

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ДЛЯ СОРТИМЕНТНОЙ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ

Е.Е. Клубничкин

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

klubnichkin@bmstu.ru

Представлены результаты теоретических обоснований метода повышения энергоэффективности и экологической безопасности погрузочно-транспортных машин, используемых при сортиментной заготовке древесины. Установлено, что, исходя из принципов равенства грузопотока погрузочно-транспортных машин, производительности валочно-сучкорезно-раскряжевых машин, получено значение мощности двигателя погрузочно-транспортных машин, которое позволит определить облик создаваемой машины в зависимости от сопротивления движению и пути, который проходит валочно-сучкорезно-раскряжевая машина в зависимости от плотности древостоя. Показано, что принцип данной модели заключается в том, что производительность валочно-сучкорезно-раскряжевых работ равна производительности погрузочно-транспортных работ, т. е. валочно-сучкорезно-раскряжевые машины и погрузочно-транспортные машины не простаивают. Предлагаемая методика расчета позволит на стадии разработки конструкции погрузочно-транспортных машин определить тип движителя и конструкцию ходовой системы погрузочно-транспортных машин. Установлено, что предлагаемая модель не затрагивает экономические вопросы, как у других исследователей в данной области. Используются интегральные модели на уровне формул.

Ключевые слова: погрузочно-транспортная машина, мощность двигателя, энергоэффективность, экологическая безопасность, моделирование, сортиментная технология заготовки древесины

Ссылка для цитирования: Клубничкин Е.Е. Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125

Основу современной полностью механизированной сортиментной технологии заготовки леса составляют валочно-сучкорезно-раскряжевые машины (ВСРМ) и погрузочно-транспортные машины (ПТМ), выпускаемые как на колесной, так и на гусеничной базе. Они подразделяются на классы: легких, средних и тяжелых машин. Данную технику производит огромное количество фирм.

Наиболее распространенной системой машин для заготовки сортиментов у пня при сплошных рубках является система, включающая в себя ВСРМ массой 18–20 т с вылетом стрелы манипулятора 8–10 м, оснащенного валочно-сучкорезно-раскряжевой головкой, способной срезать деревья в среднем со стволами диаметром до 70 см. В комплекте с ними применяются ПТМ массой около 20 т, имеющие полезную нагрузку 17–18 т.

В зависимости от условий местности производительность таких машин может составлять до 350 м³ древесины в день (15...20 м³/ч) [1–4]. Ныне намечается тенденция увеличения мощности и массы таких машин.

При заготовке леса наиболее сложной и тяжелой операцией с точки зрения энергоэффективности, производительности и экологической безопасности является транспортная (трелевочная) операция [5]. В связи с этим рассмотрим трелевочную ПТМ, поскольку у ВСРМ энергоэффективность (если рассматривать энергетическую установку и потребность в энергетике) [6–10] определяется в основном работой технологического оборудования. Высокая производительность ВСРМ требуется только при выполнении технологических операций, в частности при валке, обрезке сучьев и раскряжке. Машина при выполнении этих технологических операций остается неподвижной. В отличие от ВСРМ у ПТМ на энергоэффективность влияет скорость выполнения погрузочно-транспортных (трелевочных) операций.

Ведущие ученые отмечают [11–14], что принципы сортиментной технологии в области создания машин для заготовки древесины различаются для ВСРМ и ПТМ. По их мнению в транспортных операциях при сортиментной заготовке древесины основной машиной, затрачивающей большее количество энергии на перемещение (движение), является ПТМ. Исходя из этого представим методику повышения энергоэффективности и экологической безопасности ПТМ.

Цель работы

Цель работы — исследование возможности повышения энергоэффективности и экологической безопасности ПТМ, предназначенных для сортиментной заготовки древесины путем научно обоснованного выбора рациональных конструктивных параметров на этапе проектирования с помощью математического моделирования технологического процесса, а также опыт создания методов, направленных на улучшение процессов принятия решений в области проектирования ПТМ на основании использования данных для создания моделей ПТМ для различных лесных зон РФ.

Материалы и методы

Метод определения мощности силовой установки ПТМ. От породы древесины и степени ее влажности зависит количество принимаемого к трелевке леса [15–17], поскольку масса древесины влияет на грузоподъемность ПТМ. Учет круглого леса проводится по плотной массе древесины путем определения объема каждого сортимента или в складочной (штабельной) мере. Для выполнения расчетов, связанных с определением мощности силовой установки ПТМ в процессе погрузки, каждую рабочую смену следует определять среднюю массу 1 м³ леса, которую можно получить как частное от деления количества погруженного леса в тоннах на его объем. Например: 1 м³ свежеспиленной березы имеет массу 930 кг, влажность — 78 %; ель — 710 кг, влажность — 91 %; сосна — 800 кг, влажность 88 %, осина — 760 кг, влажность 82 % [18]. (Используя эти показатели для удобства расчетов вместо кубических метров будем использовать тонны).

Определяем производительность ВСРМ ($\Pi_{с.м.х}$)

$$\Pi_{с.м.х} = \frac{M_{гр}}{t_{цл}}$$

Далее определяем производительность ПТМ – грузопоток ($\Pi_{с.м.ф}$)

$$\Pi_{с.м.ф} = \frac{M_{ф.гр}}{t_{цл}}$$

Условие $\Pi_{с.м.х} = \Pi_{с.м.ф}$.

Определяем производительность ПТМ ($\Pi_{гр}$) при погрузке или разгрузке сортимента массой $M_{ф.гр}$ за время $t_{п/р}$

$$\Pi_{гр} = \frac{M_{ф.гр}}{t_{п/р}}$$

Коэффициент использования массы ПТМ ($k_{мф}$) равен

$$k_{мф} = \frac{M_{ф.гр}}{M_{ф}}$$

Для фокусировки на ключевых аспектах примем допущения, которые лучше помогут понять основные принципы, влияющие на исследуемую систему машин для сортиментной технологии заготовки древесины.

Допущения:

- на пути следования ПТМ повторяет путь ВСРМ;
- коэффициент сопротивления движению ПТМ не изменяется в зависимости от числа проходов и массы ПТМ;
- КПД трансмиссии равен 1; буксование отсутствует;
- масса $M_{гр}$ заготовленного сортимента ВСРМ равна массе сортимента, трелюемого ПТМ на верхний склад $M_{ф.гр}$.

