

Сравнение эффективности технологических процессов лесозаготовок по критериям удельной энергоемкости и удельной трудоемкости

М.В. Коломинова

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

Статья поступила 9.01.2016, принята 5.02.2016

Повышение эффективности технологии лесозаготовок является актуальным вопросом для исследований. При оценке экономической эффективности того или иного технологического процесса лесозаготовок важным показателем является часовая производительность применяемых машин. Лесосечные работы — довольно энергоемкий процесс, соответственно показатель энергоемкости позволяет дать объективную оценку технологическим операциям, существующим и создаваемым машинам, что необходимо в условиях постоянного роста цен на топливо и внедрения энергоэффективных технологий и машин. Также лесосечные работы являются довольно трудоемким процессом. При развитии современных технологий затраты живого труда должны уменьшаться, так как всякое производство заинтересовано в снижении затрат именно живого труда. Если живой труд экономится в большей степени, процесс развития называют трудосберегающим. Поэтому знание теории вычисления удельной трудоемкости (удельных трудозатрат) является очень важным. В статье рассматривается методика расчета суммарных удельной энергоемкости и удельной трудоемкости для пяти технологических процессов заготовки сортиментов в условиях лесосеки при использовании самых разнообразных машин и механизмов. Разработанные математические модели и полученные результаты имеют практическое значение для лесозаготовительных предприятий. Внедрение разработанных методов по обоснованию рациональных с точки зрения минимальной энергоемкости и наименьшей трудоемкости технологических процессов производства и обработки круглых лесоматериалов позволит снизить затраты энергии и трудозатраты, а также себестоимость продукции. Перспективой дальнейших исследований является разработка методики оценки других возможных вариантов технологических процессов лесосечных работ по предлагаемым критериям и сравнение с технологиями, рассмотренными в данном исследовании.

Ключевые слова: математическая модель; удельные энергозатраты; удельные трудозатраты; лесосечные работы.

Comparison of efficiency in technological processes of timber harvesting according to the criteria of specific energy consumption and specific labour consumption

M.V. Kolominova

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

Received 9.01.2016, accepted 5.02.2016

Improving the efficiency in technological processes of timber harvesting is an important issue to be researched. When assessing the economic efficiency of one or another technological process of timber harvesting, hourly efficiency of machines is an important indicator. Logging operations is rather an energy-consuming process. So, the indicator of energy consumption allows giving an objective assessment to technological processes, machines under design and existing ones because fuel prices are rising and the use of energy efficient technologies and machines is a very important issue. Logging operations is a quite time-consuming process. With the development of the technological process the labour costs are expected to be decreased because any manufacturer is interested in reducing the labour costs in the production process. If living labour is economized to a greater extent, the development process is called labor-saving. Therefore, being aware of the theory of calculation of specific labour consumption (unit labor costs) is very important. The article deals with the method of calculation of the total specific energy and labor consumption for five technological processes of short-length operation in terms of the cutting area when using a variety of machines and mechanisms. The mathematical model developed and the results obtained are of practical value for logging companies. Implementation of the methods developed for substantiation of rational (from the viewpoint of minimum energy consumption and the least labor consumption) technological processes of production and processing of round timber will reduce energy and labour costs as well as process and production costs. The prospect of further studies is the development of methods for the assessment of other possible variants of technological processes in logging operations on the criteria proposed and comparison with the technologies considered in this research.

Key words: mathematical model; specific energy consumption; specific labour consumption; logging operations.

Введение

Критериями оптимальности технологических процессов лесозаготовок могут быть различные показатели. Часовая производительность машин и оборудования, несомненно, является важнейшим фактором при организации труда и оценке эффективности лесосечных работ. Но лесосечные работы — довольно энергоемкий и трудоемкий процесс, поэтому помимо расчета часовой производительности используемых машин необходимо развитие технологий заготовки древесины, позволяющих получать продукцию при минимальных затратах энергии и минимальных трудовых затратах. Использование энергоэффективных технологий лесозаготовок, которые к тому же будут иметь наименьшие трудовые затраты, позволит повысить общую эффективность лесного производства [1].

Целью настоящей работы являются построение и расчет математических моделей суммарных удельных энерго- и трудовых затрат различных технологических процессов заготовки сортиментов и их исследование в зависимости от различных факторов.

Многие зарубежные ученые посвятили свои труды вопросам повышения эффективности технологических процессов лесосечных работ [2–8]. Материалом для исследований служат также работы признанных отечественных ученых в области лесозаготовительного производства [9–14].

Результаты исследования. Удельная энергоемкость (удельные энергозатраты) — это показатель, определяющий количество энергии, отнесенное к единице заготовленной продукции (м^3).

Рассмотрим расчет удельной энергоемкости для следующих технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах.

I вариант:

- валка деревьев бензиномоторной пилой типа Husqvarna-262XP;
- трелевка деревьев трелевочным трактором с канатно-чокерным оборудованием типа ТТ-4;
- очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов бензиномоторной пилой типа Husqvarna-262XP;
- погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом типа «Урал-4320» + ЛВ-185.

II вариант:

- валка, очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов бензиномоторной пилой типа Husqvarna-262XP;
- трелевка сортиментов форвардером типа John Deere 1270E;
- погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом типа «Урал-4320» + ЛВ-185.

III вариант:

- валка деревьев бензиномоторной пилой типа Husqvarna-262XP;
- трелевка деревьев трелевочным трактором с канатно-чокерным оборудованием типа ТТ-4;
- очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевой машиной типа ЛО-120;

- погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом типа «Урал-4320» + ЛВ-185.

