

УДК 630

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5923

Статья

Численное исследование показателей заготовки древесины на лесных плантациях

Гаспарян Гарик Давидович

доктор технических наук, генеральный директор, ООО «Сибирский биоуголь» (Российская Федерация), garik.gasparian@yandex.ru

Давтян Армен Борисович

аспирант III курса, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Российская Федерация), armen_davtyan_2019@inbox.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса», Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inbox.ru

Марков Олег Борисович

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), markovob@yandex.ru

Григорьева Ольга Ивановна

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), grigoreva_o@list.ru

Получена: 21 сентября 2021 / Принята: 29 ноября 2021 / Опубликовано: 1 декабря 2021

Аннотация: В рамках новых трендов в мировой экологической политике в последнее время появился термин «биоэкономика», который имеет достаточно большое число различных определений. Одним из его вариантов является понимание биоэкономики как процесса устойчивого производства и преобразования биомассы для пищевых и промышленных продуктов, а также энергии. Под данное определение как нельзя лучше подходит процесс создания и эксплуатации лесных плантаций, в т. ч. и энергетического назначения. Энергетические лесные плантации как нельзя лучше подходят и к задачам

глобального энергетического перехода в экономике Российской Федерации, о котором в конце сентября 2021 г. объявил премьер Михаил Мишустин. С точки зрения эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций основным критерием оценки является энергетическая эффективность, под которой понимают следующий принцип: энергетическая ценность выращенной древесной массы должна быть больше количества энергии, затраченной на её выращивание и заготовку. В статье представлены практические зависимости для оценки энергетической ценности стволовой древесины от времени роста; приведены математические модели для расчёта производительности различных комплексов машин и механизмов заготовки плантационной древесины и их реализации, осуществлён вычислительный эксперимент и приведены его результаты, получены зависимости для практической оценки показателей заготовки энергетической древесины различными комплексами машин и механизмов, совершенствующие планирование и принятие решений в области заготовки плантационной древесины. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Ключевые слова: лесные плантации, энергетическая эффективность, энергетическая древесина, системы машин, заготовка древесины

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5923

Article

Numerical study of indicators of wood harvesting on forest plantations

Garik Gasparyan

*D. Sc. in engineering, general manager, Siberian Biougol LLC (Russian Federation),
garik.gasparian@yandex.ru*

Armen Davtyan

*Ph. D. student, Voronezh State University of Engineering Technologies (Russian Federation),
armen_davtyan_2019@inbox.ru*

Igor Grigorev

*D. Sc. in engineering, professor of the Department «Technology and Equipment of the Forest Complex», Arctic State Agrotechnological University (Russian Federation),
silver73@inbox.ru*

Oleg Markov

*Ph. D. in engineering, associate professor of the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University (Russian Federation),
markovob@yandex.ru*

Olga Grigoreva

*Ph. D. in agriculture, associate professor of the Department of Forestry, St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S. M. Kirov (Russian Federation),
grigoreva_o@list.ru*

Received: 21 September 2021 / Accepted: 29 November 2021 / Published: 1 December 2021

Abstract: World environmental policy has recently coined a new term "Bioeconomics" which has quite a lot of different definitions. In particular, bioeconomics is a process of sustainable production and conversion of biomass to produce food and industrial products, as well as energy. The process of developing and operating forest plantations for energy purposes fits this definition. Energy forest plantations also perfectly suit the tasks of the Global Energy Transition in the economy of the Russian Federation, which was announced by Prime Minister Mikhail Mishustin at the end of September 2021. The main evaluation criterion of developing and operating energy forest plantations is their energy efficiency. It claims that the energy value of the grown wood pulp should be

greater than the amount of energy spent on its cultivation and harvesting. The article presents practical dependencies for assessing the energy value of stem wood on the growth time. The authors present mathematical models for calculating the performance of various complexes of machines and mechanisms for harvesting plantation wood and the results of their implementation. The results of a computational experiment are presented and dependencies for practical evaluation of harvesting energy wood indicators by various complexes of machines and mechanisms that improve planning and decision-making in the field of harvesting plantation wood are obtained. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological University.

Keywords: forest plantations, energy efficiency, energy wood, machine systems, wood harvesting

1. Введение

Выращивание и заготовка древесины на лесных плантациях становится всё более актуальной областью биоэнергетики [1], [14], [15]. Вместе с тем технология заготовки плантационной древесины нуждается в дальнейшем совершенствовании [1], [2], [4], [11]. Отмечено, что для повышения эффективности плантационного лесопользования необходимо развитие научного описания в области принятия решений и компоновки комплексов машин и механизмов, используемых для заготовки энергетической древесины, на модульном принципе [2], [9], [11], [18], с возможностью оценки наиболее широкого спектра показателей заготовки [11—13], таких как производственные затраты, трудо- и энергоёмкость [1], [8—10], [26], [27]. Развитие вычислительной техники и программных средств математического моделирования расширило возможности современных исследователей в области лесозаготовительного производства. Среди одних из первых работ в области имитационного моделирования показателей заготовки древесины следует отметить исследования [6], [7]. Показано [6], [7], что применение методов имитационного моделирования и вычислительного эксперимента позволяет не только выявлять теоретические взаимосвязи факторов, относящихся к природно-производственным условиям, и показателей заготовки древесины, но и получать наглядные выводы и рекомендации, позволяющие на практике обоснованно подходить к планированию лесосечных работ и комплектованию парка машин, что, в свою очередь, ведёт к совершенствованию технологии заготовки древесины и повышению технико-экономических показателей предприятий лесной промышленности. Среди особенностей заготовки плантационной энергетической древесины важно отметить меньший, по сравнению с рубками спелых и перестойных насаждений, средний объём хлыста, скорее соответствующий объёму хлыста при проведении рубок ухода за составом, но при этом в условиях сплошной рубки. При этом справочные нормы выработки, используемые при планировании, относятся в большей степени к древостоям со средним объёмом $0,14 \text{ м}^3$ и выше [19].

2. Материалы и методы

Основными задачами, решаемыми в данной работе, являются:

1. Получение практических зависимостей для оценки энергетической ценности стволовой древесины от времени роста. Зависимости будут использоваться при оценке эффективности комплексов для заготовки плантационной древесины по критерию энергетической стоимости [8], [26], [27].

2. Компоновка математических моделей для расчёта производительности различных комплексов машин и механизмов заготовки плантационной древесины и их реализация, проведение вычислительного эксперимента.

3. Обработка результатов вычислительного эксперимента, получение зависимостей для практической оценки показателей заготовки энергетической древесины различными

комплексами машин и механизмов, совершенствующих планирование и принятие решений в области заготовки плантационной древесины.

3. Результаты

Вначале примем общую модель процесса изменения объёма дерева по мере роста в виде дифференциального уравнения [3]

$$\frac{dV(t)}{dt} = r \cdot V(t) \left(1 - \frac{V(t)}{K} \right), \quad (1)$$

где r , K — числовые коэффициенты, зависящие от породы древесины и внешних условий, V — объём ствола дерева, t — время.

Общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$V(t) = \frac{K}{1 + C_1 K e^{-rt}}, \quad (2)$$

где C_1 — постоянная интегрирования.

При начальных условиях

$$V(0) = V_0, \quad (3)$$

где V_0 — начальный объём, ориентировочно равный объёму ствола саженца, получим уравнение:

$$V(t) = \frac{KV_0}{(K - V_0)e^{-rt} + V_0}, \quad (4)$$

Значения K , r можно оценить на основе экспериментальных или справочных данных о росте деревьев при помощи аппроксимации. Начальный объём V_0 можем принять в качестве входного параметра модели, но с учётом его сравнительно небольшого значения и сложности точного определения можем рассматривать V_0 как числовой коэффициент и оценивать его значение также на основе результатов аппроксимации кривых роста деревьев. Например, для тополя бальзамического получены данные, представленные в таблице 1 [14].

Таблица 1. Рост тополя бальзамического на лесных плантациях [14]

Table 1. Growth of balsamic poplar on forest plantations

| Годы | Высота деревьев, м | Диаметр ствола, см | Объём ствола, м ³ |
|------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 5 | 4,1 | 5,4 | 0,00488 |
| 10 | 13 | 13 | 0,0897 |
| 15 | 18,7 | 17,7 | 0,239 |
| 20 | 21,5 | 20 | 0,351 |
| 25 | 23,2 | 21,3 | 0,430 |

В таблице 1 объём ствола вычислен по формуле [19]

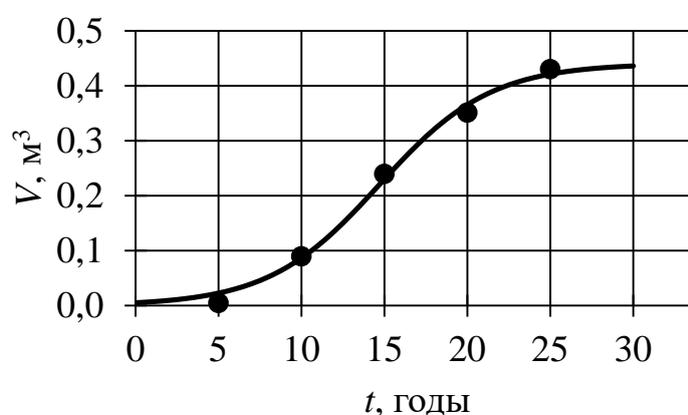
$$V = k_{\phi} H \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5)$$

где k_{ϕ} — коэффициент учёта формы ствола, $k_{\phi} = 0,52$, H , d — соответственно высота деревьев и диаметр ствола.