Решение:

На один рейс ПТМ $t_{цл}$ включает в себя время: на движение ПТМ в холостом направлении от погрузочного пункта до места сбора транспортируемой пачки; на набор пачки сортиментов; на движение ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту; на перегрузку сортиментов с ПТМ в штабель:

$$t_{н} = \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}}$$

$$t_{гр.i} = \frac{S_i}{v_{гр.i}}$$

Скорость движения ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту можно определить таким образом:

$$v_{гр.i} = \frac{N_{дв.ф}}{(M_{ф} + M_{ф.гр})} fg;$$

Список принятых обозначений

Буквенное обозначение	Единица измерения	Объяснение
$M_{гр}$	т	Масса заготавливаемого сортимента ВСРМ
$t_{ц2}$	мин	Время для подъезда, валки, обрезки сучьев и раскряжевки при заготовке сортимента массой $M_{гр}$
$\Pi_{с.м.ф}$	т	Грузопоток
$M_{ф.гр}$	т	Масса сортимента, трелюемого на верхний склад
$t_{ц1}$	мин	Время на погрузку и трелевку сортимента массой $M_{ф.гр}$
$\Pi_{с.м.х}$	т	Производительность ВСРМ
S_X	м	Путь, пройденный ВСРМ при заготовке сортимента массой $M_{ф.гр}$ за время $t_{ц2}$
$t_{п/р}$	мин	Время при погрузке или разгрузке сортимента массой $M_{ф.гр}$
$\Pi_{гр}$	т	Производительность при погрузке или разгрузке сортимента массой $M_{ф.гр}$ за время $t_{п/р}$
$k_{мф}$		Коэффициент использования массы ПТМ
$M_{ф}$	т	Масса ПТМ
$t_{гр.i}$	мин	Время движения с грузом по пути S_i со скоростью $v_{гр.i}$
S_i	м	Путь
$v_{гр.i}$	км/ч	Скорость
$t_{п}$	мин	Время на перегрузку сортиментов с ПТМ в штабель
$t_{гр.i}$	мин	Время на движение ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту
$N_{дв.ф}$	кВт	Мощность двигателя ПТМ
f		Суммирующий коэффициент сопротивления движению
n		Число проходов от места заготовки ВСРМ до верхнего склада
$t_{б/гр.i}$	мин	Время движения без груза на пути S_i со скоростью $v_{б/гр.i}$
$v_{б/гр.i}$	км/ч	Скорость движения ПТМ без груза
t_x	мин	Время работы ВСРМ
S_x	м	Путь который прошла ВСРМ, не просто перемещение машины, а движение, связанное с особенностью расположения деревьев, их размером, частотой произрастания на лесосеке
S_i	м	Путь ПТМ с приращением
f_0		Начальное сопротивление движению
f_{max}		Сопротивление движению ПТМ после n проходов
z_0	мм	Радиус ведущего колеса
G_{max}	–	Буксование движителя при f_{max}
$N_{движ}$	–	Зависимость изменения сопротивления движению ПТМ
Δf	–	Изменение сопротивления движения за каждый проход
n^*	–	Число проходов за смену, соответствует минимальной расчетной мощности двигателя $\min N_{дв.ф}$
$n_{г}$	–	Число проходов ПТМ в груженом состоянии

$$\begin{aligned}
 t_{гр,i} &= \sum_{i=1}^n t_{гр,i}; \\
 t_{6/гр,i} &= \frac{S_i}{v_{6/гр,i}}; \\
 v_{6/гр,i} &= \frac{N_{дв.ф}}{M_{\phi}} fg; \\
 t_x &= \sum_{i=1}^n t_{6/гр,i}; \\
 t_{цл} &= 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{\phi} + M_{гр,i}) fg}{N_{дв.ф}} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{\phi} fg}{N_{дв.ф}}; \\
 t_{цл} &= \frac{2M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{2M_{\phi} fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n + \\
 &\quad + \frac{fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n + \frac{fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n S_i M_{\phi,гр}.
 \end{aligned}$$

Особенность технологического процесса механизированной сортиментной технологии заготовки леса заключается в том, что ПТМ все время движется за ВСРМ. ПТМ доезжает до ВСРМ, выполняет погрузку сортиментов и движется обратно к верхнему складу или лесовозной дороге — и так за смену несколько раз. Если известна производительность ВСРМ, известна производительность погрузочно-разгрузочных операций технологического оборудования ПТМ, то можно закладывать общий уровень создаваемой конструкции $k_{мф}$ (коэффициент используемой массы). Далее определяем или выбираем производительность ВСРМ. Понятно, что она разная, но при расчете необходимо закладывать высокие показатели производительности, в том числе на погрузочно-разгрузочное оборудование, установленное на ПТМ. Путь S_x , который прошла ВСРМ, не просто перемещение машины, а движение, связанное с особенностью расположения деревьев, их размером, частотой произрастания на лесосеке [19–23].

Тогда мощность двигателя ПТМ примет вид

$$N_{дв.ф} = \frac{fgS_x \left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} - \frac{2}{\Pi_{гр}} \right)}. \quad (1)$$

Если заданы производительность ВСРМ и производительность погрузочно-разгрузочных операций технологического оборудования ПТМ, то с помощью формулы (1) получим мощность двигателя ПТМ. Если мощность двигателя ПТМ поделить на f и g и задать среднюю скорость движения, например 10 км/ч, то получим среднюю массу ПТМ, поскольку скорость в одном направлении и скорость в другом будут различаться, так как кривая мощности задана в виде гиперболы [13]. Через коэффициент использования массы ПТМ получаем, количество перевозимых сортиментов, что позволит в дальнейшем рассчитать транспортную работу ПТМ.

Формула (1) имеет три варианта:

1) ПТМ едет все время за ВСРМ, повторяет один и тот же путь, а в зависимости, как она проезжает между пасаками и собирает пакет сортиментов, выбрать другую модель движения ПТМ;

2) при разном сопротивлении движению груженой и порожней ПТМ коэффициент сопротивления движению от массы не зависит, но в зависимости от состояния ПТМ давление на грунт меняется;

3) коэффициент сопротивления движению зависит от числа проходов, но принцип функционирования модели более понятен в данном виде с учетом принятых допущений.

Полученные выводы можно проверить путем моделирования в прикладных пакетах программ [24–32].

Усовершенствовать формулу (1) можно с учетом сопротивления движению ПТМ. Чем больше сопротивление движению, тем мощнее двигатель ПТМ, чем меньше сопротивление, тем меньше мощность. Впоследствии это позволит определить необходимое количество ПТМ для своевременного выполнения погрузочно-транспортных операций на пути вслед за ВСРМ с учетом типа лесосеки, запаса и объема древесины, от того, какой путь проходит ВСРМ и какая у нее производительность. Предлагаемая модель не затрагивает экономические вопросы, как у других исследователей [33–36] в данной области.

Принцип разработанной модели заключается в том, что производительность валочно-сучкорезно-раскряжевых работ равна производительности погрузочно-транспортных работ, т. е. ВСРМ и ПТМ не простаивают. Отсюда следует, что можно ехать по лесосеке с высокой скоростью и перевозить малый объем груза (объем сортиментов), поскольку при этом мощность определяется сразу (если необходимо вывезти малый объем) либо ехать медленнее и перевозить большой объем.