IV вариант:

- валка деревьев валочно-пакетирующей машиной типа ЛП-19А;
- трелевка деревьев трелевочным трактором с пачковым захватом типа ЛТ-154;
- очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевой машиной типа ЛО-120;
- погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом типа «Урал-4320» + ЛВ-185.

V вариант:

- валка, очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов с помощью валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (харвестера) типа John Deere 1270E;
- трелевка сортиментов форвардером типа John Deere 1110E;
- погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом типа «Урал-4320» + ЛВ-185 [15].

Удельные энергозатраты, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, процесса валки деревьев с помощью бензиномоторной пилы определяются по формуле:

$$g_{\text{валки}} = \frac{C \cdot \pi \cdot d_{\text{ср.}}^2 \cdot b \cdot K \cdot c_1}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_p \cdot \eta} \right), \quad (1)$$

где $C = 1/3600$ — переводной коэффициент; $\pi = 3,14$; $d_{\text{ср.}}$ — средний диаметр спиливаемого дерева (хлыста), м ; b — ширина пропила, м ; K — удельная работа резания при спиливании ствола, $\text{кДж}/\text{м}^3$; V_x — средний объем спиливаемого дерева (хлыста), м^3 ; c_1 — коэффициент, учитывающий изменение площади пропила по отношению к расчетной; u — скорость подачи режущего механизма, $\text{м}/\text{с}$; v_p — скорость резания, $\text{м}/\text{с}$; c_2 — коэффициент пропорциональности между усилиями резания и подачи; v — коэффициент увеличения затрат энергии от непроизводительных движений; η — КПД устройств, передающих энергию к рабочим органам машины [16].

Удельные энергозатраты, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, процесса очистки деревьев от сучьев и раскряжевки хлыстов бензиномоторной пилой определяются по формуле:

$$g_{\text{оч.-раск.б/н}} = \frac{C \cdot K_p \cdot S \cdot v}{V_x \cdot \eta} + \frac{C \cdot \pi \cdot d_{\text{ср.}}^2 \cdot b \cdot K_{\text{раск.}} \cdot c_1 \cdot (n+1)}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_{\text{рез.}} \cdot \eta} \right), \quad (2)$$

где K_p — удельная работа резания при срезании сучьев, $\text{кДж}/\text{м}^2$; S — суммарная площадь среза сучьев, м^2 ; $K_{\text{раск.}}$ — удельная работа резания при раскряжке хлыстов, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $v_{\text{рез.}}$ — скорость резания при раскряжке хлыста, $\text{м}/\text{с}$; $n+1$ — число пропилов при раскряжке и пропилов на откомлевку.

Удельные энергозатраты процесса трелевки деревьев, кВт·ч/м³, трелевочным трактором с канатно-

$$g_{mp.1} = \frac{C \cdot \gamma \cdot l_{cp} \cdot k_0 \cdot v}{\eta} \cdot (\psi_n + 2 \cdot a \cdot \psi_m) + C \cdot \gamma \cdot \left[\frac{h \cdot v \cdot k'}{\eta} + \frac{(1 - k') \cdot r_n \cdot \psi_n \cdot v}{\eta} \right], \quad (3)$$

где γ — объемная сила тяжести древесины, кН/м³; l_{cp} — среднее расстояние трелевки, м; k_0 — коэффициент, учитывающий увеличение пути, проходимогo машиной с пачкой деревьев, по отношению к расчетному; ψ_n — коэффициент сопротивления волочащейся пачки; a — отношение силы тяжести трактора к силе тяжести трелеваемой пачки; ψ_m — коэффициент сопротивления движению машины; h — высота подъема комлевой части пачки, м; k' — коэффициент распределения силы тяжести пачки между трактором и поверхностью движения; r_n — расстояние по горизонтали от оси машины до центра сечения пачки в месте захвата, м.

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса погрузки сортиментов самопогружающимся автопоездом определяются по формуле:

$$g_{nozр.} = \frac{C \cdot \gamma \cdot \omega_c \cdot \mu_c \cdot r_n \cdot \frac{M_{n.c.}}{V_c} \cdot v}{\eta} + \frac{C \cdot G_m \cdot \omega_c \cdot \mu_c \cdot r_n \cdot v}{\eta}, \quad (4)$$

где ω_c — средний угол поворота стрелы, рад; μ_c — коэффициент трения в подшипнике поворота стрелы манипулятора; G_m — сила тяжести манипулятора, кН; $M_{n.c.}$ — грузоподъемность подвижного состава, м³; V_c — объем сортиментов, захватываемых манипулятором автопоезда за один прием, м³.

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса валки — пакетирования ВПМ типа ЛП-19А определяется уравнением:

$$g_{в.-п.} = \frac{C \cdot \pi \cdot d_{cp}^2 \cdot b \cdot K}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_p \cdot \eta} \right) + C \cdot \gamma \cdot \left(\frac{v \cdot \Delta \cdot k_p}{2 \cdot \eta \cdot a_1} + \frac{l_m \cdot \alpha \cdot \mu_1 \cdot v}{\eta} \right) + \frac{10^4 \cdot C \cdot G_m \cdot \psi_m \cdot k_p \cdot (1 + m_1) \cdot v}{q \cdot \Delta \cdot \eta} + \frac{C \cdot A_d \cdot v}{V_x \cdot \eta}, \quad (5)$$

где k_p — коэффициент, учитывающий увеличение пути движения машины по отношению к расчетному; a_1 — коэффициент, учитывающий расположение разрабатываемой ленты леса по отношению к продольной оси машины; l_m — максимальный вылет манипулятора, м; α — средний угол поворота манипулятора, рад; μ_1 — коэффициент трения опоры платформы манипулятора о поворотный круг; q — запас леса на 1 га, м³/га; Δ — ширина разрабатываемой ленты леса, м; m_1 — отношение пути, проходимогo машиной на холостом ходу, к таковому при выполнении технологической работы; A_d

чokerным оборудованием определяются как:

— работа по доставке рабочих устройств к дереву и установке в транспортное положение, кДж.

