

УДК 630.331

Математическое моделирование удельных энергозатрат и удельных трудозатрат технологических процессов на нижнем лесном складе

М.В. Коломинова

Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская 13, Ухта, Республика Коми, Россия
mk1108@mail.ru

Статья поступила 12.10.2015, принята 3.11.2015

Одной из современных тенденций в лесной отрасли является сокращение нижних складов, мотивированное увеличением выхода сортиментов непосредственно на лесосеке. Безусловно, широкое распространение сортиментной технологии с использованием многооперационных машин имеет свои преимущества, но без нижних лесных складов интенсивное развитие промышленного производства вряд ли возможно. В связи с этим приобретают особую актуальность вопросы повышения эффективности использования нижнескладского оборудования. С учетом того, что основные технологические процессы на нижних складах имеют большую энерго- и трудоемкость, в статье исследованы математические модели для расчета удельных энергозатрат и удельных трудозатрат для различного оборудования нижних лесных складов, в частности, консольно-козловых и козловых кранов, стационарных установок для очистки деревьев от сучьев и раскряжевочных установок, сортировочного продольного транспортера, роторных окорочных станков, лесопильных рам, круглопильных и ленточнопильных станков. Разработанные математические модели и полученные результаты имеют практическое значение для лесозаготовительных предприятий. Внедрение методов по обоснованию рациональных с точки зрения минимальной энергоемкости и наименьшей трудоемкости технологических процессов производства и обработки круглых лесоматериалов позволит снизить затраты энергии, трудозатраты и себестоимость продукции, а также повысить эффективность технологических процессов лесозаготовительного производства. Перспективой для дальнейших исследований является разработка методики оценки эффективности лесозаготовок по предлагаемым критериям.

Ключевые слова: математическая модель; удельные энергозатраты; удельные трудозатраты; нижний лесной склад.

Mathematical modeling of specific power inputs and specific expenditures of labour of work process on lower forest depots

M.V. Kolominova

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia 13, Pervomayskaya st., Ukhta, Republic of Komi, Russia
mk1108@mail.ru

Received 12.10.2015, accepted 3.11.2015

Currently, the number of lower timber depots in the country is declining due to the increase in the percentage receiving the logs directly at the felling site. Of course, widespread throughout the assortment technology with use of multifunction machines have their advantages. But without the lower timber depots also essential for the development of the forest industry. In this regard, the issues of increasing the efficiency equipment to the lower timber depots are particularly relevant. In this case, all technological processes to the lower timber depots are relatively energy-intensive and time-consuming processes. The article examines a mathematical model for the calculation of specific power inputs and specific expenditures of labour for various equipment to the lower timber depots. Studies were selected cantilever-gantry and gantry cranes, stationary unit for the removal of trees from branches and bucking, sorting longitudinal conveyor, rotary debarking machines, sawing machines, circular sawing and band sawing machines. The analysis of specific power inputs and specific expenditures of labour of this equipment on various factors is carried out. The developed mathematical model and the results are of practical value to logging companies. Implementation of the developed methods for substantiation of rational from the viewpoint of minimum energy consumption and lowest and the complexity of technological processes of production and processing of roundwood will reduce energy costs and labour costs process and production costs. Thus, the issue of increase of efficiency of technological processes of logging is resolved. The prospect of further studies is development of a methodology for assessing the effectiveness of logging on the proposed criterions.

Keywords: mathematical model; specific power inputs; specific expenditures of labour; lower forest depots.

Введение. Повышение эффективности технологических процессов лесозаготовок является актуальным вопросом для исследований. Одним из основных показателей эффективности того или иного технологического

процесса является часовая производительность машины или установки, но необходимо также учитывать и такие важные показатели, как удельная энерго-

емкость (удельные энергозатраты) и удельная трудоемкость (удельные трудозатраты) оборудования [1].

Лесозаготовительное производство включает в себя три основные фазы: лесосечные работы, транспорт леса и нижнескладские работы. На лесосечных работах и вывозке леса применяются довольно энергозатратные и трудозатратные машины и механизмы [2], поэтому при работе нижнескладского оборудования, в условиях, когда с каждым годом увеличивается стоимость 1 кВт·час используемой электроэнергии, вопросы расчета и анализа удельных энерго- и трудоемкости особенно важны.

Целью настоящей работы является исследование различного нижнескладского оборудования с точки зрения минимальных удельных затрат энергии и удельных трудозатрат в зависимости от различных факторов.

Многие зарубежные ученые посвятили свои труды вопросам повышения эффективности технологических процессов лесозаготовительного производства [3–9].

Материалом для исследований служат также труды признанных отечественных ученых в области лесозаготовительного производства [10–14].

Результаты исследования. Все операции, выполняемые на лесных складах, делят следующим образом:

- операции по первичной обработке и частичной переработке заготовленного леса (очистка деревьев от сучьев, поперечная и продольная распиловка, окорка, раскалывание, измельчение в щепу и др.);
- переместительные операции (выгрузка, сортировка, штабелевка, погрузка лесоматериалов, внутри-складской транспорт и др.).

Расчет и снижение удельных энергозатрат нижнескладского оборудования при работе установок и станков являются очень актуальными вопросами.

Рассмотрим расчет удельных энерго- и трудозатрат кранов, стационарных сучкорезных и раскряжевочных установок, сортировочного транспортера, станков для продольной распиловки и окорочных станков.

Удельные энергозатраты (удельная энергоемкость) — это показатель, определяющий количество энергии, отнесенное к единице выполненной технологической работы или продукции (м^3).

Удельные трудозатраты (удельная трудоемкость) — это количество единиц затрат труда персонала, необходимого для завершения работы или создания единицы экономического продукта (м^3).

Удельная энергоемкость, $\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$, при работе консольно-козлового крана типа ККС-10 и козлового крана типа ЛТ-62 определяется по формуле:

$$g_{кр.} = 2 \cdot (g_n + g_{мел.} + g_{пер.}), \quad (1)$$

где обозначены удельные энергоемкости следующих операций: g_n — подъем пачки лесоматериалов; $g_{мел.}$ — перемещение тележки вдоль моста крана; $g_{пер.}$ — перемещение крана.