С учетом числа проходов и согласно конструкции машины можно достичь баланс. Важно прийти к оптимальному решению — сколько ПТМ использовать и с каким типом движителя, в каких условиях в зависимости от значения коэффициента f должна ездить ПТМ и вслед за какой ВСРМ. Можно сделать следующий основной вывод по этой модели: производительность ВСРМ должна равняться грузопотоку ПТМ (все, что заготовлено ВСРМ, должно быть собрано и вывезено ПТМ). Если производительность ВСРМ возрастет и путь, который она проезжает, тоже увеличится, то мощность двигателя следует существенно повысить, а скорость ПТМ должна очень увеличиться, чтобы машина успевала за ВСРМ. Далее на скорость движения ПТМ налагаются ограничения. В этом случае необходимо использовать два ПТМ, что не соответствует разработанной модели.

Принцип схемы «одна ВСРМ — два ПТМ» обеспечит вывозку всего заготовленного объема древесины. Машины двигаются при этом не одна за другой, проезжая путь по пасечному волоку, собирая пачку, и уже груженные двигаются в обратном направлении по пройденной пасеке, что ухудшает условия движения вследствие вторичного воздействия движителями на поверхность пасеки. Возвращаясь разгруженными на пасеку, они выезжают вслед за ВСРМ. Здесь будет применяться другая схема — согласно предложенной модели. Конкретный пример: коэффициент f изменяется в зависимости от движения по пасеке груженой или порожней ПТМ и от числа проходов.

Исходя из принципов равенства грузопотока ПТМ, производительности ВСРМ, нами получено значение мощности двигателя ПТМ, которое позволит определить облик создаваемой машины с учетом сопротивления движению и продолжительности проходимого пути, а также плотности древостоя, которое учитывается в t_x

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{fgS_x \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} \right)}$$

Если $\Pi_{\text{с.м.х}}$ и $\Pi_{\text{гр}}$ неизвестны, их определяют экспериментально с помощью хронометражных наблюдений за работой ВСРМ и ПТМ.

Предлагаемая методика расчета позволяет на стадии разработки конструкции ПТМ определить тип движителя и конструкцию ходовой системы ПТМ [37].

Путь у ПТМ будет изменяться, поскольку ВСРМ будет постоянно уезжать вперед.

Когда число проходов равно единице, ВСРМ выполняет заготовку, ПТМ быстро приезжает, собирает все заготовленные сортименты и вывозит на верхний склад (рисунок, а)

$$\sum_{i=1}^n S_i,$$

если $n = 1$, то

$$\sum_{i=1}^n S_i = S_x.$$

На рисунке, б представлен случай, когда ВСРМ провела заготовку леса до середины участка пути и продолжила движение по пасеке, заготавливая древесину, ПТМ прошла путь до середины участка пути, провела погрузку, уехала на верхний склад и разгрузилась. Затем от верхнего склада ПТМ прошла путь до места заготовки леса, ВСРМ выполнила погрузку сортиментов и вернулась на верхний склад для разгрузки ($n = 2$).

Такой подход пригоден для трех трелевок ($n = 3$), и более, к примеру, для 20 или 30, которые ПТМ сможет совершить за смену.

Если $n = 2$, то

$$\sum_{i=1}^2 S_i = \frac{S_x}{2} + S_x \frac{2}{2}.$$

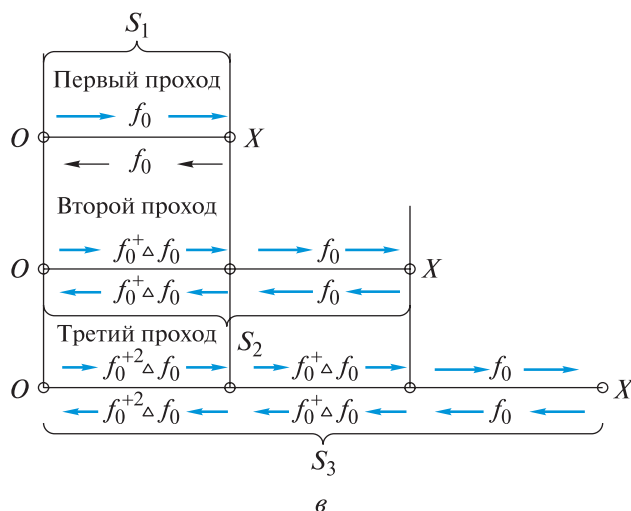
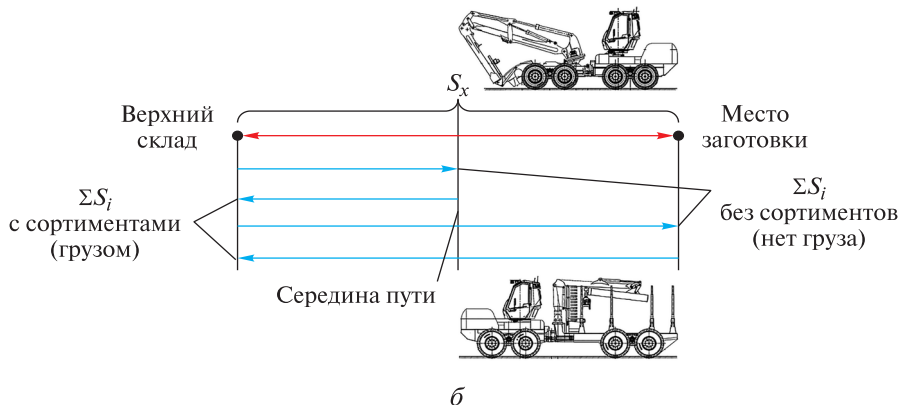
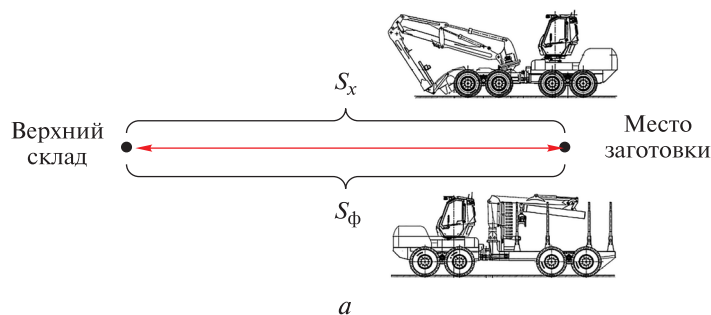
То же самое и для $n = 3$ и так далее для каждой последующей ходки до конца смены:

$$\sum_{i=1}^3 S_i = \frac{S_x}{3} + \frac{2}{3} S_x + S_x \frac{3}{3};$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \frac{S_x \sum_{i=1}^n i}{n} = \frac{S_x n(n+1)}{2},$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \frac{S_x (n+1)}{2}.$$

Рассмотрим случай, когда $n = 2$, т. е. ПТМ один раз съездила до половины пути и один раз до конца, где S_i — путь ПТМ в одну сторону. Чем больше ВСРМ работает на пути S_x , тем точнее будет расчет, потому что S_x — путь, пройденный ВСРМ при заготовке сортимента массой $M_{\text{гр}}$ за время t_x за смену. Чем длиннее путь S_x тем легче нивелировать колебание мощности; величина S_x зависит от плотности древостоя на разрабатываемом участке.



Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины: *а* — трелевка сортиментов за один проход; *б* — трелевка сортиментов за два прохода по лесосеке; *в* — изменение сопротивления движению ПТМ по лесосеке

Method of increasing energy efficiency of haul-load-dump machines for cut-to-length harvesting: *a* — skidding of assorted timber in one pass; *б* — skidding of assorted timber in two passes along the harvesting area; *в* — change of resistance to movement of the machine along the harvesting area

Перед расчетом важно получить данные по характеристикам древостоя:

$$M_{гр} = \sum_{i=1}^n M_{ф.гр} = \Pi_{с.м.ф} M_{ф.гр};$$

$$t_{ил} = \frac{2M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{fg}{N_{дв.ф}} (2M_{ф} + M_{ф.гр}) \times \frac{S_x (n+1)}{2} = \frac{M_{гр}}{\Pi_{с.м.х}};$$

$$\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} = \frac{2}{\Pi_{гр}} + \frac{fgS_x(n+1)}{N_{дв.ф} 2} \left(\frac{2}{nk_{мф}} + \frac{1}{n} \right),$$

полагая, что $n > 20$,

$$n + 1 \approx n;$$

$$\frac{n+1}{n} \approx 1;$$

$$\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} = \frac{2}{\Pi_{гр}} + \frac{fgS_x}{N_{дв.ф}} \left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right);$$

$$N_{дв.ф} = \frac{fgS_x \left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right)}{\left(\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} - \frac{2}{\Pi_{гр}} \right)}. \quad (2)$$

Представленная методика применима для лесозаготовительных машин с колесным, гусеничным и комбинированным типом движителя. В формуле (2) есть суммарный коэффициент сопротивления движению f , от которого зависит выбор типа движителя. Например, при небольшом сопротивлении используется колесный движитель, если возрастает сопротивление, то используется колесно-гусеничный, при высоком сопротивлении гусеничный. Суммарный коэффициент сопротивления движению f зависит от категории грунта и его несущей способности.

Далее рассмотрим вопросы буксования движителя лесозаготовительной машины.

Коэффициент сопротивления движению.

Необходимо наполнить предлагаемую модель выбора ПТМ, в зависимости от потребной мощности конкретными характеристиками пасаки: ее длиной и шириной, запасами и плотностью древостоя, расчетом сменной производительности ВСРМ, коэффициентом использования массы ПТМ.

Основные положения и допущения:

– производительность (за смену) ПТМ — грузоподъемность равна производительности (за смену) ВСРМ;

– сопротивление движению на пути ПТМ изменится только после прохода с грузом (пачкой сортиментов)

$$t_{ул} = 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{ф} + M_{ф.гр}) t_i g}{N_{дв.ф}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{ф} t_i g}{N_{дв.ф}},$$

где $2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}}$ — время погрузки и разгрузки ПТМ;

$\sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{ф} + M_{ф.гр}) t_i g}{N_{дв.ф}}$ — время движения груженой ПТМ;

$\sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{ф} t_i g}{N_{дв.ф}}$ — время движения порожней ПТМ;

n — число проходов (при движения как в порожнем, так и в груженом состоянии).

$$T_f = 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{g}{N_{дв.ф}} \left(\sum_{i=1}^n S_i t_i \right) (2M_{ф} + M_{ф.гр}).$$

Определим $\sum_{i=1}^n S_i t_i$, если $n = 3$, то

$$\begin{aligned} & (S_3 - S_2) f_0 + (S_2 - S_1) (f_0 + \Delta f) + \\ & + S_1 (f_0 + 2\Delta f) = \\ & = S_3 f_0 + S_2 \Delta f + S_1 \Delta f = \\ & = S_3 f_0 + \sum_{i=1}^2 S_i \Delta f. \end{aligned}$$

Рассмотрим n -й проход:

$$S_n f_0 + \sum_{j=1}^{n-1} S_j \Delta f;$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S_i f_i &= \sum_{i=1}^n \left(S_i f_0 + \sum_{j=1}^{i-1} S_j \Delta f \right) = \\ &= f_0 \sum_{i=1}^n S_i + \Delta f \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} S_j. \end{aligned}$$

Погрузочно-транспортная машина прошла n количество проходов (например, 20), в результате сопротивление движению изменится — это и будет суммарное сопротивление, которое находится путем аппроксимации (учитываем $M_{гр} = n \cdot M_{ф.гр}$).

$$S_i = S_j = \frac{S_x}{\Pi};$$

$$\sum_{i=1}^m S_i t_i = \frac{f_0 S_x}{n} \sum_{i=1}^n i + \frac{\Delta f S_x}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} j;$$

$$\sum_{i=1}^n i \xi \frac{n(n+1)}{2};$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} j \xi \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)i}{2} \xi \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i \right);$$

$$\sum_{i=1}^n S_i t_i = \frac{f_0 S_x}{2} (n+1) + \frac{\Delta f S_x (n+1)(n+1)}{6};$$

$$t_{\text{ил}} = 2 \frac{M_{\text{гр}}}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g(2M_{\text{гр}} + M_{\text{фр.р}}) S_x (f_0 + \Delta f (n-1))(n+1)}{N_{\text{дв.ф}} 2};$$

$$\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} = \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g S_x \left(f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right)}{N_{\text{дв.ф}}} \times \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) (n+1) \frac{1}{n}.$$

Далее $\Delta f n - 1 + f_0$ — это суммарное конечное сопротивление. Другими словами, перед началом движения на местности фиксируется одно сопротивление, после того как машина прошла n проходов (например, 20), а далее сопротивление изменится, т. е. и будет суммарное конечное сопротивление, которое находится путем аппроксимации.