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса трелевки хлыстов трактором с пачковым захватом типа ЛТ-154 определяются по формуле:

$$g_{mp.2} = \frac{C \cdot \gamma \cdot l_{cp} \cdot k_0 \cdot v}{\eta} \cdot (\psi_n + 2 \cdot a \cdot \psi_m) + C \cdot \gamma \cdot \left[\frac{h \cdot v \cdot k'}{\eta} + \frac{(1 - k') \cdot r_n \cdot \psi_n \cdot \omega_{cm} \cdot v}{\eta} \right], \quad (6)$$

где r_n — расстояние по горизонтали от оси поворота до центра сечения пачки в месте захвата, м; ω_{cm} — средний угол поворота стрелы пачкового захвата, рад.

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса очистки деревьев от сучьев и раскряжевки хлыстов сучкорезно-раскряжевочной машиной типа ЛО-120 определяются по формуле:

$$g_{оч.-р.} = \frac{C}{V_x} \cdot \left\{ K_p \cdot S + \mu_{c.z.} \cdot (Q_{c.z.} + P_{c.z.}) \cdot l_{c.z.} + \frac{\mu_{кар.} \cdot l_x \cdot (Q_{кар.} + 2 \cdot G_{кар.}) \cdot v}{\eta} + \frac{G_{см.} \cdot \Phi_{см.z.} \cdot r_{см.z.} \cdot \mu_{см.z.} \cdot v}{\eta} + \frac{Q_x \cdot h_2 + G_{см.} \cdot \Phi_{см.в.} \cdot r_{см.в.} \cdot \mu_{см.в.} \cdot v}{\eta_{см.}} \right\} + \frac{C \cdot G_m \cdot \psi_m \cdot L \cdot v}{\Pi_{см.срм} \cdot \eta} + \frac{C \cdot \pi \cdot d_{cp}^2 \cdot b \cdot K_{раск.} \cdot n}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_{рез.} \cdot \eta} \right), \quad (7)$$

где $\mu_{c.z.}$, $\mu_{кар.}$, $\mu_{см.z.}$, $\mu_{см.в.}$ — соответственно коэффициенты трения дерева о сучкорезную головку, каретку, стрелу в вертикальном и горизонтальном положении; $Q_{c.z.}$, $Q_{кар.}$ — средние значения силы тяжести дерева, действующие соответственно на сучкорезную головку и каретку, кН; $G_{кар.}$, $G_{см.}$, G_m — соответственно силы тяжести каретки, стрелы и самой машины, кН; $P_{c.z.}$ — среднее усилие прижима ножей сучкорезной головки к стволу дерева, кН; L — общий путь перемещения сучкорезно-раскряжевочной машины в течение смены (от места стоянки до погрузочного пункта и обратно, вдоль штабеля и между штабелями), м/смену; l_x — средняя длина хлыста, м; $l_{c.z.}$ — среднее значение длины хлыста, проходящего через сучкорезную головку, м; $r_{см.z.}$, $r_{см.в.}$ — радиусы поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, м; Q_x — сила тяжести хлыста, кН; h_2 — расстояние по вертикали от середины высоты штабеля деревьев до продольной оси хлыста, удерживаемого в горизонтальном положении, м; $\Pi_{см.срм}$ — сменная производительность сучкорезно-раскряжевочной машины, м³/смену; $\Phi_{см.z.}$, $\Phi_{см.в.}$ — коэффициенты трения в шарнире стрелы при поворотах в горизонтальной и вертикальной плоскостях; n — число пропилов при раскряжевке хлыста [17].

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса валки деревьев, очистки от сучьев и раскряжевки хлыстов харвестером определяются по формуле:

$$g_{BCPM} = \frac{C \cdot \pi \cdot d_{cp}^2 \cdot b \cdot K}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_p \cdot \eta} \right) + \frac{C \cdot M \cdot \omega \cdot v}{V_x \cdot \eta} + \frac{C \cdot v}{V_x} \cdot [K_p \cdot S + \frac{l_x \cdot (Q_x \cdot k + G_{np}) \cdot \mu_n + l_x \cdot (1-k) \cdot Q_x \cdot \mu_x}{\eta}] +, \quad (8)$$

$$+ \frac{C \cdot \pi \cdot d_{cp}^2 \cdot b \cdot K_{раск.} \cdot n}{4 \cdot V_x} \cdot \left(\frac{v}{\eta} + \frac{c_2 \cdot u \cdot v}{v_{рез.} \cdot \eta} \right) + \frac{10^4 \cdot C \cdot G_m \cdot \psi_m \cdot v \cdot (1 + m_1)}{q \cdot \Delta \cdot \eta} + \frac{C \cdot A_d \cdot v}{V_x \cdot \eta}$$

где M — момент силы сталкивания дерева с пня, $кН·м$; ω — угол сопровождения дерева валочным рычагом при сталкивании дерева с пня, $рад$; k — коэффициент, показывающий, какая доля силы тяжести хлыста давит на протаскивающий механизм; G_{np} — сила тяжести элементов протаскивающего механизма, $кН$; μ_n — коэффициент сопротивления движению хлыста от дви-

жущихся элементов протаскивающего механизма по направляющим; μ_x — коэффициент сопротивления движению хлыста по поддерживающей его плоскости и по ножам [18].

