20 258,4
4	41 788	24 965,9	16 822,1
5	43 152	25 972,7	17 179,3
6	42 284	29 939,1	12 344,9
7	38 068	28 786,4	9 281,6
8	43 586	28 254,1	15 331,9
9	43 214	31 393,1	11 820,9
10	43 028	28 470,9	14 557,1
11	42 408	29 726,2	12 681,8
12	44 392	29 971,0	14 421,0

Таблица 3. Данные о потреблении электроэнергии

Table 3. Data on electricity consumption

Месяц	Потребление электроэнергии по счётчикам, ед.	Фактическое потребление электроэнергии, кВт·ч
1	40,3	72 540
2	33,3	59940
3	39,3	70740
4	34,7	62460
5	35,6	64080
6	27,6	49680
7	27,6	49680
8	35,2	63360
9	30,7	55260
10	37,3	67140
11	34	61200
12	38	68400

Используя данные о потреблении электроэнергии и объёмах произведённой ДПЦ щепы, можно вычислить удельный расход электроэнергии на производство 1 м³ щепы по формуле

$$W_{уд} = \frac{W}{V_{ДПЦ}}, \quad (3)$$

где W — количество энергии, затраченное на производство щепы объемом $V_{\text{ДПЦ}}$, кВт·ч/кВт·час.

Данные об удельном потреблении электроэнергии на производство 1 м³ щепы по месяцам представлены в таблице 4.

Таблица 4. Удельный расход электроэнергии на производство 1 м³ щепы

Table 4. Specific energy consumption for the production of one cubic meter of wood chips

Месяц	Фактическое потребление электроэнергии, кВт·ч	Объем щепы, произведённой ДПЦ, м ³	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³
1	72 540	24 978,8	2,90
2	59 940	17 866,0	3,35
3	70 740	20 258,4	3,49
4	62 460	16 822,1	3,71
5	64 080	17 179,3	3,73
6	49 680	12 344,9	4,02
7	49 680	9 281,6	5,35
8	63 360	15 331,9	4,13
9	55 260	11 820,9	4,67
10	67 140	14 557,1	4,61
11	61 200	12 681,8	4,83
12	68 400	14 421,0	4,74

Исходя из полученных данных, наиболее энергоэффективным месяцем является январь (2,90 кВт·ч/м³), что может быть связано с оптимальными условиями работы оборудования и качеством сырья.

В январе наблюдается максимальная производительность работы рубительной машины ДПЦ, что связано с низким объемом привозного сырья и увеличением объема собственного производства щепы. Для увеличения объема собственного производства барабан рубительного отдела загружается мерным балансом (1,25 м). Также в зимние месяцы в производство поступает древесина с влажностью более 40 %, что положительно сказывается на её окоривании и переработке в рубительных машинах.

Наименее энергоэффективным месяцем является июль (5,35 кВт·ч/м³), что может быть обусловлено пониженной влажностью древесины и снижением производительности оборудования.

В летние месяцы влажность древесины, поступающей на производство, согласно данным лаборатории ДПЦ, составляла от 26 до 40 %, что увеличивает нагрузку на оборудование рубительного отдела.

Также с повышением объёмов привозной щепы рубительный отдел ДПЦ снижает объём собственного производства и перерабатывает в щепу только отходы производства, в виде короткомерных балансов и балансов, отправленных на повторную окорку.

Среднегодовой удельный расход электроэнергии на производство 1 м³ щепы:

$$W_{\text{уд/год}} = \frac{W_{\text{год}}}{V_{\text{ДПЦ/год}}} = \frac{744480}{187543,8} = 3,97 \text{ кВт} \cdot \text{час/м}^3, \quad (4)$$

где $W_{\text{год}}$ — суммарное потребление электроэнергии за год, кВт·ч; $V_{\text{ДПЦ/год}}$ — объём щепы, произведённой ДПЦ за год, м³.

Помимо этого, с помощью счётчика электроэнергии ЭНЕРГОМЕРА СЕ303 S31 было проведено исследование потребления электроэнергии рубительной машиной за сутки. Для этого данные о потребляемой мощности фиксировались с интервалом 10 мин на протяжении двух рабочих смен (24 ч). В результате исследования был построен график, представленный на рисунке 2.