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \times \left(f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right); \tag{3}$$

приравниванием выражение (3) к A и получаем:

$$\frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \rightarrow A;$$

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \left(f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right) = A \left(\frac{n+1}{n} f_0 + \frac{\Delta f}{3n} n^2 - 1 \right);$$

$$\frac{\partial N_{\text{дв.ф}}}{\partial n} = A \left(f_0 \frac{n-n-1}{n^2} + \frac{\Delta f}{3} \frac{2n \cdot n - n^2 + 1}{n^2} \right) = \frac{A}{n^2} \left(-f_0 + \frac{\Delta f}{3} (n^2 + 1) \right);$$

$$\frac{\partial N}{\partial n} = 0 \rightarrow n^* = \sqrt{\frac{3f_0}{\Delta f}} - 1 - \min N_{\text{дв.ф}};$$

$$\frac{\partial^2 N_{\text{дв.ф}}}{\partial n^2} = A \left(\frac{2f_0}{n^3} - \frac{\Delta f}{3} \cdot \frac{2}{n^3} \right) = \frac{2A}{n^3} \left(f_0 - \frac{\Delta f}{3} \right).$$

Если скорость движения ПТМ составляет 10 км/ч, трелевка 250 м, то при $f_0 = 0,1$ и $\Delta f = 0,008$ число проходов за смену при $\min N_{\text{дв.ф}}$ составит $n = 6$, т. е.

$$n^* = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 0,1}{0,008}} - 1 = 5,5 \approx 6.$$

Учет буксования движителя. Для определения потребной мощности на привод движителя ПТМ с учетом изменения сопротивления движению получена зависимость

$$\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} = \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g S_x \left(f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right)}{N_{\text{движ}}} \times \left(\frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) (n+1) \frac{1}{n}.$$

Получим зависимость с учетом буксования движителя:

пусть $n \gg 1 \rightarrow \frac{\infty n + 1}{n} \approx 1$,
тогда $f_0 + \Delta f (n-1) = f_{\text{max}}$.

Приведем пример: сухая грунтовая дорога \rightarrow разбитая грунтовая дорога.

Пусть G_0 — буксование движителя при начальном сопротивлении движению f_0 :

$$G = \frac{\omega z_0 - v}{\omega z_0},$$

$$N_{\text{движ}} = \frac{N_{\text{движ}}}{1 - G}$$

$$N_{\text{движ}} = f m g v + R_x (\omega z_0 - v) =$$

$$= f m g \omega z_0 = \frac{f m g v}{1 - G}$$

$$\frac{1}{3} (3 f_0 + \Delta f (n-1))$$

Определяем удельные затраты энергии на величину пройденного пути при движении к погрузке:

$$\frac{1}{P_{с.м.х.}} = \frac{2}{P_{гр}} + \frac{gS_x(2f_0 + f_{\max})\left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2}\right)}{3N_{двиг}},$$

$$\frac{1}{P_{с.м.х.}} = \frac{2}{P_{гр}} + \left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2}\right) \times$$

$$\times \frac{gS_x\left(2\frac{f_0}{1-G_0} + \frac{f_{\max}}{1-G_{\max}}\right)}{3N_{двиг}}.$$

Сопротивление движению изменяется от числа проходов, волок (дорога/путь) разбивается — двигаться становится крайне затруднительно, поэтому следует отказаться от колесного движителя в пользу гусеничного, а если волок не разбит, то можно продолжить использование колесного движителя.

Таким образом, определяем тип движителя, устанавливаемый на ПТМ, поскольку необходима удельная мощность. В качестве допущения принимаем, что используется бесступенчатая трансмиссия.

Следует вычесть из общего пути ПТМ по лесосеке оставшийся участок $\Delta f + f_0$, на котором должно быть преодолено самое высокое сопротивление движению ПТМ, с учетом равного общего времени работы ПТМ и времени работы ВСРМ. Для решения задачи нет необходимости в большой удельной мощности (ездить быстро туда и обратно) и малая не нужна, потому что иначе ПТМ не будет успевать за ВСРМ. Все, что наработала ВСРМ, ПТМ должна перевезти от места лесозаготовок до верхнего склада и выгрузить.

Выводы

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике отсутствуют объективные методы определения мощности ПТМ. Рационально подобранный двигатель для ПТМ не просто улучшает ее производительность — он является необходимым условием для эффективной работы в сложной лесной среде. Он обеспечивает проходимость, тяговую способность, устойчивость к нагрузкам и эффективность работы с различным оборудованием. Эти факторы делают двигатель критически важным элементом для успешного выполнения лесозаготовительных операций.

Таким образом, актуальным является разработанная выше методика определения мощности двигателя ПТМ. С помощью предла-

гаемой методики можно получить на стадии разработки конструкции ПТМ тип движителя и конструкцию ходовой системы ПТМ.

По полученным результатам осуществляется определение основных характеристик ВСРМ и ПТМ в частности: мощности двигателя, коэффициента грузоподъемности, времени погрузочно-разгрузочных работ технологического оборудования и т. д. Полученные параметры позволят подобрать комплекс машин для сортиментной заготовки древесины, обладающий лучшей производительностью.

Разработанная модель определения мощности ПТМ и алгоритм позволяет выполнить инженерные расчеты и определить влияние масса заготавливаемого сортамента, с учетом общей масса ПТМ и компенсации потери мощности на показатели двигателя, а выведенные формулы по определению необходимой мощности двигателя, а также формулы учета сопротивления движению машины зависящие от количества проходов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Новизна данного научного результата заключается в установлении аналитической связи между значением необходимой грузоподъемности ПТМ и значениями максимальной мощности двигателя ПТМ, а также коэффициента эффективности работы ее погрузочно-разгрузочного оборудования.

Список литературы

- [1] Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2017, no. 38(2), pp. 231–241.
- [2] Шегельман И.Р., Васильев А.С. Системный анализ объектов технологий и техники для лесосечных работ с целью синтеза новых патентоспособных решений // *Инженерный вестник Дона*, 2019. № 1 (52). С. 99.
- [3] Дербин В.М., Дербин М.В. Сортиментная заготовка древесины при выборочных рубках // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2016. № 5 (353). С. 123–131.
- [4] Дербин В.М., Дербин М.В. Оценка сортиментной технологии заготовки древесины // *Системы. Методы. Технологии*, 2015. № 2 (26). С. 148–152.
- [5] Фам Н.Л., Валяжонков В.Д., Пушков Ю.Л. Вероятностно-статистическая оценка временных режимов совместной трелевки и транспортировки сортиментов тракторным колесным сортиментоподборщиком // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. № 226. С. 66–81.
- [6] Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // *Приоритетные*