Удельные энергозатраты, кВт·ч/м³, процесса трелевки деревьев форвардером определяются как:

$$g_{фор.} = \frac{C \cdot \left[\gamma \cdot (h_1 + r_m \cdot \omega_m) + \frac{A_{с.м.}}{V_c} \right] \cdot v}{\eta} +, \quad (9)$$

$$+ \frac{C \cdot l_{cp} \cdot \gamma \cdot k_0 \cdot \psi_m \cdot (1 + 2 \cdot a)}{\eta}$$

где h_1 — высота подъема при укладке сортиментов на форвардер, $м$; r_m — радиус поворота манипулятора, $м$; ω_m — средний угол поворота манипулятора, $рад$; $A_{с.м.}$ — работа по доставке манипулятора к сортименту и обратно, $кДж$.

Результаты расчетов удельной энергоемкости по первому технологическому процессу сведен в табл. 1, по второму — в табл. 2, по третьему — в табл. 3, по четвертому — в табл. 4, по пятому технологическому процессу — в табл. 5.

Таблица 1

Удельные энергоемкости, кВт·ч/м³, для процесса № 1

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев бензиномоторными пилами	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
Трелевка деревьев трелевочным трактором с канатно-чокерным оборудованием при $l_{cp} = 200$ м	1,345	1,293	1,216	1,088	1,011
Очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов бензиномоторными пилами	0,958	0,493	0,341	0,267	0,224
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,554	0,302	0,221	0,180	0,156
Суммарные	2,862	2,094	1,785	1,543	1,400

Таблица 2

Удельные энергоемкости, кВт·ч/м³, для процесса № 2

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка, очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов бензиномоторными пилами	0,963	0,499	0,348	0,275	0,233
Трелевка сортиментов форвардером при $l_{cp} = 200$ м	0,625	0,624	0,623	0,622	0,621
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,554	0,302	0,221	0,180	0,156
Суммарные	2,142	1,425	1,192	1,077	1,010

Таблица 3

Удельные энергоемкости, кВт·ч/м³, для процесса № 3

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев бензиномоторными пилами	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
Трелевка деревьев трелевочным трактором с канатно-чокерным оборудованием при $l_{cp} = 200$ м	1,345	1,293	1,216	1,088	1,011
Очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевочной машиной	1,083	0,634	0,488	0,414	0,378
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,554	0,302	0,221	0,180	0,156

Суммарные	2,987	2,235	1,932	1,690	1,554
-----------	-------	-------	-------	-------	-------

Таблица 4

Удельные энергоёмкости, кВт·ч/м³, для процесса № 4

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев валочно-пакетирующей машиной	0,259	0,221	0,208	0,202	0,198
Трелевка деревьев трелевочным трактором с пачковым захватом при $l_{cp} = 200$ м	1,228	1,168	1,085	0,942	0,857
Очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевочной машиной	1,083	0,634	0,488	0,414	0,378
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,554	0,302	0,221	0,180	0,156
Суммарные	3,124	2,325	2,002	1,738	1,589

Таблица 5

Удельные энергоёмкости, кВт·ч/м³, для процесса № 5

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка, очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов харвестером	0,960	0,574	0,434	0,362	0,318
Трелевка сортиментов форвардером при $l_{cp} = 200$ м	0,625	0,624	0,623	0,622	0,621
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,554	0,302	0,221	0,180	0,156
Суммарные	2,139	1,500	1,278	1,164	1,095

По результатам расчетов строим графики суммарных удельных энергозатрат по всем пяти технологическим процессам лесозаготовок.

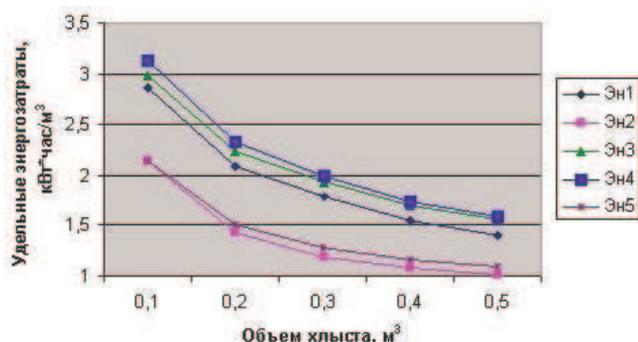


Рис. 1. Графики суммарных удельных энергозатрат технологических процессов лесозаготовок

Удельная трудоемкость (удельные трудозатраты) — это экономический показатель, характеризующий затраты рабочего времени на изготовление единицы продукции (м³).

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

$$T = \frac{m \cdot t_{ц.}}{M_{ц.} \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (10)$$

где m — число рабочих, обслуживающих машину или механизм; $t_{ц.}$ — время цикла, с; $M_{ц.}$ — объем продукции, заготавливаемой за один цикл, м³; $t_{см.}$ — продолжительность рабочей смены, с; $t_{р.}$ — регламентированные простои, подготовительно-заключительное время и время отдыха рабочих, с [19].

Рассмотрим удельные трудозатраты для тех же пяти технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах.