В общем виде формулу (1) можно записать как:

$$g_{кр.} = \frac{2 \cdot C \cdot \gamma \cdot h \cdot v}{\eta} + \frac{2 \cdot C \cdot \mu_{мел.} \cdot l_{мел.} \cdot (Q_{нач.} + 2 \cdot G_{мел.}) \cdot v}{V_{нач.} \cdot \eta} + \frac{2 \cdot C \cdot \mu_{кр.} \cdot l_{кр.} \cdot (Q_{нач.} + 2 \cdot G_{кр.}) \cdot v}{V_{нач.} \cdot \eta}, \quad (2)$$

где $C = 1/3600$ — переводной коэффициент; γ — объемная сила тяжести древесины, $\text{кН}/\text{м}^3$; h — высота подъема груза, м ; $\mu_{мел.}$ — коэффициент сопротивления движению тележки крана; $l_{мел.}$ — путь, проходимый тележкой крана при работе с одной пачкой лесоматериалов, м ; $Q_{нач.}$ — сила тяжести пачки лесоматериалов, кН ; $V_{нач.}$ — средний объем поднимаемой за один прием пачки лесоматериалов, м^3 ; $G_{мел.}$ — сила тяжести тележки крана с грейфером, кН ; $\mu_{кр.}$ — коэффициент сопротивления движению крана; $l_{кр.}$ — путь, проходимый краном при работе с одной пачкой лесоматериалов, м ; $G_{кр.}$ — сила тяжести крана, кН ; η — КПД передачи от двигателя к рабочим органам механизма; v — коэффициент увеличения затрат энергии при холостой работе технологического оборудования [15].

Удельная энергоемкость процесса очистки деревьев от сучьев, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, стационарными сучкорезными установками типа ПСЛ-2А определяется по формуле:

$$g_{оч.} = g_{загр.} + g_{ср.} + g_{протаск.}, \quad (3)$$

где обозначены удельные энергоемкости следующих операций: $g_{загр.}$ — загрузка одностреловым манипулятором комлевой части дерева в режущее устройство и эксцентриковые зажимы протаскивающего транспортера; $g_{ср.}$ — срезание сучьев; $g_{протаск.}$ — протаскивание дерева сквозь режущий механизм протаскивающим транспортером.

В общем виде формулу (3) можно записать как:

$$g_{оч.} = \frac{C \cdot v \cdot (G_m \cdot \mu_m \cdot r_m + K_{ср.} \cdot S)}{V_d \cdot \eta} + \frac{C \cdot v \cdot (1-k) \cdot Q_d \cdot \mu_d \cdot l_d}{V_d \cdot \eta} + \frac{C \cdot v \cdot (k \cdot Q_d + G_{пр.}) \cdot \mu_{пр.} \cdot l_d}{V_d \cdot \eta}, \quad (4)$$

где $V_d (V_x)$ — средний объем дерева (хлыста), м^3 ; $Q_d (Q_x)$ — сила тяжести дерева (хлыста), кН ; G_m — сила тяжести однострелового манипулятора, предназначенного для загрузки комлевой части дерева в режущее устройство и эксцентриковые зажимы протаскивающего транспортера, кН ; μ_m — коэффициент трения в подшипнике стрелы манипулятора; r_m — радиус поворота стрелы и рукояти манипулятора, м ; $K_{ср.}$ — удельная работа резания при срезании сучьев, $\text{кДж}/\text{м}^3$; S — средняя площадь сечения срезаемых сучьев, м^2 ; k — коэффициент, показывающий, какая доля веса дерева давит на протаскивающий транспортер; $\mu_d (\mu_x)$ — коэффициент сопротивления движению дерева (хлыста); $l_d (l_x)$ — средняя длина дерева (хлыста), м ; $G_{пр.}$ —

сила тяжести протаскивающего транспортера, κH ; μ_{np} — коэффициент сопротивления движению протаскивающего транспортера.

Наибольшее распространение из раскряжевочных установок с продольным перемещением хлыста получила раскряжевочная установка ЛО-15С для раскряжевки хлыстов объемом до $0,5-0,6 \text{ м}^3$.

Удельная энергоёмкость, $\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$, процесса раскряжевки хлыстов установкой ЛО-15С определяется по формуле:

$$g_{раскр.} = g_{укл.} + g_{подачи} + g_{пил.} + g_{отм.}, \quad (5)$$

где обозначена удельная энергоёмкость следующих операций: $g_{укл.}$ — поштучная укладка хлыстов манипулятором; $g_{подачи}$ — подача хлыстов транспортером; $g_{пил.}$ — пиление маятниковой пилой; $g_{отм.}$ — работа системы отмера длины и сбрасывания круглых лесоматериалов.

В общем виде формулу (5) можно записать как:

$$g_{раскр.} = \frac{C \cdot \gamma \cdot \omega_m \cdot \mu_m \cdot r_m \cdot v}{\eta} + \frac{[1,08 \cdot G_{ц.} \cdot \mu_{mp.} + 0,5 \cdot Q_x \cdot \mu_{m.p} + 0,08 \cdot Z_{мон.} + (0,5 \cdot Q_x + G_{ц.}) \cdot \frac{v_{mp.}}{g \cdot t}] \cdot C \cdot L_{mp.} \cdot v}{V_x \cdot \eta} + \frac{C \cdot n \cdot \pi \cdot d_{ср.}^2 \cdot b \cdot K_{раск.}}{4 \cdot V_x} \cdot \left[\frac{v}{\eta} + \frac{C_n \cdot u \cdot v}{v_{рез.} \cdot \eta} \right] + \frac{N_{отм.} \cdot K_c}{P_{p.раск.}}, \quad (6)$$

где ω_m — угол поворота стрелы и рукояти манипулятора, $рад$; r_m — радиус поворота стрелы и рукояти манипулятора, $с$; $L_{mp.}$ — длина подающего транспортера, $м$; $G_{ц.}$ — сила тяжести цепи подающего транспортера с траверсами, κH ; $Z_{мон.}$ — монтажное натяжение транспортера, κH ; t — время разгона транспортера, $с$; g — ускорение свободного падения, $м/с^2$; $\mu_{mp.}$ — коэффициент трения скольжения траверс транспортера по направляющим; b — ширина пропила, $м$; $v_{mp.}$ — скорость подающего транспортера, $м/с$; $v_{рез.}$ — скорость резания при раскряжевке хлыстов, $м/с$; n — число пропилов; $\pi = 3,14$; $d_{ср.}$ — средний диаметр хлыста, $м$; $K_{раск.}$ — удельная работа резания при раскряжевке хлыстов, $\kappa Дж/м^3$; C_n — коэффициент пропорциональности между усилиями резания и подачи; $N_{отм.}$ — установленная мощность электродвигателей системы отмера длины и сбрасывателей, кВт ; K_c — коэффициент, учитывающий отношение установленной мощности к потребляемой; $P_{p.раск.}$ — расчетная часовая производительность раскряжевочной установки, $м^3/час$.