- направления инновационной деятельности в промышленности: Труды IV Междунар. науч. конф., Казань, 29–30 июня 2020 г. Казань: Конверт, 2020. С. 138–140.
- [7] Григорьев И.В., Петров М.Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надежности и энергоэффективности лесных машин // Вестник АГАТУ, 2021. № 3 (3). С. 73–81.
- [8] Благоданов А.А., Юркевич А.В. Повышение энергоэффективности транспортных машин при использовании механических бесступенчатых передач с регулируемыми силовыми функциями // Журнал автомобильных инженеров, 2017. № 2 (103). С. 18–21.
- [9] Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. К вопросу повышения энергоэффективности гидропривода машин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, 2013. № 5 (33). С. 22–25.
- [10] Падалкин Б.В., Иваненков В.В., Косицын Б.Б., Стадухин А.А., Балковский К.С. Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования // Известия МГТУ «МАМИ», 2020. № 2 (44). С. 58–68.
- [11] Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А., Хитров Е.Г. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, 2015. 119 с.
- [12] Клоков Д.В., Леонов Е.А., Турлай И.В. Модель работы форвардера с учетом надежности // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2015. № 2(175). С. 23–26.
- [13] Голякевич С.А., Горонковский А.Р., Мохов С.П. Методика оценки технических характеристик форвардеров на стадии проектирования // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2016. № 2(184). С. 15–19.
- [14] Божбов В.Е., Хитров Е.Г., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Обзор технических характеристик современных четырехосных колесных форвардеров // Леса России В XXI веке: Материалы XI Междунар. науч.-техн. интернет-конф., посвященной 85-летию Лесинженерного факультета СПбГЛТУ и 95-летию кафедры Сухопутного транспорта леса, Санкт-Петербург, 08–10 октября 2014 г. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2014. С. 17–20.
- [15] Капитонова Е.В., Кузнецов М.В., Баранова А.А. Сорбционная влажность древесины лиственных и хвойных пород // Современные технологии и научно-технический прогресс, 2023. № 10. С. 165–166.
- [16] Квитко К.С. Формирование партий груза древесины с учетом ее влажности // Инновационные технологии на автомобильном транспорте: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 16–18.
- [17] Иванников В.А., Квитко К.С. Оптимизация процесса перевозки леса автомобильным транспортом с учетом влажности перевозимой древесины // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Труды X Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Горохова. Курск: Изд-во Юго-Западного государственного университета, 2020. С. 58–60.
- [18] ГОСТ 2292–88 Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка. Дата введения 1991.01.01. М.: Стандартинформ, 2005. 10 с.
- [19] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 2(22). С. 69–75.
- [20] Proto A.R., Macri G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity // European J. of Forest Research, 2018, v. 137, no. 2, pp. 143–151.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
- [21] Дербин В.М., Дербин М.В., Каморин М.Ю., Малыгин В.И., Седаков Е.О. Подсортировка сортиментов при выполнении лесосечных работ // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 06–07 декабря 2016 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2017. С. 62–64.
- [22] Borz S.A., Rommel D., Ziesak M., Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology // Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry — Wood industry — Agricultural Food Engineering, 2019, no. 12(61)1, pp. 1–12.
DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.1>
- [23] Сивков Е.Н. Производительность форвардера как составляющая затрат энергии в системе машин харвестер — форвардер // Февральские чтения: Материалы науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2010 году, 15–18 февраля 2011 г., Сыктывкар / под ред. Е.В. Хохлова. Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского лесного института, 2011. С. 264–267.
- [24] Шашкин С.Ю. Использование пакета программ Maple для математического моделирования в экономике // Образование, инновации, исследования как ресурс развития сообщества: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 19 декабря 2017 г. Чебоксары: Среда, 2017. С. 121–127.
- [25] Базеева Н.А., Голечков Ю.И., Щенникова Е.В. О структуре пакета проблемно-ориентированных программ, используемых при математическом моделировании динамических систем транспорта // Вестник Мордовского университета, 2010. Т. 20. № 4. С. 114–117.
- [26] Семенова М.Н., Якушев И.А. Оценка результатов математического моделирования технических систем в пакете программ Matlab при помощи интерактивного обозревателя // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы XII Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 05 июня 2020 г. Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, 2020. С. 491–497.
- [27] Федотов Н.И. Применение компьютерного моделирования и получение навыков использования пакетов программ // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2006. № 110. С. 49–52.
- [28] Зыкина А.В., Запорожец Д.Н. Пакет прикладных программ для моделирования и решения процессов

- с использованием аппарата вариационных неравенств // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2015. Т. 11. № 2. С. 284–289.
- [29] Бычина Д.Р., Скоромнов В.М. Методология математического моделирования физических процессов с использованием пакетов прикладных программ // Студенческая наука Подмосквю: Материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых, Орехово-Зуево, 13 апреля 2022 г. Орехово-Зуево: Изд-во Государственного гуманитарно-технологического университета, 2022. С. 128–131.
- [30] Беззубцева М.М., Волков В.С. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем АПК // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. № 6–2. С. 191–195.
- [31] Исламова Г.Г. Применение различных пакетов программ при решении задач по моделированию // Повышение эффективности и устойчивости развития агропромышленного комплекса: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (в рамках XV Междунар. специализ. выставки «АгроКомплекс — 2005»), Уфа, 01–03 марта 2005 г. Уфа: Изд-во Башкирского государственного аграрного университета, 2005. С. 258–259.
- [32] Афанасьева И.А., Жураковский В.Н. Моделирование трехмерных объектов в движении в пакете прикладных программ Matlab // Наука без границ, 2018. № 4 (21). С. 80–84.
- [33] Ringdahl O., Hellström T., Lindroos O. Potentials of Possible Machine Systems for Directly Loading Logs in Cut-to-Length Harvesting // Canadian J. of Forest Research, 2012, v. 42, no. 5, pp. 970–985. DOI: <https://doi.org/10.1139/x2012-036>
- [34] Вербицкая Н.О., Чеботин Р.С., Корж М.А. Влияние харвестерных лесозаготовок на повреждение почвенного покрова // Леса России и хозяйство в них, 2018. № 2(65). С. 42–50.
- [35] Прядкин В.И., Бартенев И.М. Эколого-экономическая оценка применения сортиментной технологии заготовки древесины на рубках ухода // Лесотехнический журнал, 2018. Т. 8. № 4 (32). С. 250–259.
- [36] Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В., Кашников Г.В. Меры нефинансовой поддержки предприятий лесного комплекса по переходу на инновационные технологии // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 3(55). С. 141–145.
- [37] Алябьев А.Ф., Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Котов А.А. Определение коэффициента ускорения испытаний на надежность несущих систем лесозаготовительных машин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2023. № 194. С. 1–11.

Сведения об авторе

Клубничкин Евгений Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры транспортно-технологических средств и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), kclubnichkin@mgtu.ac.ru

Поступила в редакцию 05.02.2024.

Одобрено после рецензирования 17.05.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

INCREASING ENERGY EFFICIENCY METHOD FOR CUT-TO-LENGTH HAUL-LOAD-DUMP MACHINES

E.E. Klubnichkin

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

klubnichkin@mgul.ac.ru

The results of theoretical substantiation of the method of increasing energy efficiency and environmental safety of haul-load-dump machines used in cut-to-length harvesting are presented. It is established that, based on the principles of equality of load flow of haul-load-dump machines, productivity of feller-buncher and bucking machines, the value of engine power of haul-load-dump machines is obtained, which will allow to determine the shape of the created machine depending on the resistance to movement and the path that passes the feller-delimber-buncher machine depending on the density of the stand. It is shown that the principle of this model is that the productivity of felling, hauling and dumping works is equal to the productivity of loading and transporting works, i.e. felling, hauling and dumping machines and feller-buncher and bucking machines are not idle. The proposed method of calculation will allow to determine the type of mover and the design of the running system of haul-load-dump machines at the stage of design development. It is found that the proposed model does not address economic issues as other researchers in the field. Integral models at the formula level are used.