Удельные трудозатраты при использовании бензиномоторных пил на валке деревьев (чел.-дн./м³) в общем виде определяются по формуле:

$$T_{валки} = \frac{m \cdot (t_1 + t_2)}{V_x \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot (t_{cp.} \cdot k_c + t_2)}{V_x \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot d_{cp.}^2 \cdot k_1}{4 \cdot \Pi_{ч.л.} \cdot \Phi_0} \right) \cdot k_c + t_2 \right]}{V_x \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (11)$$

где t_1 — время на выполнение подпила, спиливания и сталкивания дерева с пня; t_2 — время на переходы от дерева к дереву и на подготовку дерева к валке, с; $t_{cp.}$ — время срезания дерева, с; k_c — коэффициент, учитывающий сталкивание дерева с пня; $\Pi_{ч.л.}$ — производительность чистого пиления, м²/с; k_1 — коэффициент увеличения площади пропила за счет подпила; Φ_0 — коэффициент использования производительности чистого пиления.

Удельные трудозатраты при использовании бензиномоторных пил на очистке деревьев от сучьев — раскряжке хлыстов на сортименты (чел.-дн./м³) определяются по формуле:

$$T_{оч.-раск.б/n} = \frac{m \cdot [t_{очист.} + t_p \cdot (n+1) + t_{перех.}]}{V_x \cdot (t_{см.} - t_p)} = \frac{m \cdot \left[t_{очист.} + \frac{\pi \cdot d_{ср.}^2}{4 \cdot \Pi_{ч.л.} \cdot \Phi_0} \cdot (n+1) + t_{перех.} \right]}{V_x \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (12)$$

где $t_{очист.}$ — время на очистку дерева от сучьев бензиномоторной пилой, с; t_p — время на выполнение одного пропила при раскряжевке, с; $t_{перех.}$ — время на переходы от хлыста к хлысту, маркировку сортиментов, с.

Удельные трудозатраты трелевки пачки леса трелевочным трактором с канатно-чokerным оборудованием, с, определяется как:

$$T_{тр.1} = \frac{m \cdot (t_{х.х.} + t_n + t_{з.х.} + t_{разгр.})}{M_n \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (13)$$

где M_n — объем трелеваемой пачки леса, м³; $t_{х.х.}$ — время холостого хода трактора, с; t_n — время формирования пачки леса, с; $t_{з.х.}$ — время движения трактора с пачкой, с; $t_{разгр.}$ — время разгрузки пачки, снятия чоке-ров, выравнивания комлей, окучивания, с.

$$t_{х.х.} + t_{з.х.} = \frac{2 \cdot l_{ср.}}{v_{ср.}}, \quad (14)$$

где $v_{ср.}$ — средняя скорость трактора при движении в обоих направлениях, м/с.

Время формирования пачки сортиментов t_n определяют как:

летом —

$$t_n = 60 \cdot \left(2,0 + \frac{0,08 \cdot l_k}{V_x} + 0,8 \cdot \frac{M_n \cdot \Phi_1}{n_{раб.} \cdot V_x} + \frac{2 \cdot M_n \cdot \Phi_1}{n \cdot V_x} \right), \quad (15)$$

зимой —

$$t_n = 60 \cdot \left(5,0 + 0,45 \cdot \frac{M_n \cdot \Phi_1}{V_x} + 175 \cdot \frac{M_n \cdot \Phi_1}{q} \right). \quad (16)$$

Время разгрузки пачки сортиментов $t_{разгр.}$ определяют как:

$$t_{разгр.} = 60 \cdot \left(0,60 + 0,06 \cdot \frac{M_n \cdot \Phi_1}{V_x} + \frac{0,50 \cdot M_n \cdot \Phi_1}{V_x} \right), \quad (17)$$

где l_k — средняя длина оттягивания собирающего каната, м; $n_{раб.}$ — число рабочих, участвующих в чоке-ровке деревьев; Φ_1 — коэффициент использования рабочего времени.

Удельные трудозатраты при погрузке сортиментов самопогружающимся автопоездом определяются как:

$$T_{погр.} = \frac{m \cdot (t_{подг.} + t_{укл.} \cdot n_1 + t_{креп.})}{V_c \cdot (t_{см.} - t_p)} = \frac{m \cdot \left(t_{подг.} + t_{укл.} \cdot \frac{M_{н.с.} \cdot \Phi_1}{V_c \cdot \Phi_2} + t_{креп.} \right)}{V_c \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (18)$$

где $t_{подг.}$ — время подготовки подвижного состава к погрузке, с; $t_{укл.}$ — время укладки одной пачки, с; n_1 —

число погружаемых пачек; $t_{креп.}$ — время крепления и оправки пакета после погрузки, с; $M_{н.с.}$ — грузоподъемность подвижного состава, м³; V_c — объем сортиментов, захватываемых манипулятором самопогружающегося лесовоза за один прием, м³; Φ_2 — коэффициент использования грузоподъемности лесопогрузочного средства.

Для валочно-пакетирующей машины типа ЛП-19А удельные трудозатраты будут:

$$T_{в.-п.} = \frac{m \cdot \left[\frac{\pi \cdot d_{ср.}^2}{4 \cdot \Pi_{ч.л.} \cdot \Phi_n} + (K_z + 1) \cdot \left(\frac{l_z}{v_z} + \frac{\alpha}{\omega} \right) + \frac{l_{маш.}}{v_{маш.} \cdot n_d} + t_{ун.} \right]}{V_x \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (19)$$

где l_z — средний путь подачи захвата к дереву, м; v_z — скорость подачи захвата к дереву, м/с; ω — угловая скорость поворота манипулятора, рад/с; K_z — коэффициент, учитывающий увеличение времени на нацеливание, зажим дерева и его натяжение вверх; $\Pi_{ч.л.}$ — производительность чистого пиления, м²/с; Φ_n — коэффициент использования производительности чистого пиления; $l_{маш.}$ — путь перемещения машины от одной рабочей позиции к другой, м; $v_{маш.}$ — скорость движения машины на лесосеке, м/с; n_d — число деревьев, пакетируемых с одной позиции; $t_{ун.}$ — время на дополнительную подготовку дерева к валке, например уплотнение снега в зимний период, с.