Наибольшее распространение на лесных складах получил автоматизированный лесной транспортер ЛТ-86А, оборудованный гравитационными бревносбрасывателями односторонней сброски.

Удельная энергоёмкость процесса сортировки, $\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$, определяется по формуле:

$$g_{сорт.} = g_{mp.} + g_{сб.}, \quad (7)$$

где обозначены удельные энергоёмкости следующих технологических операций: $g_{mp.}$ — транспортировка круглых лесоматериалов; $g_{сб.}$ — сброска круглых лесоматериалов в карманы-накопители.

В общем виде формулу (7) можно записать как:

$$g_{сорт.} = \frac{C \cdot L_{с.мп.} \cdot v \cdot (1,08 \cdot G_{с.мп.} \cdot \mu_{с.мп.} + 0,5 \cdot Q_{сорт.} \cdot \mu_{сорт.} + 0,08 \cdot Z_{мон.})}{V_{сорт.} \cdot \eta} + \frac{N_{сб.} \cdot K_c}{P_{p.сорт.}}, \quad (8)$$

где $L_{с.мп.}$ — длина сортировочного транспортера, $м$; $G_{с.мп.}$ — сила тяжести сортировочного лесотранспортера, κH ; $Q_{сорт.}$ ($Q_{бр.}$) — сила тяжести сортимента (бревна), κH ; $\mu_{с.мп.}$ — коэффициент трения в подшипниках сортировочного транспортера; $\mu_{сорт.}$ — коэффициент трения сортиментов о сортировочный транспортер; $N_{сб.}$ — установленная мощность электродвигателя системы сброски, кВт ; $P_{p.сорт.}$ — расчетная часовая производительность сортировочного транспортера, $м^3/час$; K_c — коэффициент, учитывающий отношение установленной мощности к потребляемой; $V_{сорт.}$ ($V_{бр.}$) — средний объем сортимента (бревна), $м^3$ [16].

Удельные затраты энергии при окорке круглых лесоматериалов на роторных окорочных станках, $\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$, в общем виде можно выразить уравнением:

$$g_{ок.} = g_{коры} + g_u + g_{х.под.}, \quad (9)$$

где обозначены затраты энергии на выполнение следующих операций: $g_{коры}$ — удаление коры; g_u — подача кряжа в процессе окорки; $g_{х.под.}$ — усилие сопротивления холостого хода механизма подачи.

Роторные окорочные станки предназначены для чистой окорки лесоматериалов. Чистой окорке подвергаются лесоматериалы, подлежащие пропитке антисептиками (шпалы, столбы линий связи и электропередач), экспортные балансы, некоторые виды балансов для получения различных видов технической бумаги и бумаги особо высокого качества и т. д.

Окорка пиловочника, шпальника и других круглых лесоматериалов перед их распиловкой не только дает возможность использовать отходы лесопиления для нужд целлюлозно-бумажной промышленности, но и позволяет значительно улучшить раскрой бревен, увеличить выход пиломатериалов, повысить производительность лесопильного оборудования и стойкость пил.

Удельные затраты энергии на удаление коры можно определить по формуле:

$$g_p = \frac{C \cdot l_{бр.} \cdot Z \cdot (k_0 \cdot b_0 + q \cdot b \cdot \mu_k) \cdot v}{\eta \cdot V_{бр.}}, \quad (10)$$

где $l_{бр.}$ ($l_{сорт.}$) — средняя длина бревна (сортимента), $м$; Z — число короснимателей; k_0 — удельное сопротивление окорки, $\kappa H/м$; b_0 — ширина снимаемой полоски

кору, m ; q — давление кромки короснимателей, $\kappa H/m$; b — ширина контактной кромки, m ; μ_{κ} — коэффициент трения короснимателей.

Подающие механизмы на роторных окорочных станках должны осуществлять продольную подачу и центрирование кряжа относительно оси ротора, а также не допускать проворачивания кряжа под действием усилия окорки. В роторных окорочных станках наиболее распространены трех- и четырехвальцовые подающие механизмы. Также в качестве подающего механизма может применяться подпружиненный транспортер. Удельные затраты энергии на подачу кряжа в процессе окорки и холостой ход механизма подачи определяются по уравнению:

$$g_u + g_n = \frac{C \cdot l_{\text{copm.}} \cdot v \cdot [Z \cdot (\alpha_0 \cdot k_0 \cdot b_0 + q \cdot b \cdot \mu_{\kappa}) + Q_{\text{cop.}} \cdot \frac{\mu_1 \cdot d_n + 2 \cdot f}{d_e} + i_e \cdot G_e \cdot \frac{\mu_1 \cdot d_n}{d_e}]}{\eta \cdot V_{\text{cop.}}} \quad (11)$$

где α_0 — коэффициент соотношения между радиальным и осевым усилиями; μ_1 — коэффициент трения подшипников подающих вальцов; d_n — диаметр подшипника, m ; d_e — диаметр подающих вальцов, m ; f — коэффициент трения качения вальцов по бревну, m ; i_e — общее число подающих вальцов; G_e — сила тяжести одного вальца, κH .

На лесных складах продольную распиловку древесины выполняют на круглопильных бревнопильных, ленточнопильных станках и лесопильных рамах.

Рассмотрим работу лесопильной рамы Р 63-4Б, однопильного круглопильного станка с горизонтальным расположением пилы «Барс-ДГ» и однопильного ленточнопильного станка «Авангард ЛП-60», также с горизонтальным расположением пилы.

Удельные затраты энергии, $\kappa\text{Вт}\cdot\text{час}/\text{м}^3$, при продольной распиловке в общем виде можно выразить уравнением:

$$g_{\text{прод.}} = g_p + g_{\text{под.}} + g_{\text{перем.}} \quad (12)$$

где обозначены затраты энергии на выполнение следующих операций: g_p — резание древесины; $g_{\text{под.}}$ — подача кряжа в процессе резания; $g_{\text{перем.}}$ — перемещение распиливаемого сортимента при подаче к пильному механизму и после распила (на впереди- и позадирамных тележках при распиловке на лесопильных рамах и на цепных транспортерах при распиловке на круглопильных и ленточнопильных станках).