Обработаем табличные данные и установим коэффициенты функции (4) при помощи метода наименьших квадратов (МНК). В результате получим: $r = 0,299$; $K = 0,441$; $V_0 = 0,00539$. Тогда для рассматриваемого случая

$$V(t) = \frac{0,00238}{0,435e^{-0,299t} + 0,00539}, \quad (6)$$

Результаты расчётов по формуле (6) и данные таблицы 1 представлены на рисунке 1.



● Таблица 1 — ф. (6)

Рисунок 1. Зависимость объёма ствола тополя бальзамического от возраста

Figure 1. The dependence of the volume of the trunk of the balsamic poplar on the age

Использование функций (4), (6) позволяет получить расчётные данные по объёму ствола, согласующиеся с практическими наблюдениями.

Рассчитаем приблизительный объём стволовой древесины на 1 га площади и оценим её энергетическую стоимость [8], [27], [28]:

$$q(t) = \frac{10000V(t)}{S}, \quad (7)$$

$$W(t) = \frac{\rho_{\text{св}} q(t)}{100 + W_{\text{св}}} Q_0, \quad (8)$$

где S — площадь плантации, приходящаяся на 1 саженец, $\rho_{\text{св}}$ — плотность стволовой древесины при влажности $W_{\text{св}}$, Q_0 — высшая теплота сгорания абсолютно сухой древесины.

Использование непрерывных функций (6)—(8) с точки зрения реализации вычислительного эксперимента удобнее, нежели дискретных данных в виде таблицы.

При $S = 9 \text{ м}^2$ [14], $\rho_{\text{св}} = 700 \text{ кг/м}^3$, $W = 90 \%$, $Q_0 = 20 \text{ МДж/кг}$ получим оценки, представленные графиками на рисунках 2, 3.

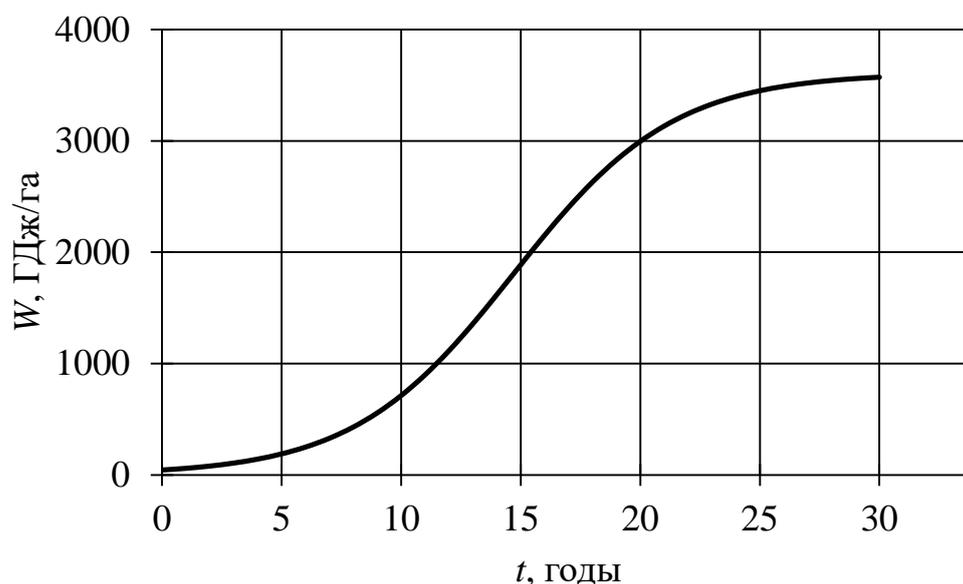


Рисунок 2. Оценка энергетической стоимости [8], [27], [28] стволовой древесины тополя бальзамического в зависимости от возраста

Figure 2. Assessment of the energy value [8], [27], [28] of balsamic poplar stem wood depending on age

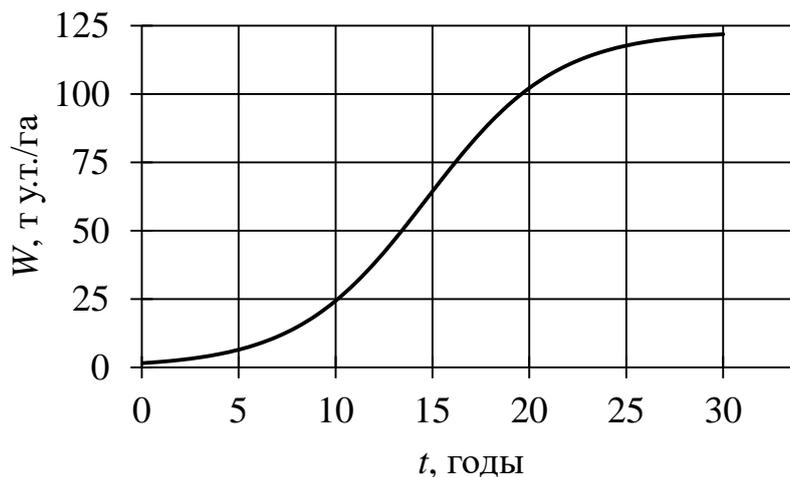


Рисунок 3. Оценка энергетической стоимости стволовой древесины тополя бальзамического в зависимости от возраста (в тоннах условного топлива)

Figure 3. Estimation of the energy value of balsamic poplar stem wood depending on age (in tons of conventional fuel)

Таким образом, с точки зрения энергетики сухая масса стволовой древесины, выращенной на 1 га плантации за 15—20 лет, эквивалентна 65—100 т условного топлива.

Для проведения вычислительного эксперимента с целью получения зависимостей для практической оценки показателей заготовки энергетической древесины следует подобрать математические модели, прогнозирующие производительность машин и механизмов, выполняющих отдельные операции лесосечных работ. Источником информации послужат теоретические модели и экспериментальные данные отечественных [19] и зарубежных [21—26], [29—31] учёных.

Часовую производительность бензиномоторной пилы, валочно-пакетирующей машины и харвестера определим по формуле

$$P = 3600 \frac{V_x}{T}, \quad (9)$$

где T — продолжительность цикла обработки дерева с использованием машины или механизма.

Разделим цикл обработки дерева с использованием бензиномоторной пилы на составляющие:

$$T_{\text{БП}} = (t_{0,\text{БП}} + t_{1,\text{БП}} + t_{2,\text{БП}} + t_{3,\text{БП}}) \cdot f_{a,\text{БП}}, \quad (10)$$

где $t_{0,\text{БП}}$ — время, затрачиваемое вальщиком на подготовительные операции (подход к дереву, подготовка рабочего места и инструмента), $t_{1,\text{БП}}$ — время, затрачиваемое на спиливание дерева, $t_{2,\text{БП}}$ — время, затрачиваемое на обработку сваленного дерева (обрезка

сучьев, раскряжёвка), $t_{3,БП}$ — время на переход к следующему дереву, f_a — повышающий коэффициент, связанный с эффективностью использования рабочего времени и технологическими простоями.

Время, затрачиваемое вальщиком на подготовительные операции, примем как входной параметр по [19]:

$$t_{0,БП} = 120 \text{ с.} \quad (11)$$

Время, затрачиваемое на спиливание дерева, рассчитаем по формуле

$$t_{1,БП} = \frac{\pi d_c^2 - 0,8sd_c}{\Pi_{чп,БП}} \cdot k_y, \quad (12)$$

где d_c — диаметр дерева в месте среза, s — толщина перемычки недопила, $\Pi_{чп}$ — производительность чистого пиления, k_y — коэффициент, учитывающий увеличение времени за счёт переустановки пилы [19]:

$$k_y = 1 + \frac{d_c}{B_{ш}}, \quad (13)$$

где $B_{ш}$ — ширина пильной шины.

Время обработки сваленного дерева может складываться из двух составляющих, связанных с обрезкой сучьев и раскряжёвкой (при наличии таких операций), оценим затраты времени по эмпирическим формулам на основе данных [20]:

$$t_{2,БП} = t_{ос,БП} + t_{раскр,БП}, \quad (14)$$

$$t_{ос,БП} = 729,5d_{1,3}^{1,83}, \quad (15)$$

$$t_{раскр,БП} = 26,1d_{1,3}^{1,58} n_{сорт}, \quad (16)$$

где $d_{1,3}$ — диаметр дерева на высоте груди, $n_{сорт}$ — число сортиментов, получаемых из одного дерева.

Время, затрачиваемое на переход от дерева к дереву, определим по эмпирической формуле [19]

$$t_{3,БП} = 120 \sqrt{\frac{V_x}{kqv_{вал}^2}}, \quad (17)$$

где q в $[м^3/га]$, k — доля выбираемого запаса, $v_{вал}$ — средняя скорость движения вальщика.

Учтём, что диаметр дерева на высоте груди и диаметр дерева в месте среза связаны со средним объёмом хлыста:

$$d_{1,3} = \beta_1 V_x^{\beta_2}, \quad (18)$$

$$d_c = c_1 d_{1,3}, \quad (19)$$

где β_1, β_2, c_1 — эмпирические коэффициенты.

Продолжительность цикла обработки дерева с использованием валочно-пакетирующей машины определим по формуле

$$T_{\text{ВПМ}} = (t_{0,\text{ВПМ}} + t_{1,\text{ВПМ}} + t_{2,\text{ВПМ}} + t_{3,\text{ВПМ}}) \cdot f_{a,\text{ВПМ}}, \quad (20)$$

где $t_{0,\text{ВПМ}}$ — время, затрачиваемое на подготовительные операции (наведение манипулятора, захват дерева), $t_{1,\text{ВПМ}}$ — время, затрачиваемое на спиливание дерева, $t_{2,\text{ВПМ}}$ — время, затрачиваемое на работу манипулятора с деревом, $t_{3,\text{ВПМ}}$ — время, затрачиваемое на переезд к следующей технологической стоянке.