Для трелевочных тракторов с пачковым захватом типа ЛТ-154 удельные трудозатраты по аналогии с формулами (13–17) будут:

$$T_{тр.2} = \frac{m \cdot \left(\frac{2 \cdot l_{ср.}}{v_{ср.}} + 180 + \frac{20 \cdot K_n \cdot M_n}{V_x} + \frac{14,4 \cdot M_n}{V_x} + 79,8 \right)}{M_n \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (20)$$

где K_n — коэффициент, учитывающий формирование пачки за один или несколько приемов.

При работе сучкорезно-раскряжевочной машины ЛЮ-120 на погрузочном пункте удельные трудозатраты по очистке деревьев от сучьев — раскряжевке хлыстов будут:

$$T_{оч.-р.} = \frac{m \cdot \left(t_z + \frac{l_x - l_{оч.}}{v_{нр.}} + t_{об.х.} + \frac{n \cdot \pi \cdot d_{ср.}^2}{4 \cdot \Pi_{ч.л.раск.} \cdot K_{раск.}} \right)}{V_x \cdot (t_{см.} - t_p)}, \quad (21)$$

где t_z — время на захват дерева сучкорезной головкой, с; $l_{оч.}$ — расстояние от комля до места захвата дерева сучкорезной головкой, м; $v_{нр.}$ — средняя скорость протаскивания с учетом холостого хода, м/с; $t_{об.х.}$ — время

обратного хода каретки с захватом, c ; $\Pi_{ч.н.раск.}$ — производительность чистого пиления при раскряжке хлыстов, $м^2/с$; $K_{раск.}$ — коэффициент использования производительности чистого пиления при раскряжке хлыстов.

При получении сортиментов с помощью валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (харвестера) удельные трудозатраты на валке и очистке деревьев от сучьев и раскряжке хлыстов определяем по формуле:

$$T_{ВСРМ} = \frac{m \cdot (t_{д.} + t_{пр.} + t_{с.} + t_{перех.} \cdot K_{хар.})}{V_x \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{m \cdot \left(t_{д.} + \frac{l_x}{v_{пр.}} + \frac{\pi \cdot d_{ср.}^2 \cdot (n+1)}{4 \cdot \Pi_{чист.пил.} \cdot K_n} + \frac{10^4 \cdot V_x \cdot K_{хар.}}{\Delta \cdot v_{хар.} \cdot q} \right)}{V_x \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (22)$$

где $t_{д.}$ — время доставки манипулятором валочно-сучкорезно-раскряжевой головки (ВСРГ) к дереву и подтаскивания его к месту обработки; $t_{пр.}$ — время протаскивания дерева через сучкорезные ножи, c ; $t_{с.}$ — время на спиливание и раскряжку хлыста на сортименты, c ; $t_{перех.}$ — время перехода между рабочими позициями в расчете на одно дерево, c ; $K_{хар.}$ — коэффициент, учитывающий время на повороты ВСРМ на границах делянки; $v_{пр.}$ — скорость протаскивания при обрезке сучьев, $м/с$; $\Pi_{чист.пил.}$ — производительность чистого пиления цепной пилой ВСРГ, $м^2/с$; K_n — коэффициент использования

производительности чистого пиления; $v_{хар.}$ — скорость движения ВСРМ по лесосеке, $м/с$.

Удельные трудозатраты на сбор, трелевку и штабелевку сортиментов трелевочной машиной сортиментов (ТМС) — форвардером определяются как:

$$T_{фор.} = \frac{m \cdot (t_{об.} + t_{сб.-ум.})}{M_n \cdot (t_{см.} - t_{р.})} = \frac{2 \cdot m \cdot \left(\frac{l_{ср.} \cdot K_{фор.}}{v_{фор.}} + \frac{t_{захв.} \cdot M_n}{V_n} \right)}{M_n \cdot (t_{см.} - t_{р.})}, \quad (23)$$

где $t_{об.}$ — время на передвижения ТМС за один рейс, c ; $t_{сб.-ум.}$ — время на сбор и штабелевку сортиментов за один рейс ТМС, c ; V_n — объем пачки сортиментов, захватываемых грейфером форвардера за один прием, $м^3$; $v_{фор.}$ — средняя скорость движения форвардера, $м/с$; $K_{фор.}$ — коэффициент, учитывающий время маневров форвардера на лесосеке и погрузочном пункте, c ; $t_{захв.}$ — время одного цикла захвата группы сортиментов грейфером форвардера, их переноса и укладки в штабель, c .

Результаты расчетов удельной трудоемкости по первому технологическому процессу сведен в табл. 6, по второму — в табл. 7, по третьему — в табл. 8, по четвертому — в табл. 9, по пятому технологическому процессу — в табл. 10.