При продольной распиловке в качестве режущих инструментов у круглопильных станков применяют круглые пилы, у ленточнопильных станков — ленточные пилы, у лесопильных рам — прямые рамные пилы. Удельные затраты энергии на резание древесины в этих случаях можно определить по формуле:

$$g_p = \frac{C \cdot K \cdot b \cdot H \cdot l_{\text{copm.}} \cdot v}{\eta \cdot V_{\text{copm.}}} \quad (13)$$

где K — удельная работа резания, $\kappa\text{Дж}/\text{м}^3$; b — ширина пропила, m ; H — высота пропила, m ; a_c — коэффициент, учитывающий уменьшение площади пропила за счет сбega сортимента.

Удельные затраты энергии на подачу сортимента в процессе резания определяются по уравнению:

$$g_{\text{под.}} = \frac{C \cdot l_{\text{copm.}} \cdot v \cdot [P_0 \cdot \text{Sin}\theta \pm P_p \cdot \text{Cos}\theta + \mu \cdot (Q_{\text{copm.}} + Q_n \pm P_p \cdot \text{Sin}\theta \pm P_0 \cdot \text{Cos}\theta)]}{\eta \cdot V_{\text{copm.}}} \quad (14)$$

где Q_n — сила тяжести устройств, подающих кряж (тележек, цепей и т. д.), κH ; μ — коэффициент сопротивления перемещению сортимента, тележки или цепи по направляющим; θ — кинематический угол встречи, град., определяемый для круглопильных станков из выражения $\text{Cos}\theta = (0,5d + a) \cdot R$, где d — диаметр распиливаемого кряжа, m ; a — превышение направляющей, по которой перемещается распиливаемый кряж, над осью пильного диска, m ; R — радиус пилы, m ; P_p — усилие резания, κH ; P_0 — усилие отжима, κH .

Знаки при отдельных слагаемых, входящих в формулу (14), зависят от взаимного расположения пилы и распиливаемого кряжа и направлений скорости резания и подачи. При совпадении направлений скорости подачи и горизонтальной проекции резания (при подаче кряжа на пилу) пиление называют попутным, при несовпадении — встречным. При встречном пиении перед вторым слагаемым в формуле (14) ставят плюс, при попутном — минус. Четвертое слагаемое в скобках при пиении верхней половиной пилы отрицательно, а при пиении нижней — положительно. Третье слагаемое в скобках положительно при встречном пиении верхней половиной пилы и попутном пиении нижней половиной пилы. При встречном пиении нижней половиной пилы и попутном пиении верхней половиной пилы это слагаемое отрицательно.

Для ленточнопильных станков кинематический угол встречи $\theta = 90^\circ$, поэтому:

$$g_{\text{под.}} = \frac{C \cdot [P_0 + \mu \cdot (Q_{\text{copm.}} + Q_n + P_0)] \cdot l_{\text{copm.}} \cdot v}{\eta \cdot V_{\text{copm.}}} \quad (15)$$

Для лесопильных рам формулу (15) можно записать:

$$g_{\text{под.}} = \frac{C \cdot P_0 \cdot l_{\text{copm.}} \cdot v}{\eta \cdot V_{\text{copm.}}} \quad (16)$$

Подача распиливаемых сортиментов к круглопильным и ленточнопильным станкам обычно осуществляется цепными транспортерами. Удельные затраты энергии в этом случае можно определить по формуле:

$$g_{\text{перем.}} = \frac{[(Q_{\text{copm.}} + 2,08 \cdot q \cdot L_{\text{ц.пр.}}) \cdot \mu_{\text{пр.}} + 1,08 \cdot Z_{\text{сб.}}] \cdot C \cdot L_{\text{ц.пр.}} \cdot v}{\eta \cdot V_{\text{copm.}}} \quad (17)$$

где $L_{\text{ц.пр.}}$ — длина цепного транспортера, m ; q — сила тяжести одного метра цепного транспортера, $\kappa H/m$; $\mu_{\text{пр.}}$ — коэффициент трения траверс по направляющим; $Z_{\text{сб.}}$ — усилие в сбегавшей ветви, κH .

Подача сортиментов для распиловки к лесопильным рамам и вынос пилопродукции осуществляется впереди- и позадирамными тележками. Удельные затраты энергии в этом случае можно определить по формуле:

$$g_{перем.} = \frac{2 \cdot C \cdot l_{мел.} \cdot \mu_{мел.} \cdot l_{мел.} \cdot (Q_{сорт.} + G_{мел.}) \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}}, \quad (18)$$

где $l_{мел.}$ — длина впереди- или позадирамной тележки, м; $\mu_{мел.}$ — коэффициент сопротивления перемещению впереди- или позадирамной тележки; $G_{мел.}$ — сила тяжести впереди- или позадирамной тележки, кН; $v_{мел.}$ — коэффициент увеличения затрат энергии при холостой работе тележек лесопильной рамы; $\eta_{мел.}$ — КПД передач привода тележек лесопильной рамы.

Таким образом, в общем виде удельные затраты энергии при распиловке сортиментов вразвал на лесопильной раме вычисляются по формуле:

$$g_{л/р} = \frac{C \cdot K \cdot b \cdot H \cdot l_{сорт.} \cdot v}{\eta_{ЧВ} V_{сорт.}} + \frac{C \cdot P_0 \cdot l_{сорт.} \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}} + \frac{2 \cdot C \cdot l_{мел.} \cdot \mu_{мел.} \cdot l_{мел.} \cdot (Q_{сорт.} + G_{мел.}) \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}}. \quad (19)$$

Для круглопильных станков:

$$g_{круг.} = \frac{C \cdot K \cdot b \cdot H \cdot l_{сорт.} \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}} + \frac{C \cdot l_{сорт.} \cdot v \cdot l_{сорт.} \cdot v \cdot [P_0 \cdot \sin\theta - P_p \cdot \cos\theta + \mu \cdot (Q_k + Q_n \pm P_p \cdot \sin\theta - P_0 \cdot \cos\theta)]}{\eta \cdot V_{сорт.}} + \frac{C \cdot L_{ц.мп.} \cdot [(Q_{сорт.} + 2,08 \cdot q \cdot L_{ц.мп.}) \cdot \mu_{мп.} + 1,08 \cdot Z_{сб.}] \cdot v}{\eta_{ЧВ} V_{сорт.}}$$

Для ленточнопильных станков:

$$g_{лент.} = \frac{C \cdot K \cdot b \cdot H \cdot l_{сорт.} \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}} + \frac{C \cdot [P_0 + \mu \cdot (Q_{сорт.} + Q_n + P_0)] \cdot l_{сорт.} \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}} + \frac{C \cdot L_{ц.мп.} \cdot [(Q_{сорт.} + 2,08 \cdot q \cdot L_{ц.мп.}) \cdot \mu_{мп.} + 1,08 \cdot Z_{сб.}] \cdot v}{\eta \cdot V_{сорт.}}$$

Результаты расчетов удельных энергозатрат при работе кранов сведем в табл. 1, при работе сучкорезных и раскряжевочных установок — в табл. 2, при работе продольного сортировочного транспортера — в табл. 3, при работе роторных окорочных станков — в табл. 4, при работе лесопильных рам, круглопильных и ленточнопильных станков — в табл. 5.