Время, затрачиваемое на наведение манипулятора и захват дерева, рассчитаем по формуле [20]

$$t_{0,\text{ВПМ}} = \frac{2}{3v_{\text{под,ВПМ}}} \cdot \frac{R_{\text{max,ВПМ}}^3 - R_{\text{min,ВПМ}}^3}{R_{\text{max,ВПМ}}^2 - R_{\text{min,ВПМ}}^2} + \frac{D_{\text{захв,ВПМ}} - d_c}{2v_{\text{закр,ВПМ}}} + \frac{\bar{\alpha}_0}{\omega_{\text{пов,ВПМ}}}, \quad (21)$$

где $v_{\text{под}}$ — скорость подачи манипулятора, R_{max} — максимальный вылет манипулятора, R_{min} — минимальный вылет манипулятора, $D_{\text{захв}}$ — диаметр раскрытия захвата, $v_{\text{закр}}$ — скорость закрытия захвата, $\bar{\alpha}_0$ — средний угол поворота платформы ВПМ при захвате дерева, $\omega_{\text{пов,ВПМ}}$ — угловая скорость поворота платформы ВПМ.

Время, затрачиваемое на спиливание дерева, определим по формуле

$$t_{1,\text{ВПМ}} = \frac{\pi d_c^2}{4\Pi_{\text{чп,ВПМ}}\varphi_{\text{чп,ВПМ}}}, \quad (22)$$

где $\varphi_{\text{чп}}$ — коэффициент использования производительности чистого пиления.

Время, затрачиваемое на работу манипулятора с деревом, рассчитаем по уравнению

$$t_{2,\text{ВПМ}} = \frac{D_{\text{захв,ВПМ}} - d_c}{2v_{\text{раскр,ВПМ}}} + \frac{\bar{\alpha}_2}{\omega_{\text{пов,ВПМ}}}, \quad (23)$$

где $v_{\text{раскр}}$ — скорость раскрытия захвата ВПМ, $\bar{\alpha}_2$ — средний угол поворота платформы ВПМ при пакетировании деревьев.

Время, затрачиваемое на переезд ВПМ к следующей технологической стоянке, найдём по формуле

$$t_{3,ВПМ} = \frac{2V_x}{q\pi R_{max} v_{ВПМ}} + t_{30,ВПМ}, \quad (24)$$

где t_{30} — время, затрачиваемое на приведение технологического оборудования в транспортное положение.

Цикл обработки дерева с использованием харвестера также найдём как сумму составляющих:

$$T_X = (t_{0,X} + t_{1,X} + t_{2,X} + t_{3,X}) \cdot f_{a,X}, \quad (25)$$

где $t_{0,X}$ — время, затрачиваемое на подготовительные операции (наведение манипулятора, захват дерева), $t_{1,X}$ — время, затрачиваемое на пиление и сталкивание с пня, $t_{2,X}$ — время, затрачиваемое на обрезку сучьев и раскряжёвку, $t_{3,X}$ — время, затрачиваемое на переезд к следующей технологической стоянке.

Время, затрачиваемое на подготовительные операции, включая наведение манипулятора и захват дерева, определим по формуле

$$t_{0,X} = \frac{2}{3v_{под,X}} \cdot \frac{R_{max,X}^3 - R_{min,X}^3}{R_{max,X}^2 - R_{min,X}^2} + \frac{D_X - d_c}{2v_{захв,X}}. \quad (26)$$

Время, затрачиваемое на пиление и сталкивание с пня, рассчитаем по уравнению

$$t_{1,X} = \frac{\pi d_c^2}{4\Pi_{чп,X}\varphi_{чп,X}} \cdot k_{ст,X}, \quad (27)$$

где $k_{ст,X}$ — повышающий коэффициент, учитывающий сталкивание дерева с пня:

$$k_{ст,X} = 1,5 \quad (28)$$

Время, затрачиваемое на обрезку сучьев и раскряжёвку, рассчитывается по формуле

$$t_{2,X} = \frac{l_x}{v_{прот,X}} + \frac{\pi d_{средн}^2}{4\Pi_{чп,X}\varphi_{чп,X}} n + \frac{2l_{торм}}{v_{прот,X}} n, \quad (29)$$

где l_x — длина хлыста, $v_{прот,X}$ — скорость протаскивания дерева при обрезке сучьев и раскряжёвке, n — число сортиментов, выпиленных из одного дерева, $l_{торм}$ — длина пути торможения сучкорезно-раскряжёвочной головки, $d_{средн}$ — средний диаметр в месте пропила при раскряжёвке, причём

$$d_{средн} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}, \quad (30)$$

$$l_x = \gamma_1 V_x^{\gamma_2}, \quad (31)$$

где γ_1, γ_2 — эмпирические коэффициенты.

Время, затрачиваемое харвестером на переезд к следующей технологической стоянке, определяется по формуле

$$t_{3,X} = \frac{V_x}{\Delta q v_X} + t_{30,X}, \quad (32)$$

где Δ — ширина пасаки.

Цикл обработки дерева с использованием процессора определим как сумму составляющих:

$$T_{\text{проц}} = (t_{0,\text{проц}} + t_{2,\text{проц}}) \cdot f_{a,\text{проц}}, \quad (33)$$

где $t_{0,\text{проц}}$ — время, затрачиваемое на наведение манипулятора и захват дерева, $t_{2,X}$ — время, затрачиваемое на обрезку сучьев и раскряжёвку:

$$t_{0,\text{проц}} = \frac{2}{3v_{\text{под,проц}}} \cdot \frac{R_{\text{max,проц}}^3 - R_{\text{min,проц}}^3}{R_{\text{max,проц}}^2 - R_{\text{min,проц}}^2} + \frac{D_{\text{проц}} - d_3}{2v_{\text{захв,проц}}}. \quad (34)$$

$$t_{2,\text{проц}} = \frac{l_x}{v_{\text{прот,проц}}} + \frac{\pi d_{\text{средн}}^2}{4\Pi_{\text{чп,проц}} \varphi_{\text{чп,проц}}} n + \frac{2l_{\text{торм}}}{v_{\text{прот,проц}}} n, \quad (35)$$

Отдельно отметим, что производительность дробильных установок, рубящих лесоматериалы в топливную щепу, определяется, главным образом, мощностью привода. Например, для установок барабанного типа в результате аппроксимации данных [19] получим уравнение

$$P_{\text{ДУ}} = 0,36N_{\text{ДУ}}^{0,85}, \quad (36)$$

где N — мощность привода [кВт].

Часовую производительность машин, выполняющих трелёвку, определим по формуле

$$P = 3600 \frac{V}{T_T}, \quad (37)$$

где V — объём лесоматериалов, трелюемых за рейс, T_T — время цикла трелёвки (мин).

Время трелёвки пачки деревьев скиддером найдём по формуле

$$T_{T,\text{ТПЗ}} = (t_{0,\text{ТПЗ}} + t_{1,\text{ТПЗ}} + t_{2,\text{ТПЗ}} + t_{3,\text{ТПЗ}}) \cdot f_{a,\text{ТПЗ}}, \quad (38)$$

где $t_{0,\text{ТПЗ}}$ — время формирования пачки, $t_{1,\text{ТПЗ}}$ — время грузового рейса, $t_{2,\text{ТПЗ}}$ — время отцепки пачки, $t_{3,\text{ТПЗ}}$ — время возвращения скиддера на делянку за новой пачкой лесоматериалов.

Для расчёта времени формирования пачки известна формула

$$t_{0,\text{ТПЗ}} = 60 \cdot \left(3 + 0,33 \frac{V_{\text{ТПЗ}}}{V_x} k_{\text{фп}} \right), \quad (39)$$

где $k_{\text{фп}}$ — повышающий коэффициент, учитывающий число приёмов формирования пачки:

$$k_{\text{фп}} = 0,075n_{\text{фп}}^2 + 0,125n_{\text{фп}} + 0,8, \quad (40)$$

где $n_{\text{фп}}$ — число приёмов формирования пачки.

Время грузового рейса рассчитаем по формуле

$$t_{1,\text{ТПЗ}} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{1,\text{ТПЗ}}}, \quad (41)$$

где $v_{1,\text{ТПЗ}}$ — скорость грузового хода скиддера, $l_{\text{средн}}$ — среднее расстояние трелёвки.

Время отцепки пачки найдём по эмпирической формуле

$$t_{2,\text{ТПЗ}} = 60 \cdot (0,24V_{\text{ТПЗ}} + 1,33). \quad (42)$$

Время холостого хода скиддера определяется по уравнению

$$t_{3,\text{ТПЗ}} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{3,\text{ТПЗ}}}, \quad (43)$$

где $v_{3,\text{ТПЗ}}$ — скорость холостого хода скиддера (км/ч).

Аналогично найдём время цикла трелёвки форвардером:

$$T_{T,\Phi} = (t_{0,\Phi} + t_{1,\Phi} + t_{2,\Phi} + t_{3,\Phi}) \cdot f_{a,\Phi}, \quad (44)$$

где $t_{0,\Phi}$ — время загрузки кузова форвардера, $t_{1,\Phi}$ — время грузового рейса, $t_{2,\Phi}$ — время разгрузки кузова форвардера, $t_{3,\Phi}$ — время возвращения форвардера на делянку.