Keywords: haul-load-dump machine, engine power, energy efficiency, environmental safety, modeling, cut-to-length technology of wood harvesting

Suggested citation: Klubnichkin E.E. *Metod povysheniya energoeffektivnosti pogruzochno-transportnykh mashin dlya sortimentnoy zagotovki drevesiny* [Increasing energy efficiency method for cut-to-length haul-load-dump machines]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 112–125.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125

References

- [1] Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2017, no. 38(2), pp. 231–241.
- [2] Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. *Sistemnyy analiz ob'ektov tekhnologii i tekhniki dlya lesoshechnykh rabot s tsel'yu sinteza novykh patentosposobnykh resheniy* [Systems analysis of objects of technologies and equipment for logging operations in order to synthesize new patentable solutions]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, no. 1 (52), p. 99.
- [3] Derbin V.M., Derbin M.V. *Sortimentnaya zagotovka drevesiny pri vyborochnykh rubkakh* [Assortment harvesting of timber during selective logging]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2016, no. 5 (353), pp. 123–131.
- [4] Derbin V.M., Derbin M.V. *Otsenka sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny* [Assessment of assortment technology for timber harvesting]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 2 (26), pp. 148–152.
- [5] Fam N.L., Valyazhonkov V.D., Pushkov Yu.L. *Veroyatnostno-statisticheskaya otsenka vremennykh rezhimov sovmestnoy trelevki i transportirovki sortimentov traktornym kolesnym sortimentopodborschchikom* [Probabilistic-statistical assessment of time modes of joint skidding and transportation of timber assortments by a tractor wheeled timber picker]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2019, no. 226, pp. 66–81.
- [6] Manukovskiy A. Yu., Zorin M.V., Prosuzhikh A. A., Kunitskaya O. A., Grigor'ev I. V. *Sovremennye podkhody k povysheniyu energoeffektivnosti i ekonomichnosti lesnykh mashin* [Modern approaches to improving the energy efficiency and cost-effectiveness of forestry machines]. *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Priority areas of innovation activity in industry: collection of papers of the IV international scientific conference], Kazan, June 29–30, 2020. Kazan: Konvert, 2020, pp. 138–140.
- [7] Grigor'ev I.V., Petrov M.E. *Dopolnitel'nye tekhnicheskie optsi dlya povysheniya bezopasnosti, nadezhnosti i energoeffektivnosti lesnykh mashin* [Additional technical options to improve the safety, reliability and energy efficiency of forestry machines]. *Vestnik AGATU* [Bulletin of AGATU], 2021, no. 3 (3), pp. 73–81.
- [8] Blagonravov A.A., Yurkevich A.V. *Povyshenie energoeffektivnosti transportnykh mashin pri ispol'zovanii mekhanicheskikh besstupenchatykh peredach s reguliruemymi silovymi funktsiyami* [Improving the energy efficiency of transport vehicles using mechanical continuously variable transmissions with adjustable power functions]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [J. of Automotive Engineers], 2017, no. 2 (103), pp. 18–21.
- [9] Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. *K voprosu povysheniya energoeffektivnosti gidroprivoda mashin* [On the issue of improving the energy efficiency of machine hydraulic drives]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy], 2013, no. 5 (33), pp. 22–25.
- [10] Padalkin B.V., Ivanenkov V.V., Kositsyn B.B., Stadukhin A.A., Balkovskiy K.S. *Metod otsenki effektivnosti primeneniya elektromekhanicheskikh transmissiy transportnykh sredstv na etape proektirovaniya* [Method for assessing

- the efficiency of using electromechanical transmissions of vehicles at the design stage]. *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Bulletin of MGTU «MAMI»], 2020, no. 2 (44), pp. 58–68.
- [11] Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A., Khitrov E.G. *Povyshenie effektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya reysovoy nagruzki forvarderov* [Increasing the efficiency of the skidding process by substantiating the voyage load of forwarders]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova [St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov], 2015, 119 p.
- [12] Klokov D.V., Leonov E.A., Turlay I.V. *Model' raboty forvardera s uchetom nadezhnosti* [Forwarder operation model taking into account reliability]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. no. 2. Forestry and woodworking industry], 2015, no. 2 (175), pp. 23–26.
- [13] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R., Mokhov S.P. *Metodika otsenki tekhnicheskikh kharakteristik forvarderov na stadii proektirovaniya* [Methodology for assessing the technical characteristics of forwarders at the design stage]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. no. 2. Forestry and woodworking industry], 2016, no. 2 (184), pp. 15–19.
- [14] Bozhbov V.E., Khitrov E.G., Dmitrieva I.N., Grigor'ev G.V. *Obzor tekhnicheskikh kharakteristik sovremennykh chetyrekhosnykh kolesnykh forvarderov* [Review of technical characteristics of modern four-axle wheeled forwarders]. *Les Rossii V XXI veke: mater. XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Lesoinzhenernogo fakul'teta SPbGLTU i 95-letiyu kafedry Sukhoputnogo transporta lesa* [Forests of Russia in the 21st century: Proc. of the XI international scientific and technical Internet conference dedicated to the 85th anniversary of the Forest Engineering Faculty of SPbGLTU and the 95th anniversary of the Department of Land Forest Transport], St. Petersburg, October 8–10, 2014. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov, 2014, pp. 17–20.
- [15] Kapitonova E.V., Kuznetsov M.V., Baranova A.A. *Sorbtsionnaya vlazhnost' drevesiny listvennykh i khvoynnykh porod* [Sorptions moisture content of deciduous and coniferous wood]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2023, no. 10, pp. 165–166.
- [16] Kvitko K.S. *Formirovaniye partiy gruza drevesiny s uchetom ee vlazhnosti* [Formation of timber cargo batches taking into account its moisture content]. *Innovatsionnyye tekhnologii na avtomobil'nom transporte: mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative technologies in automobile transport: Proc. of the All-Russian scientific and technical conference]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova [Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov], 2021, pp. 16–18.
- [17] Ivannikov V.A., Kvitko K.S. *Optimizatsiya protsessa perevozki lesa avtomobil'nyim transportom s uchetom vlazhnosti perevozimoy drevesiny* [Optimization of the timber transportation process by automobile transport taking into account the moisture content of the transported wood]. *Perspektivnoye razvitiye nauki, tekhniki i tekhnologii: Trudy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Pod red. A.A. Gorokhov. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet* [Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet], 2020, pp. 58–60.
- [18] GOST 2292–88 *Lesomaterialy kruglye. Markirovka, sortirovka, transportirovaniye, metody izmereniya i priemka* [GOST 2292–88 Round timber. Marking, sorting, transportation, measurement methods and acceptance], date of introduction 1991.01.01. Moscow: Standartinform, 2005, 10 p.
- [19] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [Harvester operation technology for selective felling]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering J.], 2016, v. 6, no. 2(22), pp. 69–75.
- [20] Proto A.R., Macri G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European J. of Forest Research*, 2018, v. 137, no. 2, pp. 143–151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
- [21] Derbin V.M., Derbin M.V., Kamorin M.Yu., Malygin V.I., Sedakov E.O. *Podsortirovka sortimentov pri vypolnenii lesosechnykh rabot* [Sorting of assortments during logging operations]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of forestry complex development: Proc. of the International Scientific and Technical Conference], Vologda, December 6–7, 2016. Vologda: Vologda State University, 2017, pp. 62–64.
- [22] Borz S.A., Rommel D., Ziesak M., Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry–Wood industry–Agricultural Food Engineering*, 2019, no. 12(61)1, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwi.2019.12.61.1.1>
- [23] Sivkov E.N. *Proizvoditel'nost' forvardera kak sostavlyayushchaya zatrat energii v sisteme mashin kharvester — forvarder* [Forwarder productivity as a component of energy costs in the harvester — forwarder machine system]. *Fevral'skie chteniya: mater. Nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava Syktyvkarского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2010 году* [February readings: materials. Scientific and practical conference of the faculty of the Syktyvkar Forestry Institute based on the results of research work in 2010]. Ed. by E.V. Khokhlova, Syktyvkar, February 15–18, 2011. Syktyvkar: [Syktyvkar Forestry Institute], 2011, pp. 264–267.
- [24] Shashkin S.Yu. *Ispol'zovaniye paketa programm maple dlya matematicheskogo modelirovaniya v ekonomike* [Using the maple software package for mathematical modeling in economics]. *Obrazovaniye, innovatsii, issledovaniya kak resurs razvitiya soobshchestva: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Education, innovation, research as a resource for community development: materials of the International scientific and practical conference], Cheboksary, December 19, 2017. Cheboksary: Sreda Publishing House, 2017, pp. 121–127.
- [25] Bazeeva N.A., Golechkov Yu.I., Shchennikova E.V. *O strukture paketa problemno-orientirovannykh programm, ispol'zuemykh pri matematicheskom modelirovanii dinamicheskikh sistem transporta* [On the structure of the package of problem-oriented programs used in mathematical modeling of dynamic transport systems]. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of the Mordovian University], 2010, v. 20, no. 4, pp. 114–117.
- [26] Semenova M.N., Yakushev I.A. *Otsenka rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem v pakete programm Matlab pri pomoshchi interaktivnogo obozrevatelya* [Evaluation of the results of mathematical modeling of