Таблица 1

Удельные энергозатраты, кВт·час/м³, при работе кранов

| Наименование работы | Средний объем разгружаемой пачки деревьев (хлыстов), м ³ | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 |
| Разгрузка деревьев (хлыстов) краном ЛТ-62 | 2,746 | 1,844 | 1,392 | 1,122 | 0,940 |
| Наименование работы | Средний объем погружаемой пачки сортиментов, м ³ | | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Погрузка сортиментов краном ККС-10 | 0,744 | 0,387 | 0,269 | 0,210 | 0,174 |

Таблица 2

Удельные энергозатраты, кВт·час/м³, при работе сучкорезных и раскряжевочных установок

| Наименование оборудования | Средний объем дерева (хлыста), м ³ | | | | |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| Сучкорезная установка ПСЛ-2А | 1,594 | 0,808 | 0,547 | 0,416 | 0,338 |
| Раскряжевочная установка ЛО-15С | 0,996 | 0,510 | 0,359 | 0,279 | 0,232 |

Таблица 3

Удельные энергозатраты, кВт·час/м³, при работе сортировочного транспортера

| Длина сортируемого сортимента, м | Средний объем сортимента, м ³ | | | | |
|----------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|
| | 0,04 | 0,07 | 0,1 | 0,13 | 0,17 |
| 4 м | 2,637 | 1,511 | 1,061 | 0,817 | 0,624 |
| 6 м | 2,687 | 1,536 | 1,079 | 0,830 | 0,635 |

Таблица 4

Удельные энергозатраты, кВт·час/м³, при работе роторных окорочных станков

| Средняя длина окариваемого бревна | Средний объем распиливаемого сортимента, м ³ | | | | |
|-----------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| $l_{бр.} = 3 \text{ м}$ | 0,202 | 0,134 | 0,101 | 0,081 | 0,067 |
| $l_{бр.} = 4,5 \text{ м}$ | 0,299 | 0,218 | 0,148 | 0,119 | 0,101 |
| $l_{бр.} = 6 \text{ м}$ | 0,366 | 0,243 | 0,182 | 0,146 | 0,122 |

Таблица 5

Удельные энергозатраты, кВт·час/м³, при работе лесопильного оборудования

| Наименование оборудования для продольной распиловки | Средний объем распиливаемого сортимента, м ³ | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| Лесопильная рама Р 63-4Б | 4,388 | 4,196 | 4,143 | 4,212 | 4,399 |
| Круглопильный станок «Барс-ДГ» | 2,425 | 2,343 | 2,332 | 2,377 | 2,427 |
| Ленточнопильный станок «Авангард ЛП-60» | 1,474 | 1,379 | 1,346 | 1,55 | 1,386 |

По результатам расчетов строим графики:

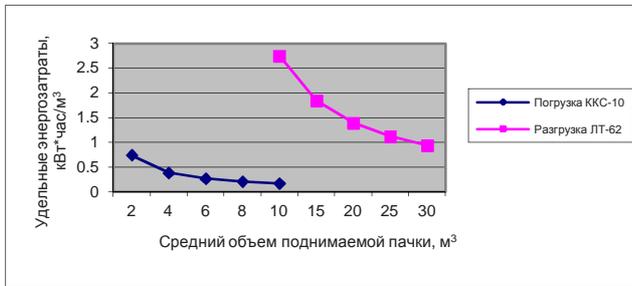


Рис. 1. Графики удельных энергозатрат при работе кранов

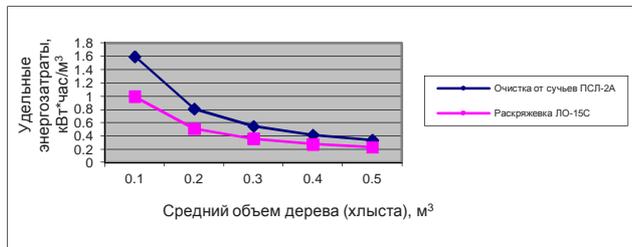


Рис. 2. Графики удельных энергозатрат при работе сучкорезов и раскряжевочных установок

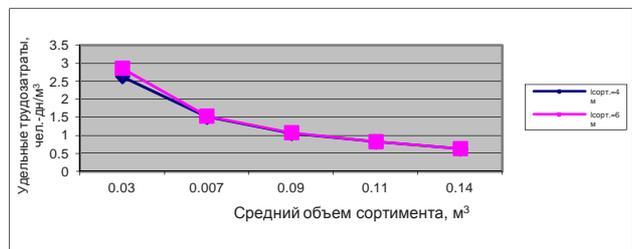


Рис. 3. Графики удельных энергозатрат при работе продольного сортировочного транспортера

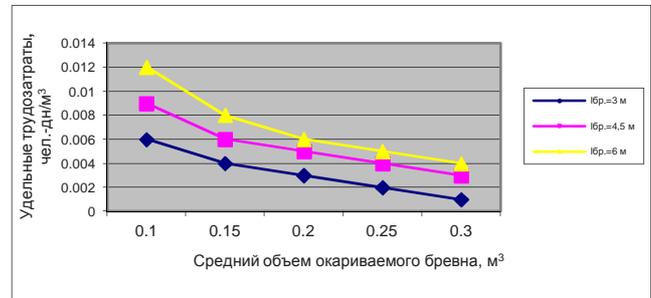


Рис. 4. Графики удельных энергозатрат при работе роторных окорочных станков

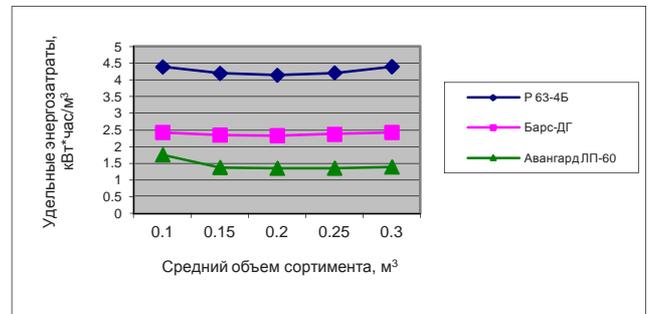


Рис. 5. Графики удельных энергозатрат при работе лесопильных рам, круглопильных и ленточнопильных станков

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, в общем виде определяются по выражению:

$$T = \frac{m \cdot t_{ц.}}{M_{ц.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (22)$$

где m — число рабочих, обслуживающих машину или механизм; $M_{ц.}$ — объем выполненной работы за один цикл, м³; $t_{ц.}$ — время цикла, с; $t_{см.}$ — продолжительность рабочей смены, с; $t_{р.}$ — время на регламентированные простои, подготовительные и заключительные работы, время отдыха рабочих, с [17].