Время загрузки грузовой платформы форвардера найдём по формуле

$$t_{1,\Phi} = 60 \cdot \left(0,5167 \frac{V_{\Phi}}{V_{\text{сорт}}} + 14,98q^{-0,35} \right), \quad (45)$$

где $V_{\text{сорт}}$ — средний объём сортамента по формуле

$$V_{\text{сорт}} = 0,0612 \ln V_x + 0,2082. \quad (46)$$

Время грузового рейса форвардера

$$t_{1,\Phi} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{1,\Phi}}. \quad (47)$$

Время разгрузки грузовой платформы форвардера определим по зависимости

$$t_{2,\Phi} = 60 \cdot \left(13,05 - 26,62 \sqrt{\frac{V_{\text{сорт}}}{V}} + 0,73 \right). \quad (48)$$

Время возвращения форвардера на делянку

$$t_{3,\Phi} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{3,\Phi}}. \quad (49)$$

Время цикла трелёвки трактором, оборудованным гидроманипулятором:

$$T_{T,\text{БЧ}} = (t_{0,\text{БЧ}} + t_{1,\text{БЧ}} + t_{2,\text{БЧ}} + t_{3,\text{БЧ}}) \cdot f_{a,\text{БЧ}}, \quad (50)$$

где $t_{0,\text{БЧ}}$ — время, затрачиваемое на работу манипулятора при наборе лесоматериалов, $t_{1,\text{БЧ}}$ — время грузового рейса, $t_{2,\text{БЧ}}$ — время разгрузки трактора, $t_{3,\text{БЧ}}$ — время возвращения трактора на делянку.

Время, затрачиваемое на работу манипулятора при наборе лесоматериалов, найдём по эмпирической формуле

$$t_{0,\text{БЧ}} = 60 \cdot \left(0,25V_x V_{\text{БЧ}} + 0,44 \frac{V_{\text{БЧ}}}{V_x} + 0,4V_{\text{БЧ}} + \frac{123}{q} + 0,32 \right). \quad (51)$$

Время грузового рейса трактора

$$t_{1,\Phi} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{1,\text{БЧ}}}. \quad (52)$$

Время разгрузки трактора определим по зависимости

$$t_{2,\text{БЧ}} = 60 \cdot (0,24V_{\text{БЧ}} + 1,33). \quad (53)$$

Время возвращения трактора на пашку рассчитаем по формуле

$$t_{3,\text{БЧ}} = \frac{l_{\text{средн}}}{v_{3,\text{БЧ}}}, \quad (54)$$

Реализуем расчёты показателей заготовки плантационной древесины с использованием нескольких систем машин, представленных в таблице 2.

Таблица 2. Технологические процессы заготовки плантационной древесины

Table 2. Technological processes of plantation wood harvesting

| Группа | № | Операции | | | | | |
|--------|---|----------|----|---|-----|------------|----|
| | | В (ВП) | Ос | Р | Т | Ос (Ос, Р) | Пщ |
| А | 1 | Х | | | Ф | — | — |
| | 2 | Х | | — | ТПЗ | БП | — |
| | 3 | БП | БП | | Ф | — | — |
| | 4 | Х | — | — | ТПЗ | — | РМ |
| Б | 1 | ВПМ | — | — | ТПЗ | Процессор | — |
| | 2 | БП | — | — | ТТ | БП | — |
| | 3 | Х | | | Ф | — | — |
| | 4 | ВПМ | — | — | ТПЗ | — | РМ |
| | 5 | БП | — | — | ТТ | — | РМ |

Примечание: В — валка, П — пакетирование, Ос — обрезка сучьев, Р — раскряжёвка, Т — трелёвка, Пщ — производство щепы; Х — харвестер, Ф — форвардер, БП — бензиномоторная пила, ВПМ — валочно-пакетирующая машина, ТТ — трелёвочный трактор с гидроманипулятором, ТПЗ — трактор с пачковым захватом, РМ — рубительная машина.

Для проведения расчётов зададимся марками машин, характеристики которых типичны для принятых природно-производственных условий:

- **A1.** Сортименты производит малогабаритный харвестер Vimek 404SE ($N = 50$ кВт, $R_{\max} = 4,6$ м), трелёвка с использованием малогабаритного форвардера Vimek 606TTW ($N = 18$ кВт, $V = 4$ м³).
- **A2.** Валка, обрезка сучьев и пакетирование с использованием малогабаритного харвестера Vimek 404SE ($N = 50$ кВт, $R_{\max} = 4,6$ м), трелёвка с использованием трактора с пачковым захватом Timberjack 230d ($N = 68$ кВт, $V = 4$ м³), раскряжёвка на верхнем складе бензиномоторными пилами Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт).
- **A3.** Валка с использованием бензиномоторных пил Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт), далее очистка от сучьев и раскряжёвка пилами Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт), трелёвка сортиментов с использованием малогабаритного форвардера Vimek 606TTW ($N = 18$ кВт, $V = 4$ м³).
- **A4.** Валка и пакетирование с использованием малогабаритного харвестера Vimek 404SE ($N = 50$ кВт, $R_{\max} = 4,6$ м), трелёвка с использованием трактора с пачковым захватом Timberjack 230d ($N = 68$ кВт, $V = 4$ м³), рубка в щепу с использованием рубительной машины Kesla C645T ($N = 128$ кВт).
- **B1.** Валка и пакетирование с использованием валочно-пакетирующей машины John Deere 653G ($N = 127$ кВт, $R_{\max} = 7,32$ м), трелёвка с использованием трактора с пачковым захватом Timberjack 230d ($N = 68$ кВт, $V = 4$ м³), обрезка сучьев и раскряжёвка с использованием процессора Valmet 448 ($N = 127$ кВт).
- **B2.** Валка с использованием бензиномоторных пил Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт), трелёвка деревьев с использованием трактора Амкодор 2243 ($N = 109$ кВт, $V = 7,3$ м³), далее очистка от сучьев и раскряжёвка пилами Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт).
- **B3.** Сортименты производит харвестер Ponsse Beaver ($N = 90$ кВт, $R_{\max} = 10$ м), трелёвка с использованием форвардера Ponsse Wisent ($N = 130$ кВт, $V = 12$ м³).
- **B4.** Валка и пакетирование с использованием валочно-пакетирующей машины John Deere 653G ($N = 127$ кВт, $R_{\max} = 7,32$ м), трелёвка с использованием трактора с пачковым захватом Timberjack 460 ($N = 88$ кВт, $V = 5,5$ м³), рубка в щепу с использованием рубительной машины Kesla C645T ($N = 128$ кВт).
- **B5.** Валка с использованием бензиномоторных пил Stihl MS250 ($N = 2,2$ кВт), трелёвка деревьев с использованием трактора Амкодор 2243 ($N = 109$ кВт, $V = 7,3$ м³), рубка в щепу с использованием рубительной машины Kesla C645T ($N = 128$ кВт).

Отметим, что, к сожалению, в настоящее время сегмент сравнительно лёгких скиддеров практически не охвачен производителями техники. Тем не менее даже устаревшие модели тракторов Timberjack 230d и Timberjack 460 до сих пор используются на заготовке. Их характеристики могут быть использованы в качестве ориентиров впоследствии, при проектировании перспективных моделей лёгких тракторов для работы на лесных плантациях.

Также важно заметить, что на лесных плантациях возможна не только заготовка энергетической древесины с вывозкой щепы, но и заготовка тонкомерных сортиментов с их вывозкой. Такие сортименты впоследствии могут перерабатываться как в энергетических, так и в иных целях (например, известны технологии углублённой переработки низкотоварной древесины на лесопромышленных складах). Для некоторых технологических процессов заготовки плантационной древесины характерно использование лёгких харвестеров, таких как Vimek 404SE, не только в «режиме валка — обрезка сучьев — раскряжёвка», но и в режиме «валка — обрезка сучьев», т. е. в режиме процессора, связанного со скиддером.

Результаты расчётов представим в виде графиков на рисунках 4—16. На рисунках 4 и 5 представлены результаты численного моделирования. Результаты выполнены в увеличенном диапазоне объёма хлыста, как для сравнительно небольших ($0,001—0,006 \text{ м}^3$), так и более крупных ($0,4 \text{ м}^3$) деревьев, которые, как правило, не подлежат переработке в рассматриваемых процессах. Увеличение диапазона расчёта связано с необходимостью возможно более полно раскрыть поведение функций производительности комплексов машин и механизмов.

Уточним, что известны технологические процессы, в которых харвестер работает в режиме процессора. В этом случае при протаскивании дерева происходит только очистка от сучьев, без раскряжёвки (т. е. без дополнительных остановок дерева и распилов), что с технологической точки зрения не вызывает затруднений. Такой способ связан с фактическим отсутствием на рынке лёгких мобильных процессоров, пригодных для работы на лесных плантациях.

Следует подчеркнуть, что при расчёте производительности харвестера учитывается время, затрачиваемое на раскряжёвку. В зависимости от объёма и длины ствола меняется число получаемых сортиментов, т. е. число распилов, что, в свою очередь, сказывается на общих затратах времени. С учётом дискретного характера числа распилов кривая изменения производительности многооперационной машины и, соответственно, комплекса, в котором она используется, приобретает визуальные особенности, напоминающие ступени.