Рисунок 2. График мощности, потребляемой рубительной машиной за сутки [рисунок авторов]

Figure 2. The graph of the power consumed by the chopping machine per day

Из графика видно, что дважды за сутки рубительная машина простаивает, это связано с заменой ножей. Замена производится в 12 ч дня и ночи и занимает около часа. Помимо этого, около 6 ч за сутки рубительная машина работает в режиме холостого хода: примерно 1,5 ч перед каждой пересменкой во время уборки участка и приёма смены, а также около 1,5 ч в оставшееся время смены, что также связано с уборками, обедами и прочими перерывами.

Также был составлен график потребления электроэнергии посуточно в течение месяца (рисунок 3).



Рисунок 3. График ежесуточного потребления электроэнергии за декабрь [рисунок авторов]

Figure 3. Daily electricity consumption schedule for December

На графике заметны значительные колебания потребления электроэнергии изо дня в день. Влияние на эти колебания оказывают влажность древесины, качество и тип сырья, однако наиболее важным фактором остаётся потребность производства в собственной щепе.

4. Обсуждение и заключение

В результате исследования была проанализирована работа рубительных машин древесно-подготовительного цеха АО «Кондопожский ЦБК», определён объём производимой за год технологической щепы, собраны данные об энергопотреблении рубительных машин. Также был рассчитан удельный расход электроэнергии на производство 1 м^3 технологической щепы. В течение года этот параметр имеет значительный разброс из-за качества древесины и потребности предприятия в ней, однако в среднем за год он составляет $3,97 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$. При этом электродвигатели рубительных машин на предприятии работают при нагружении 20—25 % от номинальной мощности.

Результаты исследования могут помочь в более точной оценке эффективности использования рубительных машин для производства топлива для автономных энергоустановок, используемых в условиях лесных терминалов.

Кроме того, на данный момент проводится аналогичное исследование с использованием барабанных рубительных машин.

Список литературы

1. *Тихонов Е. А.* Научные основы обеспечения энергетической устойчивости технологических процессов лесозаготовительных производств на основе использования лесосечных отходов. Специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: Дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2022. 306 с. EDN WNPVLK.
2. *Анисимов П. Н., Медяков А. А.* Параметры энергетического модуля с двигателем на генераторном газе для автономного энергообеспечения лесосечных машин // Энергосбережение. Теория и практика: Труды Десятой междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 19—23 окт. 2020 года. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2020. С. 299—306. EDN MLZXTY.
3. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ / Н. В. Малышева, А. Н. Филипчук, Т. А. Золина [и др.] // Лесохозяйственная информация. 2019. № 1. С. 101—128.
4. Использование топливной древесины в условиях распределённой энергетики / Г. И. Кольниченко, В. А. Лавриченко, Я. В. Тарлаков [и др.] // Лесной вестник. 2020. Т. 24, № 2. С. 74—80.
5. Рубительные машины // Мульче. URL: <https://mulche.ru/catalog/rubitelnye-mashiny/> (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.
6. Рубительные машины // Петрозаводский государственный университет. URL: <https://forest.petsu.ru/courses/chip/page9.htm> (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.
7. Pezzolato PTH 30.70 // Pezzolato. URL: <https://pezzolato.it/en/machine/pth-30-70-autonomous-motor/> (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.
8. *Коробов В. В., Рушинов Н. П.* Переработка низкокачественного древесного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с. = *Korobov V. V., Rushnov N. P.* Processing of Low-Quality Wood Raw Materials (Problems of Waste-Free Technology). Moscow: Ecologia Publ., 1991. 288 p.
9. Pezzolato PTH 1000/1000E // Pezzolato. URL: <https://pezzolato.it/en/machine/pth-1000-1000-e-electric-motor/> (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.
10. *Васильев С. Б., Толпыго В. А.* Промышленные испытания дисковых рубительных машин MPP12-70ГН и MP5-150 // Resources and Technology. 2001. Т. 3. С. 16—18.
11. *Вольман Н. С.* Влияние числа ножей и скорости вращения рубительной машины на количество отходов при рубке древесины // Труды ЛТИ ЦБП. Л., 1970. Вып. 27. С. 96—101.
12. *Санников А. А., Куцубина Н. В., Витвинин А. М.* Надёжность машин. Трибология и триботехника в оборудовании лесного комплекса: Учебное пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. 145 с.
13. *Щербакова Т. П., Пестова Н. Ф.* Технологическое оборудование ЦБП: Учебное пособие. Сыктывкар: СЛИ, 2013. URL: <http://lib.sfi.komi.com>. Текст: электронный.
14. Счётчики // Юше-Электро. URL: <https://yse-electro.ru/rus/catalog/category38/category46/product15884.shtml> (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.
15. CE303-S31 // Симэнерго. URL: https://simenergo.com/catalog/askue/energomera/mnogo-functionalnie_energomera/ce303-s31/ (дата обращения: 03.02.2025). Текст: электронный.