Удельная трудоемкость, чел.-дн./м³, при работе консольно-козлового крана типа ККС-10 или козлового крана типа ЛТ-62 определяется по формуле:

$$T_{кр.} = \frac{m \cdot t_{ц.кр.}}{V_{нач.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (23)$$

где $t_{ц.кр.}$ — время цикла при захвате, перемещении и разгрузке краном пачки лесоматериалов, с; $V_{нач.}$ — средний объем перемещаемой за один прием пачки лесоматериалов, $м^3$.

$$t_{ц.кр.} = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{v_{сп.}} + \frac{l_1}{v_{мел.}} + \frac{l_2}{v_{кр.}} \right) + t_1 + t_2, \quad (24)$$

где h — средняя высота подъема груза, м; l_1 и l_2 — соответственно длина пути перемещения грузовой тележки и крана в одну сторону, м; $v_{сп.}$, $v_{мел.}$ и $v_{кр.}$ — соответственно скорости подъема груза, перемещения грузовой тележки и перемещения крана, м/с; t_1 — время на захват груза, с; t_2 — время на отцепку груза, с.

Удельная трудоемкость, чел.-дн./ $м^3$, процесса очистки деревьев от сучьев стационарными сучкорезными установками типа ПСЛ-2А определяется по формуле:

$$T_{оч.} = \frac{m \cdot t_{ц.оч.}}{V_{хл.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot \left(\frac{L_{с.} + L_{з.} - L_{с.}}{v_{нр.}} + \frac{L_{з.}}{v_{мр.}} + t_3 \right)}{V_{хл.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (25)$$

где $t_{ц.оч.}$ — время цикла при очистке от сучьев одного дерева, с; $L_{з.}$ — расстояние между зажимами на протаскивающем транспортере, м; $L_{с.}$ — длина зоны хлыста, имеющей сучья, м; $v_{нр.}$ — скорость протаскивания при срезании сучьев, м/с; $v_{мр.}$ — скорость цепей протаскивающего транспортера при отсутствии резания, м/с; t_3 — время на закрытие и открытие режущего и протаскивающего механизмов и на закладку в них ствола дерева, с.

Удельная трудоемкость, чел.-дн./ $м^3$, процесса раскряжевки хлыстов установкой с продольным перемещением хлыста типа ЛО-15С определяется по формуле:

$$T_{раск.} = \frac{m \cdot t_{ц.раск.}}{V_{хл.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (26)$$

где $t_{ц.раск.}$ — время цикла при раскряжевке хлыста на сортименты, с.

Подробнее формулу (26) можно представить как:

$$T_{раск.} = \frac{m \cdot \left[\left(\frac{a}{u} + \frac{\pi \cdot d_{сп.}^2}{4 \cdot \Pi_{ч.л.}} + \frac{d_{сп.} + a}{u_x} \right) \cdot n + \frac{l_x}{v_{мр.}} + t_{ав.} \right]}{V_{хл.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (27)$$

где u — скорость подачи пилы, м/с; a — запас между поверхностью хлыста и пилой, находящейся в исходном положении, м; u_x — скорость возвращения пилы в исходное положение, м/с; $\Pi_{ч.л.}$ — производительность чистого пиления, $м^2/с$; $t_{ав.}$ — время на срабатывание воспринимающих, передающих и исполнительных

элементов системы автоматического управления установкой.

Удельная трудоемкость процесса сортировки, чел.-дн./ $м^3$, определяется по формуле:

$$T_{с.} = \frac{m \cdot t_{с.}}{V_{сорт.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot \frac{l_{сорт.}}{v_{с.мп.}}}{V_{сорт.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (28)$$

где $t_{с.}$ — время сортировки сортиментов, с; $v_{с.мп.}$ — скорость цепи сортировочного транспортера, м/с.

Удельные трудозатраты при окорке, чел.-дн./ $м^3$, определяются по выражению:

$$T_{ок.} = \frac{m \cdot t_{ц.}}{V_{бр.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot \frac{l_{бр.}}{u_{ок.}}}{V_{бр.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (29)$$

где $u_{ок.}$ — скорость подачи при окорке, м/с [18].

Удельные трудозатраты при работе лесопильных рам, ленточнопильных и круглопильных станков, чел.-дн./ $м^3$, определяются по формуле:

$$T_{прод.расп.} = \frac{m \cdot t_{ц.}}{V_{сорт.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}. \quad (30)$$

Время цикла при работе лесопильной рамы, с, определяется по формуле:

$$t_{ц.л/р} = \frac{l_{сорт.} \cdot 1000 \cdot 60}{\Delta \cdot n \cdot K_x}, \quad (31)$$

где K_x — коэффициент хода пильной рамки, мм.

$$K_x = \frac{H}{600}, \quad (32)$$

где H — ход пильной рамки, мм [19].

Время цикла на распиловку одного сортимента при работе однопильных круглопильных и ленточнопильных станков с поступательно-возвратным движением определяется по формуле:

$$t_{ц.} = \frac{l_{сорт.} \cdot n \cdot 60}{u} + n \cdot t_{возврат.}, \quad (33)$$

где u — скорость подачи, м/мин; $t_{возврат.}$ — время на возвращение лесоматериала к пиле после очередного пропила, с.

Результаты расчетов удельных трудозатрат при работе кранов сведен в табл. 6, при работе сучкорезных и раскряжевочных установок — в табл. 7, при работе продольного сортировочного транспортера — в табл. 8, при работе роторных окорочных станков — в табл. 9, при работе лесопильных рам, круглопильных и ленточнопильных станков — в табл. 10.