- technical systems in the Matlab software package using an interactive browser]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: mater. XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Information technologies in electrical engineering and electric power engineering: materials. XII All-Russian scientific and technical conference], Cheboksary, June 5, 2020. Cheboksary: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 2020, pp. 491–497.
- [27] Fedotov N.I. *Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya i poluchenie navykov ispol'zovaniya paketov programm* [Application of computer modeling and acquisition of skills in using software packages]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2006, no. 110, pp. 49–52.
- [28] Zykina A.V., Zaporozhets D.N. *Paket prikladnykh programm dlya modelirovaniya i resheniya protsessov s ispol'zovaniem apparata variatsionnykh neravenstv* [Package of applied programs for modeling and solving processes using the apparatus of variational inequalities]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education], 2015, v. 11, no. 2, pp. 284–289.
- [29] Bychina D.R., Skoromnov V.M. *Metodologiya matematicheskogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov s ispol'zovaniem paketov prikladnykh programm* [Methodology of mathematical modeling of physical processes using application packages]. *Studencheskaya nauka Podmoskov'yu: mater. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Student science in the Moscow region: materials of the International scientific conference of young scientists], Orekhovo-Zuyevo, April 13, 2022. Orekhovo-Zuyevo: State Humanitarian and Technological University, 2022, pp. 128–131.
- [30] Bezzubtseva M.M., Volkov V.S. *Analiticheskiy obzor paketov prikladnykh programm dlya modelirovaniya energeticheskikh protsessov potrebitel'skikh energosistem APK* [Analytical review of application software packages for modeling energy processes of consumer energy systems of the agro-industrial complex]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International J. of Applied and Fundamental Research], 2015, no. 6–2, pp. 191–195.
- [31] Islamova G.G. *Primenenie razlichnykh paketov programm pri reshenii zadach po modelirovaniyu* [Application of various software packages in solving modeling problems]. *Povyshenie effektivnosti i ustoychivosti razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (v ramkakh XV Mezhdunarodnoy spetsializirovannoy vystavki «AgroKompleks – 2005»)* [Improving the efficiency and sustainability of development of the agro-industrial complex: Proc. of the All-Russian scientific and practical conference (within the framework of the XV International specialized exhibition «AgroComplex – 2005»)], Ufa, March 1–3, 2005. Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2005, pp. 258–259.
- [32] Afanas'eva I.A., Zhurakovskiy V.N. *Modelirovanie trekhmernykh ob'ektov v dvizhenii v pakete prikladnykh programm Matlab* [Modeling of three-dimensional objects in motion in the Matlab software package]. *Nauka bez granits* [Science without Borders], 2018, no. 4 (21), pp. 80–84.
- [33] Ringdahl O., Hellström T., Lindroos O. Potentials of Possible Machine Systems for Directly Loading Logs in Cut-to-Length Harvesting. *Canadian J. of Forest Research*, 2012, v. 42, no. 5, pp. 970–985. DOI: <https://doi.org/10.1139/x2012-036>
- [34] Verbitskaya N.O., Chekotin R. S., Korzh M.A. *Vliyanie kharvesternykh lesozagotovok na povrezhdenie pochvennogo pokrova* [The impact of harvester logging on soil cover damage]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2018, no. 2 (65), pp. 42–50.
- [35] Pryadkin V.I., Bartenev I.M. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka primeneniya sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny na rubkakh ukhoda* [Ecological and economic assessment of the use of assortment technology for timber harvesting in thinnings]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering J.], 2018, v. 8, no. 4 (32), pp. 250–259.
- [36] Mekhrentsev A.V., Urazova A.F., Efimov Yu.V., Kashnikov G.V. *Mery nefinansovoy podderzhki predpriyatiy lesnogo kompleksa po perekhodu na innovatsionnye tekhnologii* [Non-financial support measures for forestry enterprises in transition to innovative technologies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2022, no. 3(55), pp. 141–145.
- [37] Alyab'ev A.F., Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kotov A.A. *Opreделение koeffitsienta uskoreniya ispytaniy na nadezhnost' nesushchikh sistem lesozagotovitel'nykh mashin* [Determination of the acceleration coefficient for reliability tests of supporting systems of logging machines]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2023, no. 194, pp. 1–11.

Author's information

Klubnichkin Yevgeniy Yevgen'yevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, BMSTU (Mytishchi branch), klubnichkin@mgul.ac.ru

Received 05.02.2024.

Approved after review 17.05.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.