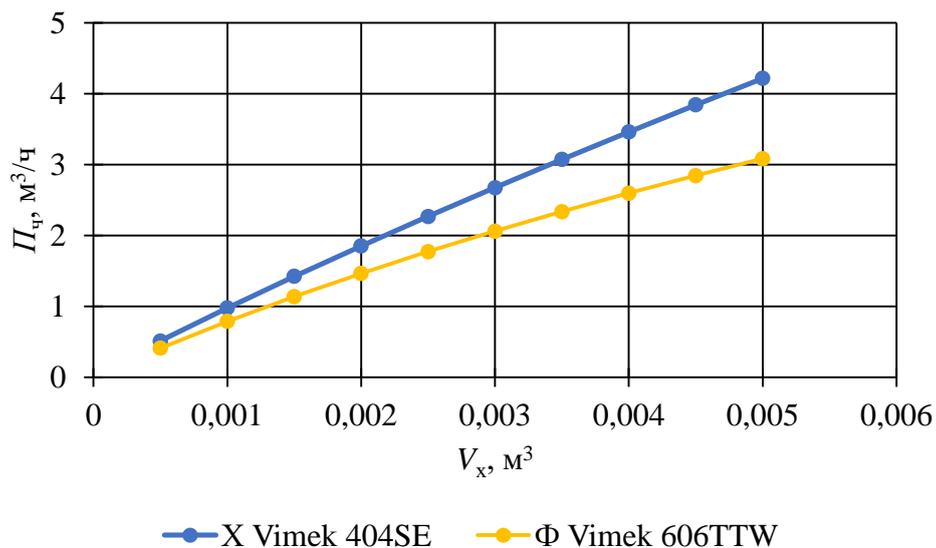


Рисунок 4. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе A1

Figure 4. Results of calculating the productivity of machines in the technological process A1

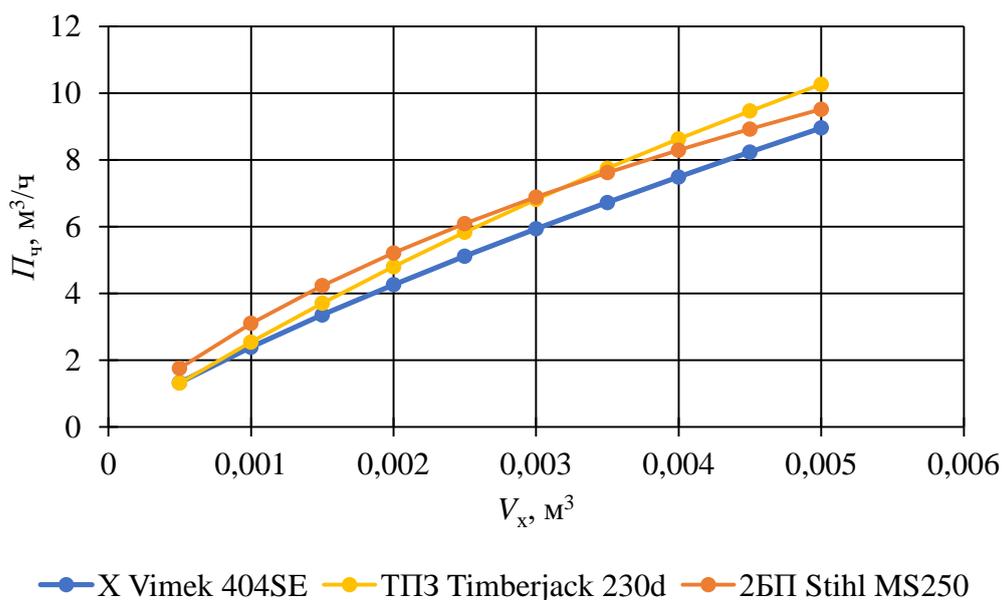


Рисунок 5. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе A2

Figure 5. Results of calculating the productivity of machines in the technological process A2

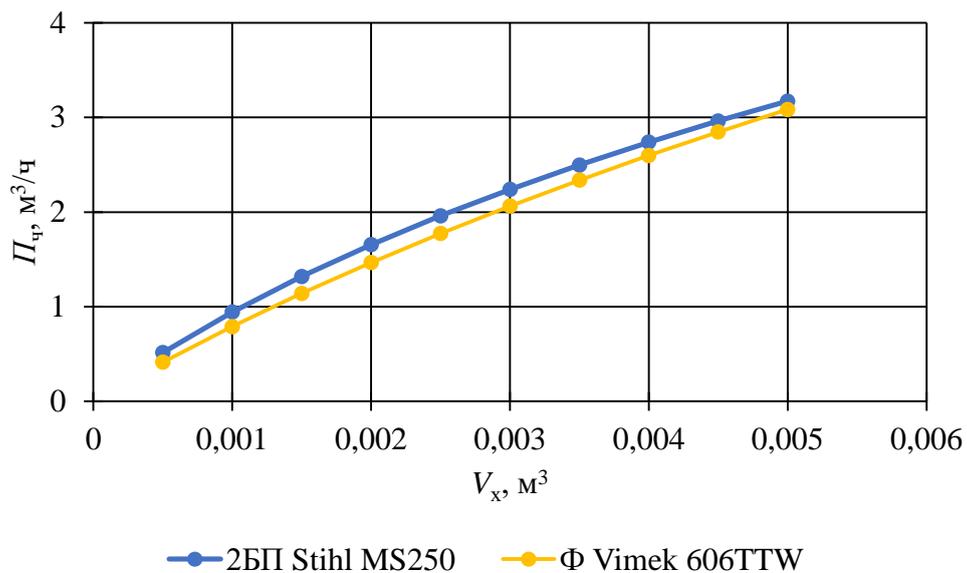


Рисунок 6. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе А3

Figure 6. Results of calculating the productivity of machines in the technological process A3

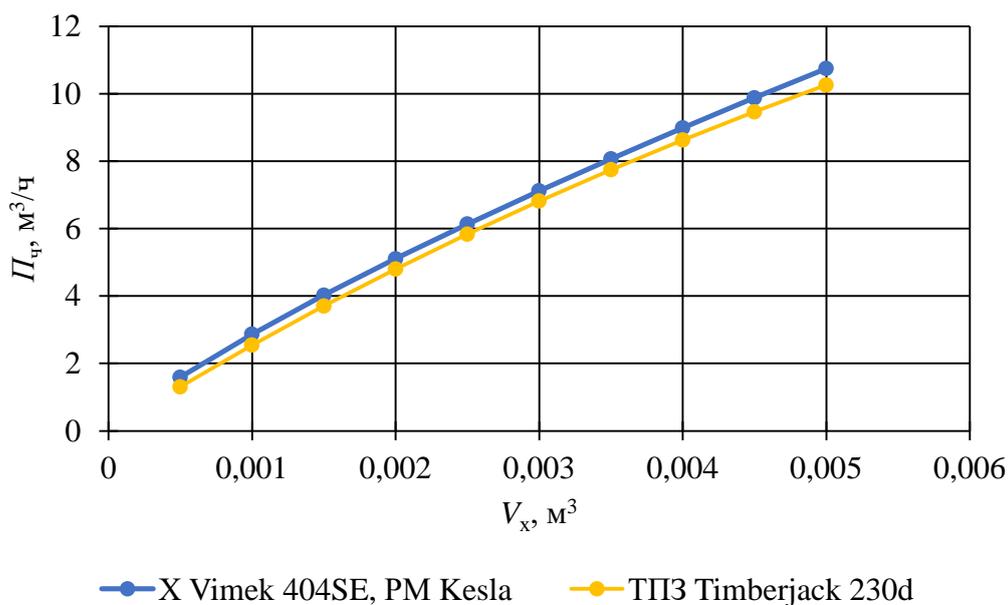


Рисунок 7. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе А4

Figure 7. Results of calculating the productivity of machines in the technological process A4

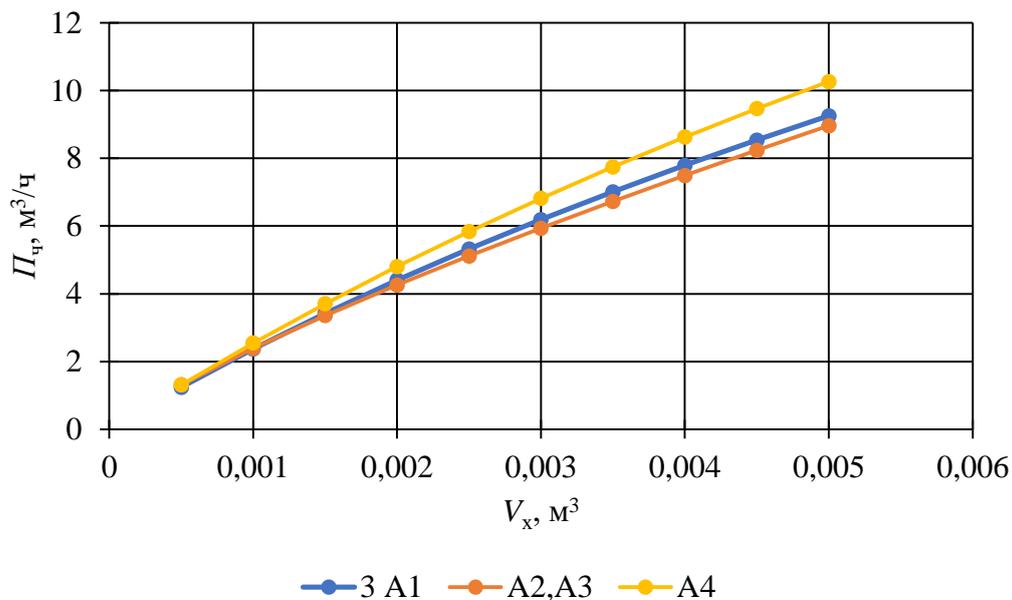


Рисунок 8. Часовая производительность комплексов заготовки плантационной древесины (группа А, для системы № 1 на графике представлена производительность 3 комплексов)

Figure 8. Hourly productivity of plantation wood harvesting complexes (group A, for system No. 1, the graph shows the productivity of 3 complexes)