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, при работе кранов

| Наименование работы | Средний объем разгружаемой пачки деревьев (хлыстов), м ³ | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 35 |
| Разгрузка деревьев (хлыстов) краном ЛТ-62 | 0,008 | 0,005 | 0,004 | 0,003 | 0,002 |
| Наименование работы | Средний объем пачки сортиментов, м ³ | | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Погрузка сортиментов краном ККС-10 | 0,027 | 0,022 | 0,018 | 0,016 | 0,014 |

Таблица 7

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, при работе сучкорезных и раскряжевочных установок

| Наименование оборудования | Средний объем дерева (хлыста), м ³ | | | | |
|---------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| Сучкорезная установка ПСЛ-2А | 0,028 | 0,019 | 0,014 | 0,011 | 0,009 |
| Раскряжевочная установка ЛО-15С | 0,014 | 0,009 | 0,007 | 0,006 | 0,005 |

Таблица 8

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, при работе сортировочного транспортера

| Длина сортируемого сортимента, м | Средний объем сортимента, м ³ | | | | |
|----------------------------------|--|--------|--------|--------|--------|
| | 0,03 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,14 |
| 4 м | 0,0043 | 0,0018 | 0,0014 | 0,0012 | 0,0009 |
| 6 м | 0,0064 | 0,0028 | 0,0021 | 0,0018 | 0,0014 |

Таблица 9

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, при работе роторных окорочных станков

| Средняя длина окориваемого бревна | Средний объем распиливаемого сортимента, м ³ | | | | |
|-----------------------------------|---|--------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| $l_{бр.} = 3$ м | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,002 | 0,001 |
| $l_{бр.} = 4,5$ м | 0,009 | 0,0006 | 0,005 | 0,004 | 0,003 |
| $l_{бр.} = 6$ м | 0,012 | 0,008 | 0,006 | 0,005 | 0,004 |

Таблица 10

Удельные трудозатраты, чел.-дн./м³, при работе лесопильного оборудования

| Наименование оборудования для продольной распиловки | Средний объем распиливаемого сортимента, м ³ | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 |
| Лесопильная рама Р 63-4Б | 0,080 | 0,054 | 0,041 | 0,032 | 0,026 |
| Круглопильный станок «Барс-ДГ» | 0,042 | 0,036 | 0,032 | 0,030 | 0,028 |
| Ленточнопильный станок «Авангард ЛП-60» | 0,080 | 0,067 | 0,060 | 0,056 | 0,054 |

По результатам расчетов строим графики:

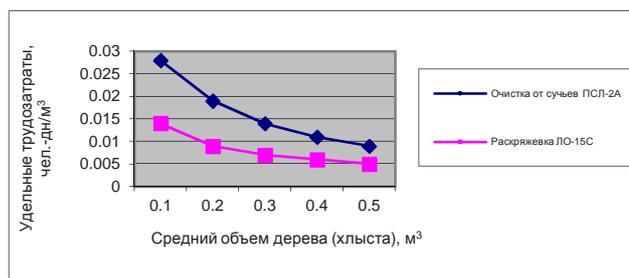
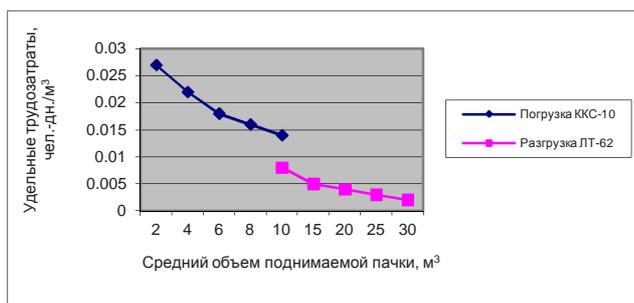


Рис. 6. Графики удельных трудозатрат при работе кранов

Рис. 7. Графики удельных трудозатрат при работе сучкорезных и раскряжевочных установок

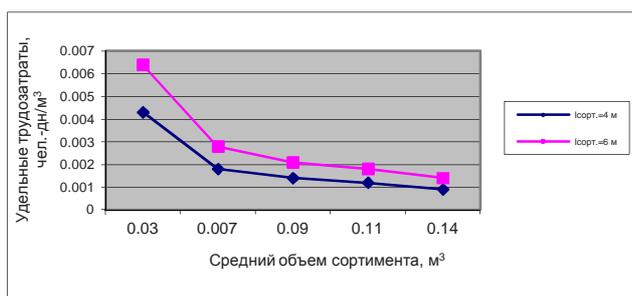


Рис. 8. Графики удельных трудозатрат при работе продольного сортировочного транспортера

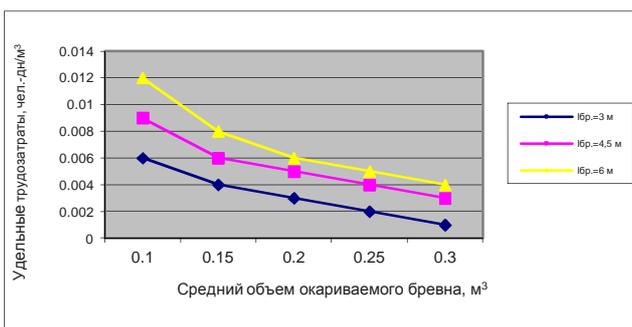


Рис. 9. Графики удельных трудозатрат при работе роторных окорочных станков

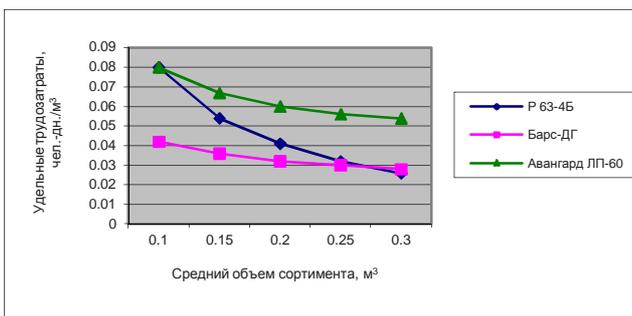


Рис. 10. Графики удельных трудозатрат при работе лесопильных рам, круглопильных и ленточнопильных станков

Заключение

По результатам выполненных исследований получены графические зависимости для определения удельных энергозатрат и удельных трудозатрат при работе кранов, сучкорезных и раскряжевочных установок, сортировочных транспортеров, лесопильного и окорочного нижнескладского оборудования. Работа оборудования рассмотрена в зависимости от различных показателей. Проведен анализ расчетов. Таким образом, при оценке эффективности использования лесозаготовительных машин и установок, кроме показателя производительности, необходимо уметь рассчитывать и анализировать удельные энергозатраты и удельные трудозатраты. Это позволит дать объективные рекомендации лесозаготовительным предприятиям по вопросам рационального использования оборудования на нижних лесных складах [20].