Таблица 6

Удельные трудоемкости, чел.-дн./ $м^3$, для процесса № 1

Наименование работы	Объем хлыста, $м^3$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев бензиномоторными пилами	0,035	0,018	0,012	0,009	0,008
Трелевка деревьев трелевочным трактором с канатно-чокерным оборудованием при $l_{ср.} = 200$ м	0,118	0,053	0,044	0,038	0,033
Очистка деревьев от сучьев — раскряжка хлыстов бензиномоторными пилами	0,091	0,047	0,033	0,025	0,021
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,080	0,046	0,035	0,029	0,026
Суммарные	0,324	0,164	0,124	0,101	0,088

Таблица 7

Удельные трудоемкости, чел.-дн./ $м^3$, для процесса № 2

Наименование работы	Объем хлыста, $м^3$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка, очистка деревьев от сучьев — раскряжка хлыстов бензиномоторными пилами	0,126	0,065	0,045	0,034	0,029
Трелевка сортиментов форвардером при $l_{ср.} = 200$ м	0,015	0,009	0,006	0,005	0,004
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,080	0,046	0,035	0,029	0,026
Суммарные	0,221	0,120	0,086	0,068	0,059

Таблица 8

Удельные трудоемкости, чел.-дн./ $м^3$, для процесса № 3

Наименование работы	Объем хлыста, $м^3$				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев бензиномоторными пилами	0,035	0,018	0,012	0,009	0,008
Трелевка деревьев трелевочным трактором канатно-чокерным оборудованием при $l_{ср.} = 200$ м	0,118	0,053	0,044	0,038	0,033

Очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевной машиной	0,02	0,012	0,009	0,008	0,007
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,080	0,046	0,035	0,029	0,026
Суммарные	0,253	0,129	0,100	0,084	0,074

Таблица 9

Удельные трудоемкости, чел.-дн./м³, для процесса № 4

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка деревьев валочно-пакетирующей машиной	0,035	0,018	0,012	0,009	0,008
Трелевка деревьев трелевочным трактором с пачковым захватом при $l_{cp.} = 200$ м	0,021	0,014	0,012	0,011	0,010
Очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов сучкорезно-раскряжевной машиной	0,02	0,012	0,009	0,008	0,007
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,080	0,046	0,035	0,029	0,026
Суммарные	0,156	0,090	0,068	0,057	0,051

Таблица 10

Удельные трудоемкости, чел.-дн./м³, для процесса № 5

Наименование работы	Объем хлыста, м ³				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Валка, очистка деревьев от сучьев — раскряжевка хлыстов харвестером	0,026	0,015	0,0011	0,009	0,008
Трелевка сортиментов форвардером при $l_{cp.} = 200$ м	0,015	0,009	0,006	0,005	0,004
Погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом	0,080	0,046	0,035	0,029	0,026
Суммарные	0,121	0,070	0,052	0,043	0,038

По результатам расчетов строим графики суммарных удельных трудозатрат по всем пяти технологическим процессам лесозаготовок:

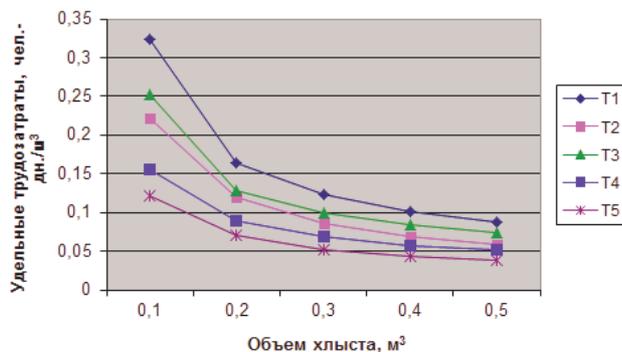


Рис. 2. Графики суммарных удельных трудозатрат технологических процессов лесозаготовок

Заключение

Приведенные в исследовании математические модели позволяют вычислить и сравнить удельную энергоемкость и удельную трудоемкость при заготовке сортиментов различными системами машин [20].

При сравнении удельных энергозатрат технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах получили, что затраты энергии при работе той или иной машины и в сумме по тому или иному технологическому процессу значительно отличаются друг от друга. На графиках видно, что наименьшие суммарные затраты энергии соответствуют следующему технологическому варианту заготовки сортиментов: валка, очистка деревьев от сучьев и раскряжевка хлыстов харвестером;

трелевка сортиментов форвардером; погрузка сортиментов самопогружающимся автопоездом.

При сравнении удельных трудозатрат различных технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах получили, что затраты человеческого труда при выполнении некоторых технологических операций очень велики, например при трелевке древесины. Поэтому удельные трудозатраты необходимо учитывать при начислении заработной платы рабочим на лесозаготовках.

Данные исследования производились в зависимости от среднего объема хлыста, но в качестве варьируемого показателя можно брать и такие показатели, как средний запас на 1 га, среднее расстояние трелевки и др. Поэтому автором в дальнейшем планируется исследование показателей эффективности технологического процесса лесозаготовок в зависимости от комплекса технико-экономических факторов, а также разработка методики оценки других возможных вариантов технологических процессов лесосечных работ по предлагаемым критериям.

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. Jacek B., Tomasz K. Investigations on technological process of after-calamity site preparation to logging with the harvester // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. 2010. № 56. P. 79-87.