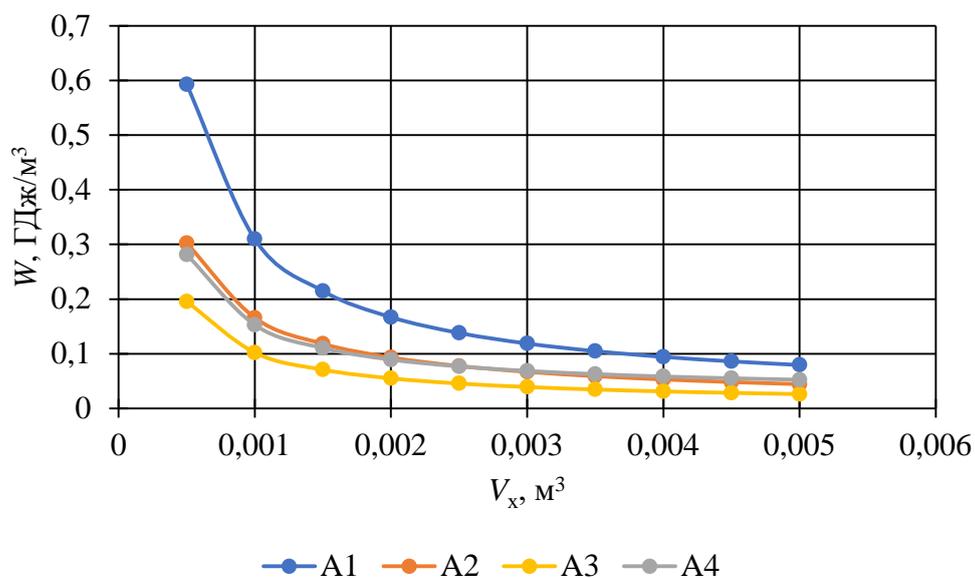


Рисунок 9. Энергетическая себестоимость заготовки плантационной древесины (группа А)

Figure 9. Energy cost of plantation wood harvesting (group A)

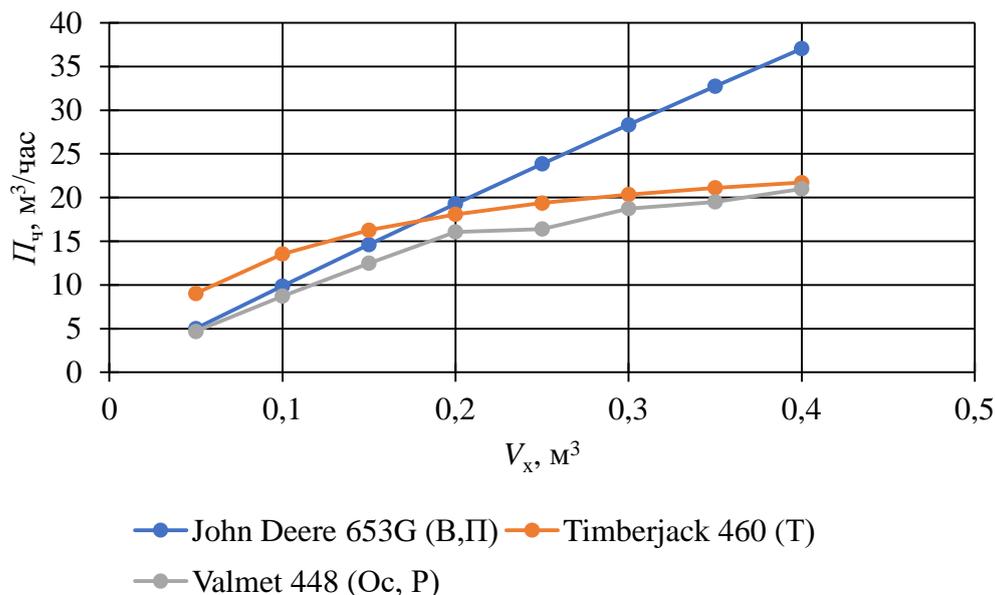


Рисунок 10. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе Б1

Figure 10. Results of calculating the productivity of machines in the technological process B1

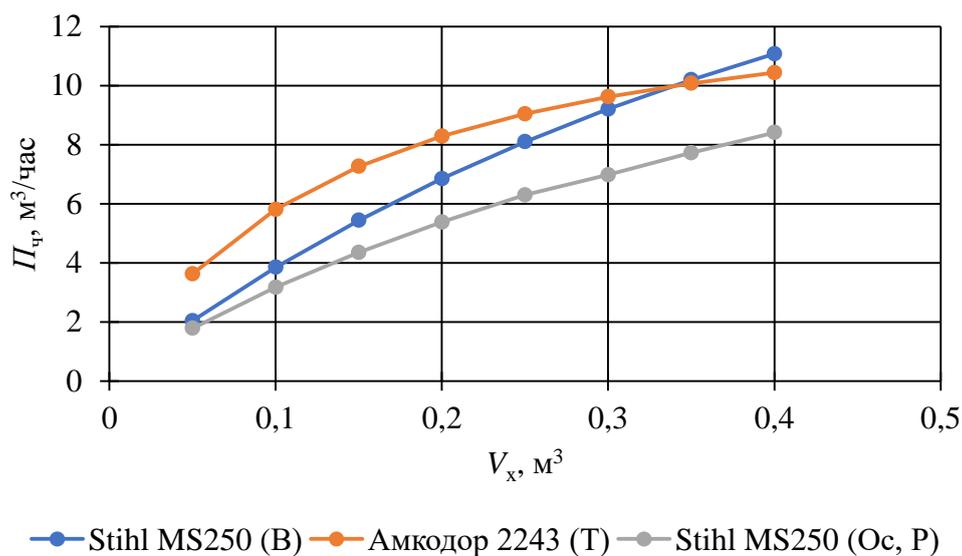


Рисунок 11. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе Б2

Figure 11. Results of calculating the productivity of machines in the technological process B2

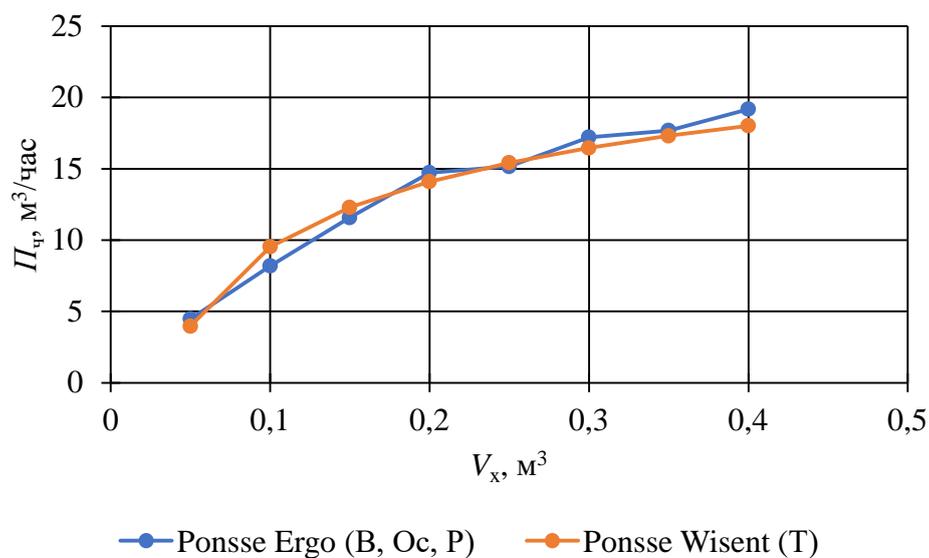


Рисунок 12. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе Б3

Figure 12. Results of calculating the productivity of machines in the technological process B3

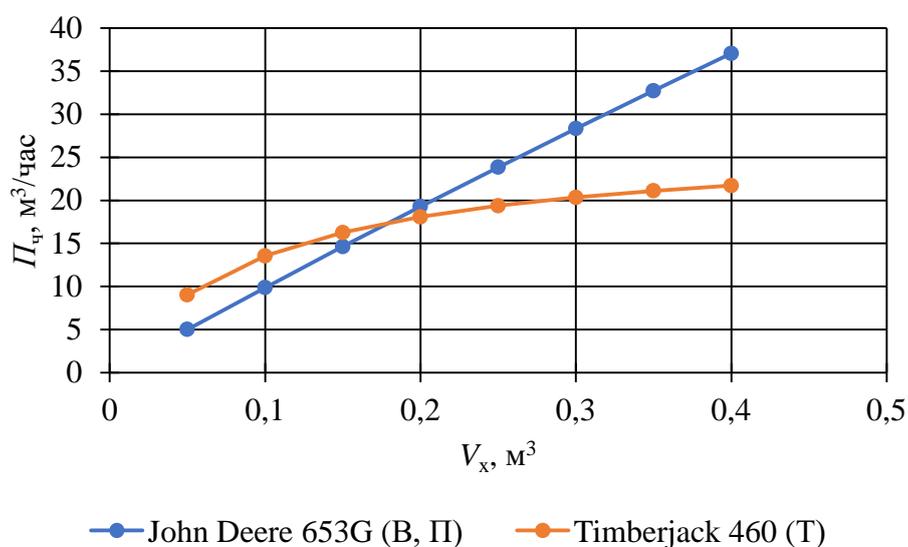


Рисунок 13. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе Б4

Figure 13. Results of calculating the productivity of machines in the technological process B4