References

1. Tikhonov E. A. *Scientific foundations of ensuring energy sustainability of technological processes of logging industries based on the use of logging waste. Specialty 05.21.01 «Technology and machinery of logging and forestry»: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences*. Petrozavodsk, 2022. 306 p. (In Russ.) EDN WNPVLK.
2. Anisimov P. N., Medyakov A. A. Parameters of an energy module with a generator gas engine for autonomous power supply of cutting machines. *Energy saving theory and practice: proceedings of the tenth international school-seminar of young scientists and specialists, Moscow, October 19—23, 2020*. Kursk, Closed Joint-Stock Company «University Book», 2020, pp. 299—306. (In Russ.). EDN MLZXTY.
3. Malysheva N. V., Filipchuk A. N., Zolina T. A., Silnyagina G. V. Quantitative assessment of wood detritus reserves in the forests of the Russian Federation according to GIL data. *Forestry information*, 2019, no. 1, pp. 101—128. (In Russ.)
4. Kolnichenko G. I., Lavrichenko V. A., Tarlakov Ya. V., Sirotov V. A. The use of fuel wood in distributed energy. *Lesnoy vestnik*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 74—80. (In Russ.)
5. Chopping machines. Mulche. Available at: <https://mulche.ru/catalog/rubitelnye-mashiny/> (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic. (In Russ.)
6. Chopping machines. Petrozavodsk State University. Available at: <https://forest.petsu.ru/courses/chip/page9.htm> (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic. (In Russ.)
7. Pezzolato PTH 30.70. Pezzolato. Available at: <https://pezzolato.it/en/machine/pth-30-70-autonomous-motor/> (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic.
8. Korobov V. V., Rushnov N. P. *Processing of low-quality wood raw materials (problems of waste-free technology)*. Moscow, Ecology, 1991. 288 p. (In Russ.) = Korobov V. V., Rushnov N. P. *Processing of Low-Quality Wood Raw Materials (Problems of Waste-Free Technology)*. Moscow, Ecologia Publ., 1991. 288 p. (In English.)
9. Pezzolato PTH 1000/1000E. Pezzolato. Available at: <https://pezzolato.it/en/machine/pth-1000-1000-e-electric-motor/> (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic.
10. Vasiliev S. B., Tolpygo V. A. Industrial tests of circular chopping machines MPR12-70GN and MP5-150. *Resources and Technology*, 2001, vol. 3, pp. 16—18. (In Russ.)
11. Volman N. S. The influence of the number of knives and the speed of rotation of the chopping machine on the amount of waste during wood cutting. *Proceedings LTI CBP*. Leningrad, 1970, iss. 27, pp. 96—101. (In Russ.)
12. Sannikov A. A., Kutsubina N. V., Vitvinin A. M. *Reliability of machines. Tribology and tribotechnics in the equipment of the forest complex: Textbook*. Yekaterinburg, Ural. State Forestry University, 2006. 145 p. (In Russ.)
13. Shcherbakova T. P., Pestova N. F. *Technological equipment of CBP: Textbook*. Syktyvkar, SLI, 2013. Available at: <http://lib.sfi.komi.com>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
14. Counters. Yushe-Electro. Available at: <https://yse-electro.ru/rus/catalog/category38/-category46/product15884.shtml> (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic. (In Russ.)
15. CE303-S31. Simenergo. Available at: https://simenergo.com/catalog/askue/energomera/-mnogofunctionalinie_energomera/ce303-s31/ (accessed: 02.03.2025). Text. Image: electronic. (In Russ.)