3. Drushka K., Kontinen H., Timberjack G. Tracks in the Forest. The Evolution of Logging Machinery. Helsinki, 1997. 253 p.
4. Drewes D. Bestandesvorbereitung in der hochmechanisierten Holzernte. Forsttechnik, 2010. 12 p.
5. Fleischer M. Geschichte der Holzernte in Handarbeit. Proekte Verlag Cornelius GmbH, Halle/S. 1. Auflage, 2009. 212 p.
6. Fleischer M. Geschichte der mobile Holzerntemaschinen / Proekte Verlag Cornelius GmbH, Halle/S. 1. Auflage, 2007. 366 p.
7. Brokmeier H., Strunk M. Struktur und Geschäftsfelder niedersächsischer Forstunternehmen // Forst und Technik. 2008. S. 24-27.
8. Pausch R. Die Holzernteplanung ersetzt den Zufall durch den Irrtum? Forstmaschinenprofi, 2008. S. 58-61.
9. Winogorow G.K. Holz einschlags arbeiten. Berlin: Veb Deutscher landwirtschaftsverlag, 1972. 175 s.
10. Патякин В.И., Григорьев И.В., Редькин А.К. Технологии и машины лесосечных работ. СПб: СПбГЛТУ, 2013. 132 с.
11. Григорьев И.В., Хитров Е.Г., Никифорова А.И., Григорьева О.И., Куницкая О.А. Определение энергоёмкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования // Вестн. Тамбов. ун-та. 2014. Т. 19, Вып. 5. С. 1499-1502.
12. Григорьев И.В., Хахина А.М. Новые технические решения для повышения эффективности лесосечных работ // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2013. № 1. С. 46-50.
13. Григорьев И.В. Григорьева О.И., Никифорова А.И. Энергонасыщенность лесных машин // Дерево.RU. 2014. № 2. С. 90-93.
14. Ефимова Е.В., Бирман А.Р., Швецов В.В. Некоторые аспекты энергоёмкости процесса переработки древесной коры // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4. С. 153-156.
15. Коломинова М.В. Расчет удельных трудозатрат технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах // Материалы научно-технической конференции (13-15 апр. 2010 г.): сб. науч. тр. Ухта, 2010. Ч. 2. С. 166-170.
16. Коломинова М.В. Определение удельных энерго- и трудозатрат технологического процесса заготовки сортиментов при использовании бензопилы и форвардера // Материалы 7-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (7-9 дек. 2010 г.). Вологда, 2011. С. 53-56.
17. Коломинова М.В. Определение удельных энерго- и трудозатрат при работе харвестеров и форвардеров // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2013. № 1 (93). С. 63-67.
18. Коломинова М.В. Пути повышения эффективности технологических процессов лесозаготовок с использованием многооперационных машин [Электронный ресурс] // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. 2015. № 2. С. 11-18. URL <http://resteo.ru/kolominova-2> (дата обращения: 15.12.2015).
19. Коломинова М.В. Расчет удельных энергозатрат технологических процессов заготовки сортиментов при лесосечных работах // Материалы научно-технической конференции (20-23 сент. 2011 г.): сб. науч. тр. Ухта, 2011. С. 215-219.
20. Коломинова М.В. Технологические процессы лесозаготовительного производства. Ухта, 2002. 88 с.
- minimum power inputs (in the Komi Republic): dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2001. 208 p.
2. Jacek B., Tomasz K. Investigations on technological process of after-calamity site preparation to logging with the harvester // Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. 2010. № 56. P. 79-87.
3. Drushka K., Kontinen N., Timberjack G. Tracks in the Forest. The Evolution of Logging Machinery. Helsinki, 1997. 253 p.
4. Drewes D. Bestandesvorbereitung in der hochmechanisierten Holzernte. Forsttechnik, 2010. 12 p.
5. Fleischer M. Geschichte der Holzernte in Handarbeit. Proekte Verlag Cornelius GmbH, Halle/S. 1. Auflage, 2009. 212 p.
6. Fleischer M. Geschichte der mobile Holzerntemaschinen / Proekte Verlag Cornelius GmbH, Halle/S. 1. Auflage, 2007. 366 p.
7. Brokmeier H., Strunk M. Struktur und Geschäftsfelder niedersächsischer Forstunternehmen // Forst und Technik. 2008. P. 24-27.
8. Pausch R. Die Holzernteplanung ersetzt den Zufall durch den Irrtum? Forstmaschinenprofi, 2008. P. 58-61.
9. Winogorow G.K. Holz einschlags arbeiten. Berlin: Veb Deutscher landwirtschaftsverlag, 1972. 175 p.
10. Patyakin V.I., Grigor'ev I.V., Red'kin A.K. Technology and machines of cutting area works. SPb: SPbGLTU, 2013. 132 p.
11. Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. 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. Т. 19, Vyp. 5. P. 1499-1502.
12. Grigor'ev I.V., Khakhina A.M. New technical solutions to improve the efficiency of logging operations // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2013. № 1. P. 46-50.
13. Grigor'ev I.V. Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I. Energy saturation of forest mashines // 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. P. 153-156.
15. Kolominova M.V. Calculation of the specific expenditures of labour of technological processes of preparation of assortments at the harvesting // Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (13-15 apr. 2010 g.): sb. nauch. tr. Ukhta, 2010. Ch. 2. P. 166-170.
16. Kolominova M.V. Determination of specific power inputs and specific expenditures of labour of the technological process of harvesting the timber using chainsaws and forwarder // Materialy 7-oi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa » (7-9 dek. 2010 g.). Vologda, 2011. P. 53-56.
17. Kolominova M.V. Definition of the specific power inputs and expenditures of labour at work harvesters and forwarders // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2013. № 1 (93). P. 63-67.
18. Kolominova M.V. Ways of increase of efficiency of technological processes logging with the use of multifunction machines [Elektronnyi resurs] // Resursy Evropeiskogo Severa. Tekhnologii i ekonomika osvoeniya. 2015. № 2. P. 11-18. URL <http://resteo.ru/kolominova-2> (data obrashcheniya: 15.12.2015).
19. Kolominova M.V. Calculation of the specific power inputs of technological processes of preparation of assortments at the harvesting // Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (20-23 sent. 2011 g.): sb. nauch. tr. Ukhta, 2011. P. 215-219.
20. Kolominova M.V. Technological processes of timber production. Ukhta, 2002. 88 p.

References

1. Kolominova M.V. Improving the efficiency of production of round timber by way of feasibility of technologies with the