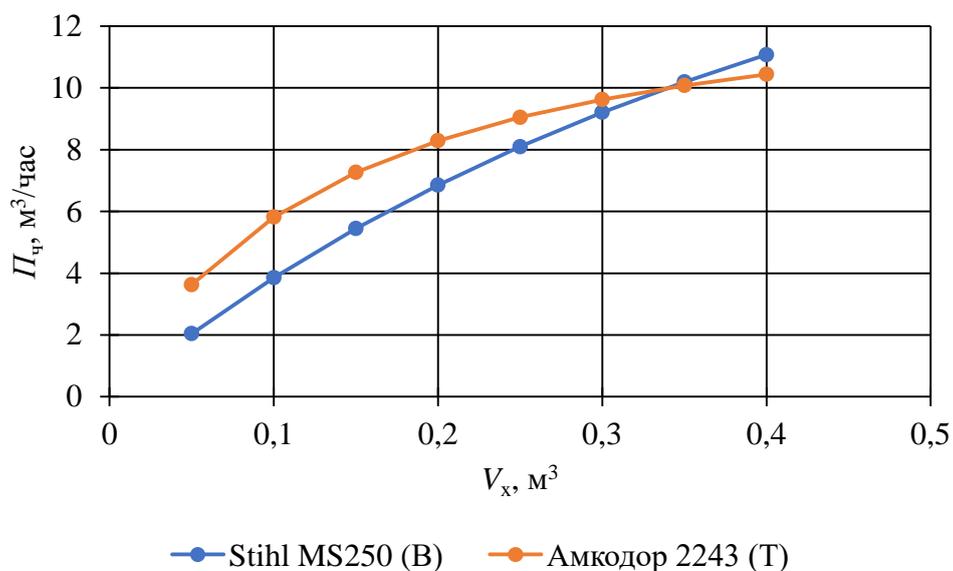


Рисунок 14. Результаты расчёта производительности машин в технологическом процессе Б5

Figure 14. Results of calculating the productivity of machines in the technological process B5

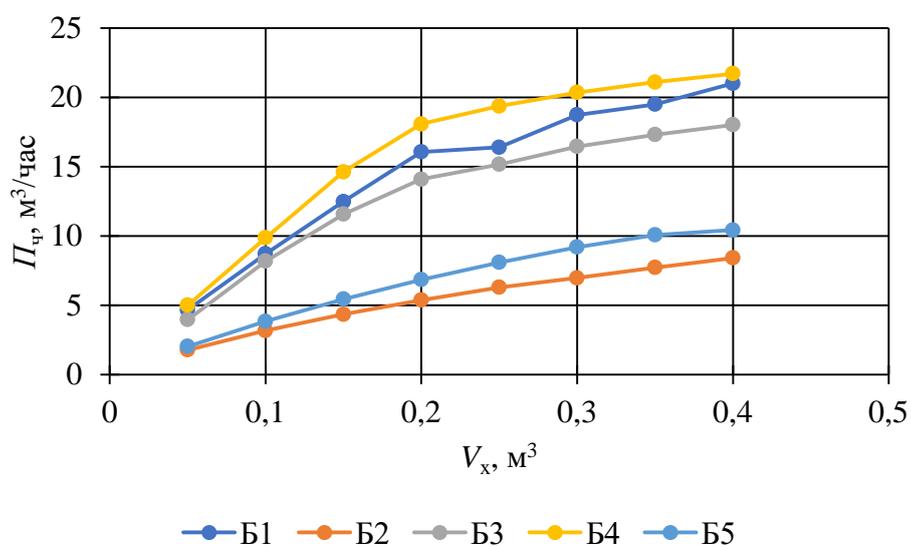


Рисунок 15. Часовая производительность комплексов заготовки плантационной древесины (группа Б)

Figure 15. Hourly productivity of plantation wood harvesting complexes (group B)

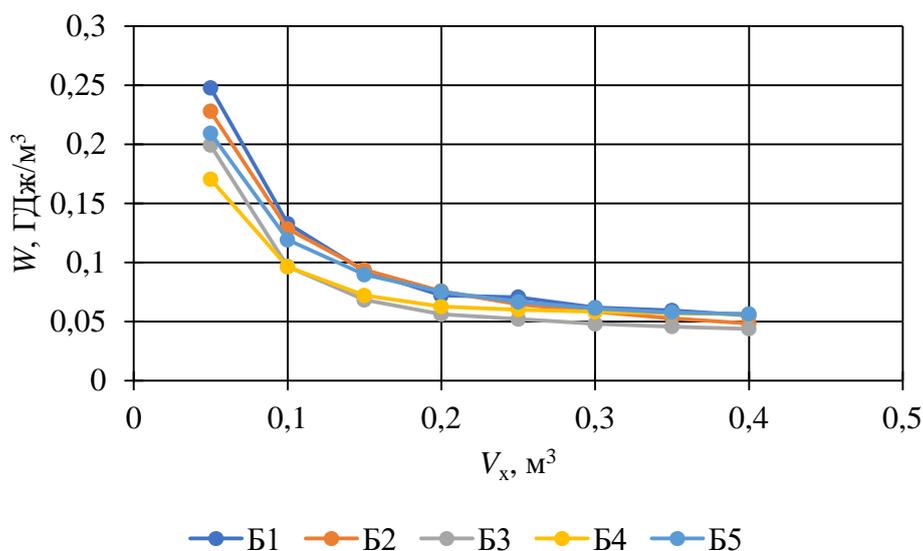


Рисунок 16. Энергетическая себестоимость заготовки плантационной древесины (группа Б)

Figure 16. Energy cost of plantation wood harvesting (group B)

4. Обсуждение и заключение

Как видно из представленного выше материала, в зависимости от комплектации системы машин для заготовки древесины на энергетической лесной плантации, а также от параметров, входящих в системы машин, и показателей их работы, энергетическая себестоимость заготовки получаемой древесины различна. При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать той системе машин, которая показывает наименьшую энергетическую себестоимость заготовки древесины — финальной группы технологических процессов в создании и эксплуатации лесной плантации энергетического назначения. Например, при производстве щепы на лесных плантациях среднего возраста (группа Б) с этой точки зрения выгоднее использовать механизированный технологический процесс (Б4), выигрывающий у механизированного (Б5) по энергетической себестоимости (рисунок 16).

В результате получены практические зависимости для оценки энергетической ценности стволовой древесины от времени роста, используемые для оценки эффективности комплексов для заготовки плантационной древесины по критерию энергетической стоимости. Скомпонованы математические модели для расчёта производительности различных комплексов машин и механизмов заготовки плантационной древесины и выполнена их реализация при проведении вычислительного эксперимента. Обработка результатов вычислительного эксперимента позволила получить зависимости для

практической оценки показателей заготовки энергетической древесины различными комплексами машин и механизмов.

Список литературы

1. Выращивание и эксплуатация лесных плантаций / А. Вагвелди, Ш. Фехер, Б. Хорват [и др.]. Ужгород: МПП «Гражда», 2016. 132 с.
2. Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / Р. В. Воронов, О. Б. Марков, И. В. Григорьев, А. Б. Давтян // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5 (371). С. 125—134.
3. *Гавриков В. Л.* Моделирование роста деревьев и древостоев в контексте углеродного цикла: Дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08 / Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Амосова. Якутск, 2016. 493 с.
4. *Куницкая О. А., Степанова Д. И., Григорьев М. Ф.* Перспективные направления развития транспортно-технологических систем лесного комплекса России // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы междунар. научно-практич. конф. / Под общ. ред. В. А. Гулевского. Воронеж, 2018. С. 109—114.
5. Cultivation of the targeted forest plantations / O. Kunickaya, V. Tanyukevich, D. Khmeleva [et al.] // Journal of Environmental Treatment Techniques. 2020. Vol. 8, no 4. P. 1385—1393.
6. *Герасимов Ю. Ю., Сюнев В. В.* Лесосечные машины для рубок ухода: Компьютерная система принятия решений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 236 с.
7. *Герасимов Ю. Ю., Сюнев В. В.* Экологическая оптимизация технологических процессов и машин для лесозаготовок. Йёнсуу: Изд-во Университета Йёнсуу, 1998. 178 с.
8. Определение энергоёмкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования / И. В. Григорьев, Е. Г. Хитров, А. И. Никифорова, О. И. Григорьева, О. А. Куницкая // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19, № 5. С. 1499—1502.
9. *Григорьев В. И.* Лесные плантации в Азиатско-Тихоокеанском регионе // Наука и инновации: векторы развития. Материалы Междунар. научно-практич. конф. молодых учёных: Сб. науч. ст.: В 2 кн. Красноярск, 2018. С. 75—78.
10. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia / S. Morkovina, O. Kunickaya, L. Dolmatova [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Vol. 18, no 2. С. 19—26.
11. *Швецова В. В.* Эффективность работы систем машин лесозаготовительного производства // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 17—21.
12. *Куницкая О. А., Пудова Т. М., Никитина Е. И.* Перспективные направления переработки низкотоварной древесины и древесных отходов в Республике Саха (Якутия) // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 14—18.
13. *Григорьев В. И.* Возможности развития импорта российского твёрдого биотоплива // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 45—47.
14. *Загидуллина Л. И.* Лесные плантации. Основы создания, выращивания и использования. Ульяновск: УлГУ, 2018. 185 с.
15. *Куницкая О. А.* Оценка экономики производства древесных пеллет в России // Потенциал науки и образования: современные исследования в области агрономии, землеустройства, лесного хозяйства. 2019. С. 27—32.