Литература

1. Коломинава М.В. Повышение эффективности производства круглых лесоматериалов путем обоснования технологии с минимальной энергоемкостью (в условиях Республики Коми): дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001. 208 с.
2. Winogorow G.K. Holz einschlags arbeiten. Berlin: Veb Deutscher landwirtschaftsverlag, 1972. 175 p.
3. Csanády E., Magoss E. Mechanics of Wood Machining. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 199 p.
4. Rudkin N. Machine Woodworking. London: Routledge, 1998. 174 p.
5. Shmulsky R., Jones P.D. Forest Products and Wood Science: An Introduction. A John Wiley & Sons, Inc., 2011. 496 p.
6. Williams G. CNC Robotics: Build Your Own Workshop Bot. McGraw-Hill, 2003. 311 p.
8. Menke D. L. The Ultimate Band Saw Box Book. New York: Sterling, 2007. 204 p.
9. Paul A. Taunton's Complete Illustrated Guide to Table-saws. Taunton Press, 2009. 226 p.
10. Лебедев Н.И. Технология и оборудование лесопромышленных складов. СПб, 2009. 393 с.
11. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, О.А. Куницкая. Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамб. ун-та. 2014. Т. 19, Вып. 5. С. 1499-1502.
12. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Власов Ю.Н., Иванов В.А., Жданович В.И. О необходимости дополнительных исследований энергоемкости процесса поперечного пиления древесины // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 143-147.
13. Григорьев И.В., Григорьева, О.Г., Никифорова А.Г. Энергонасыщенность лесных машин //Дерево. RU. 2014. № 2. С. 90-93.
14. Ефимова Е.В., Бирман А.Р., Швецов В.В. Некоторые аспекты энергоемкости процесса переработки древесной коры / «Системы. Методы. Технологии», 2012. № 4 (16), С. 153-156.
15. Макаров И.С. Расчет удельных энергозатрат при работе основного нижнескладского оборудования // Материалы научно-технической конференции (16-19 апр. 2013 г.). Ухта, 2013. Ч. 2. С. 201-206.
16. Коломинава М.В. Исследование показателей эффективности сортировочных транспортеров // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. научно-техн. конф. (2-3 дек. 2014 г.). Воронеж, 2015. С. 160-162.
17. Коломинава М.В. К вопросу определения удельных трудозатрат при работе основного нижнескладского оборудования // Материалы научно-технической конференции (22-25 апр. 2014 г.). Ухта, 2014. Ч. 2. С. 109-112.
18. Коломинава М.В. Показатели эффективности процесса окорки лесоматериалов // Материалы 11-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса», 3-4 дек. 2013 г. Вологда, 2014. С. 177-179.
19. Коломинава М.В. Показатели эффективности оборудования для продольной распиловки древесины // Материалы

научно-технической конференции (17-20 апр. 2012 г.). Ухта, 2012. Ч. 2. С. 194-198.

20. Коломинава М.В. Технологические процессы лесозаготовительного производства. Ухта, 2002. 88 с.

References

1. Kolominova M.V. Improving the efficiency of production of round timber by way of feasibility of technologies with the minimum power inputs (in the Komi Republic): dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2001. 208 p.

2. Winogorow G.K. Holz einschlags arbeiten. Berlin: Veb Deutscher landwirtschaftsverlag, 1972. 175 p.

3. Csanády E., Magoss E. Mechanics of Wood Machining. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 199 p.

4. Rudkin N. Machine Woodworking. London: Routledge, 1998. 174 p.

5. Shmulsky R., Jones P.D. Forest Products and Wood Science: An Introduction. A John Wiley & Sons, Inc., 2011. 496 p.

6. Williams G. CNC Robotics: Build Your Own Workshop Bot. McGraw-Hill, 2003. 311 p.

7. Settich R.J. Taunton's complete illustrated Guide to Choosing and Installing Hardware. The Taunton Press, 2003. 227 p.

8. Menke D.L. The Ultimate Band Saw Box Book. New York: Sterling, 2007. 204 p.

9. Paul A. Taunton's Complete Illustrated Guide to Table-saws. Taunton Press, 2009. 226 p.

10. Lebedev N.I. Technology and equipment for timber depots. SPb, 2009. 393 p.

11. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., A.I. Nikiforova, O.I. Grigor'eva, O.A. Kunitskaya. Determination of energy intensity of forest products within methodology for assessing eco-efficiency of forest management // Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences. 2014. T. 19, Vyp. 5. P. 1499-1502.

12. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Vlasov Yu.N., Ivanov V.A., Zhdanovich V.I. The need for further research of energy consumption for timber cross-cutting // Systems. Methods. Technologies. 2013. № 4 (20). P. 143-147.

13. Grigor'ev I.V., Grigor'eva, O.G., Nikiforova A.G. Energy saturation of forest mashin // Derevo. RU. 2014. № 2. P. 90-93.

14. Efimova E.V., Birman A.R., Shvetsov V.V. Some energy intensity aspects of bark processing // Systems. Methods. Technologies. 2012. № 4 (16), P. 153-156.

15. Makarov I.S. Calculation of the specific power inputs of equipment on lower forest depots // Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (16-19 apr. 2013 g.). Ukhata, 2013. Ch. 2. P. 201-206.

16. Kolominova M.V. Research of indicators of efficiency of the sorting conveyors // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. (2-3 dek. 2014 g.). Voronezh, 2015. P. 160-162.

17. Kolominova M.V. To the question of determining the specific expenditures of labour of equipment on lower forest depots // Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (22-25 apr. 2014 g.). Ukhata, 2014. Ch. 2. P. 109-112.

18. Kolominova M.V. The indicators of the efficiency of the process of debarking wood // Materialy 11-oi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa», 3-4 dek. 2013 g. Vologda, 2014. P. 177-179.

19. Kolominova M.V. The Indicators of efficiency of equipment for longitudinal cutting of wood // Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (17-20 apr. 2012 g.). Ukhata, 2012. Ch. 2. P. 194-198.

20. Kolominova M.V. Technological processes of timber production sciences. Ukhata, 2002. 88 p.