16. Куницкая О. А., Помигуев А. В. Перспективы развития систем генерирования и преобразования электрической энергии для лесных терминалов // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: Сб. ст. Всерос. научно-практич. конф. Красноярск, 2021. С. 124—128.
17. Куницкая О. А. Проактивный сервис для лесных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Шестой Всерос. национал. научно-практич. конф. с междунар. участием. Петрозаводск, 2020. С. 86—87.
18. Математическая модель выбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций / О. Б. Марков, Р. В. Воронов, А. Б. Давтян [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 1. С. 16—26.
19. Системы машин для производства топливной щепы из древесной биомассы по технологии заготовки деревьями / Ю. В. Суханов, А. А. Селиверстов, В. С. Сюнев, Ю. Ю. Герасимов // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 1. С. 7—13.
20. Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Галактионов О. Н. Техническое оснащение современных лесозаготовок. СПб.: ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. 344 с.
21. Ciubotaru A., Campu R. Delimiting and Cross-cutting of Coniferous Trees-Time Consumption Work Productivity and Performance // Forests. 2018. No 9. 10.3390/f9040206.
22. Harvester Productivity in Inclined Terrain with Extended Machine Operating Trail Intervals: A German Case Study Comparison of Standing and Bunched Trees / F. Berendt, E. Esteban, S. Hoffmann [et al.] // Sustainability. 2020. No 12. 10.10.3390/su12219168.
23. Bilici E., Akay A., Abbas D. Assessing the effects of site factors on the productivity of a feller buncher: a time and motion analysis // Journal of Forestry Research. 2019. No 30. P. 1471—1478.
24. Operational Performance of the Selective Cutting of Trees With Chainsaw / A. F. Cándano, D. Oliveira, C. Arruda, M. Garcia, R. Melo // Floresta e Ambiente. 2018. No 25. 10.1590/2179-8087.023916.
25. Morkovina S. S., Keča L. Economic assessment of forest plantations with short rotation: Russia and Serbia experience // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)». 2019. P. 012—072.
26. Gałęzia T. Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw // Forest Research Papers. 2014. No 75. 10.2478/frp-2014-0003.
27. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, V. Ivanov, G. Gasparian, A. Nikiforova, E. Khitrov // 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 443—446.
28. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, V. Ivanov, E. Khitrov, A. Kalistratov, V. Bozhbov // 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014. Sofia, 2014. P. 407—414.
29. Jiroušek R., Klvač R., Skoupy A. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations // Journal of forest science. 2007. P. 476—482. 10.17221/2088-JFS.
30. Productivity Model for Cut-to-Length Harvester Operation in South African Eucalyptus Pulpwood Plantations / J. Norihiro, P. Ackerman, B. Spong, D. Längin // Croatian Journal of Forest Engineering. 2018. No 39. P. 1—13.
31. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia / I. Stankic, T. Poršinsky, Ž. Tomašić, I. Tonkovic, M. Frntic // Croatian Journal of Forest Engineering. 2012. No 33. P. 61—78.

References

1. Vagveldi A., Feher Sh., Horvat B., Koman S., Kovach G., Szabo L., Tsupi I., Grigorev I., Grigoreva O., Danilov D., Kunitskaya O., Krivash E. *Cultivation and exploitation of forest plantations*. Uzhgorod, MPE «Grazhda», 2016. 132 p. (In Russ.)
2. Voronov R. V., Markov O. B., Grigorev I. V., Davtyan A. B. Mathematical model of the modular principle of selecting a system of machines for the creation and operation of forest plantations. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2019, no 5 (371), pp. 125—134. (In Russ.)
3. Gavrikov V. L. *Modeling of the growth of trees and stands in the context of the carbon cycle*. Diss. doct. of Biological Sciences: 03.02.08, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov. Yakutsk, 2016. 493 p. (In Russ.)
4. Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Grigorev M. F. Promising directions of development of transport and technological systems of the forest complex of Russia. *Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference. Under the general editorship of V. A. Gulevsky*. Voronezh, 2018, pp. 109—114. (In Russ.)
5. Kunickaya O., Tanyukevich V., Khmeleva D., Kulik A., Runova E., Savchenkova V., Voronova A., Lavrov M. Cultivation of the targeted forest plantations. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 2020, vol. 8, no 4, pp. 1385—1393.
6. Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S. *Logging machines for logging care: A computer decision-making system*. Petrozavodsk, publishing house of PetrSU, 1998. 236 p. (In Russ.)
7. Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S. *Ecological optimization of technological processes and machines for logging*. Joensuu, publishing house of the University of Joensuu, 1998. 178 p. (In Russ.)
8. Grigorev I. V., Khitrov E. G., Nikiforova A. I., Grigoreva O. I., Kunitskaya O. A. Determination of the energy intensity of forest management products within the framework of the methodology for assessing the environmental efficiency of forest management. *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*, 2014, vol. 19, no 5, pp. 1499—1502. (In Russ.)
9. Grigorev V. I. Forest plantations in the Asia-Pacific region. *Science and innovation: vectors of development. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists. Collection of scientific articles. In 2 books*. Krasnoyarsk, 2018, pp. 75—78. (In Russ.)
10. Morkovina S., Kunickaya O., Dolmatova L., Markov O., Nguyen V. L., Baranova T., Shadrina S., Grin'ko O. Comparative analysis of economic aspects of growing seedlings with closed and open root systems: the experience of Russia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no 2, pp. 19—26.
11. Shvetsova V. V. The efficiency of the system logging process. *Actual problems of the forest complex*, 2020, no 57, pp. 17—21. (In Russ.)
12. Kunitskaya O. A., Pudova T. M., Nikitina E. I. Promising directions of processing low-grade wood and wood waste in the Republic of Sakha (Yakutia). *Potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*, 2019, pp. 14—18. (In Russ.)
13. Grigorev V. I. Opportunities for the development of imports of Russian solid biofuels. *Improving the efficiency of the forest complex. materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 45—47. (In Russ.)

14. Zagidullina L. I. *Forest plantations. Fundamentals of creation, cultivation and use*. Ulyanovsk, UISU, 2018. 185 p. (In Russ.)
15. Kunitskaya O. A. Evaluation of the economy of wood pellet production in Russia. *The potential of science and education: modern research in the field of agronomy, land management, forestry*, 2019, p. 27—32. (In Russ.)
16. Kunitskaya O. A., Pomiguyev A. V. Prospects for the development of systems for generating and converting electric energy for forest terminals. *Forest exploitation and integrated use of wood. Collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference*. Krasnoyarsk, 2021, pp. 124—128. (In Russ.)
17. Kunitskaya O. A. Proactive service for forest machines. *Improving the efficiency of the forest complex. materials of the Sixth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, 2020, pp. 86—87. (In Russ.)
18. Markov O. B., Voronov R. V., Davtyan A. B., Grigorev I. V., Kalita G. A. Mathematical model of choosing a system of machines for creating and operating forest plantations. *Woodworking industry*, 2021, no 1, pp. 16—26. (In Russ.)
19. Sukhanov Yu. V., Seliverstov A. A., Syuney V. S., Gerasimov Yu. Y. Systems of machines for the production of fuel chips from wood biomass using the technology of harvesting trees. *Tractors and agricultural machines*, 2012, no 1, pp. 7—13. (In Russ.)
20. Shegelman I. R., Skrypnik V. I., Galaktionov O. N. *Technical equipment of modern logging*. St. Petersburg, PROFI-INFORM, 2005. 344 p. (In Russ.)
21. Ciubotaru Arcadie, Razvan Campu. Delimiting and Cross-cutting of Coniferous Trees-Time Consumption Work Productivity and Performance. *Forests*, 2018, no 9. 10.3390/f9040206.
22. Ferréol Berendt, Eduardo Esteban, Hoffmann Stephan, Paula Alonso, Janine Schweier. Harvester Productivity in Inclined Terrain with Extended Machine Operating Trail Intervals: A German Case Study Comparison of Standing and Bunched Trees. *Sustainability*, 2020, no 12. 10.10.3390/su12219168.
23. Bilici Ebru, Abdullah Akay, Dalia Abbas. Assessing the effects of site factors on the productivity of a feller buncher: a time and motion analysis. *Journal of Forestry Research*, 2019, no 30, pp. 1471—1478.
24. Cándano Acosta Fidel, David Oliveira, Cleide Arruda, Marcos Garcia, Rafael Melo. Operational Performance of the Selective Cutting of Trees With Chainsaw. *Floresta e Ambiente*, 2018, no 25. 10.1590/2179-8087.023916.
25. Morkovina S. S., L. Keča L. Economic assessment of forest plantations with short rotation: Russia and Serbia experience. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)»*, 2019, pp. 012—072.
26. Gałęzia Tomasz. Analysis of the duration of basic logging operations performed using a chainsaw. *Forest Research Papers*, 2014, no 75. 10.2478/frp-2014-0003.
27. Grigorev I., Ivanov V., Gasparian G., Nikiforova A., Khitrov E. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation. *14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014*. Sofia, 2014, pp. 443—446.
28. Grigorev I., Ivanov V., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost. *14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014*. Sofia, 2014, pp. 407—414.
29. Jiroušek R., Klvac R., Skoupý A. Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of forest science*, 2007, pp. 476—482. 10.17221/2088-JFS.

30. Norihiro Jennifer, Pierre Ackerman, Ben Spong, Dirk Längin. Productivity Model for Cut-to-Length Harvester Operation in South African Eucalyptus Pulpwood Plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2018, no 39, pp. 1—13.
31. Stankic Igor, Poršinsky Tomislav, Tomašić Željko, Tonkovic Ivica, Frntic Marko. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, no 33, pp. 61—78.

© Гаспарян Г. Д., Давтян А. Б., Григорьев И. В., Марков О. Б., Григорьева О. И., 2021