

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ КОМПЛЕКСОМ МАШИН «ХАРВЕСТЕР + ФОРВАРДЕР»

С.А. Голякевич

Белорусский государственный технологический университет (БГТУ), Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а

gsa@belstu.by

Изложено математическое описание аналитической модели взаимодействия многооперационных лесозаготовительных машин при реализации ими типовых технологических процессов заготовки древесины. Дана оценка доступности деревьев для харвестера с одной технологической стоянки с учетом размеров рабочей зоны манипулятора, наличия или отсутствия технологических коридоров, координат мест раскряжевки и др. Приведены материалы исследований по трем типовым вариантам расположения лесоматериалов после работы харвестера: 1) вдоль технологического коридора; 2) поперек коридора с оставлением порубочных остатков на нем; 3) поперек коридора и расположением порубочных остатков рядом с ним. Определен характер взаимосвязи технологического процесса работы харвестера и формирования будущих условий работы форвардера. Отмечена важность учета концентрации лесоматериалов на лесосеке, количества групп их сортировки, размеров, удаленности и направления их укладки относительно технологического коридора.

Ключевые слова: харвестер, форвардер, операция, методика, эффективность, комплекс машин, технология, эксплуатация, условия, сортировка, погрузка, валка, раскряжевка

Ссылка для цитирования: Голякевич С. А. Математическая модель технологических процессов заготовки древесного сырья комплексом машин «харвестер + форвардер» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 113–126. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-113-126

Создание машин, обеспечивающих заданный уровень эксплуатационной эффективности в целевых природно-производственных условиях на стадии проектирования, требует первичной оценки их эксплуатационных потребительских качеств. Наиболее доступный способ такой оценки — использование данных эксплуатации современных машин с близкими параметрами. Однако такой подход не позволяет дать оценку не только принципиально новым машинам, но и ныне функционирующим при существенном изменении их технических параметров.

Выбор параметров машин можно проводить на основе отдельного или совместного анализов их эксплуатационных характеристик: маневренности, устойчивости, опорной и профильной проходимости и т. д. Выявление совокупности наиболее значимых из них, определяется конструкцией и назначением конкретной машины, условиями и технологией ее применения. Связь технических параметров машин и их эксплуатационных характеристик с такими

эксплуатационными потребительскими качествами, как производительность, экономичность, надежность и другими устанавливается только с помощью комплексного математического моделирования работы машин в целевых условиях и по заданным технологиям.

Значительное влияние на эффективность отдельных машин и их комплексов оказывают природно-производственные условия эксплуатации. При этом условия эксплуатации второй машины и последующих машин комплекса во многом формируются предыдущими и очень зависят от реализуемого ими технологического процесса. При реализации такой модели важно, чтобы анализ машины проводился не по каждой из них в отдельности, а как по единому комплексу, учитывая совместное влияние на эффективность технологического процесса. Такой анализ следует выполнять либо для всего потенциального диапазона условий, либо, что более рационально, для предварительно обоснованных типовых условий. В этом случае обособленные данные о рельефе местности [1], грунтовых особенностях [2–5] и таксационных характеристиках древостоев [6–9] должны рассматриваться с учетом их вариативности и вза-

имосвязи с последующим выделением типовых эксплуатационных групп [10].

Имитационное моделирование и компьютерная симуляция технологических процессов работы харвестеров и форвардеров [11–15] и разработка программных средств для их реализации выполнялись учеными и ранее [16]. Однако они рассматривали работу машин по отдельности без взаимовлияния, и, как правило, по определенному технологическому процессу. Вопросы взаимосвязи машин в едином комплексе и разнообразие реализуемых ими технологий не рассматривались.

Предварительные исследования показывают, что модели, учитывающие совместную работу машин в заданном диапазоне типовых условий, варианты технологических процессов, способов, приемов и режимов выполнения операций с установлением показателей эксплуатационно-потребительских качеств и с учетом ограниченности реализации эксплуатационных свойств машин, до настоящего времени ни в отечественных, ни в зарубежных источниках не предлагались.

Цель работы

Цель работы — создание комплексной математической модели «условия работы — технология — комплекс многооперационных лесозаготовительных машин».

Материалы и методы

В рамках данной статьи предлагается часть комплексной модели, которая математически описывает технологические процессы совместного применения харвестеров и форвардеров и устанавливает влияние совершаемых ими операций на продолжительность и совокупные энергозатраты всего технологического процесса получения древесного сырья.

Моделирование технологического цикла харвестера. На практике форма лесосек весьма разнообразна, однако для целей оценки эффективности эксплуатации лесозаготовительных комплексов в типовых условиях достаточно сравнения работы машин на лесосеках с идеализированными границами. Геометрические параметры лесосек:

- длина $a_{\text{л}}$ и ширина $b_{\text{л}}$ лесосеки, м;
- расстояние $l_{\text{под}}$ от места въезда на лесосеку до погрузочного пункта, находящегося вне лесосеки, м;
- коэффициент $k_{\text{сх}}$, равный отношению длины между въездом на лесосеку и ближайшей из ее боковых границ к общей протяженности границы со стороны въезда на лесосеку.

При разработке лесосеки от ее длинного края $a_{\text{л}}$ количество пазов на ней $n_{\text{пас}}$ определяется выражением

$$n_{\text{пас}} = \frac{a_{\text{л}}}{2l_{\text{раб}}^{\text{X}}},$$

где $l_{\text{раб}}^{\text{X}}$ — длина рабочего вылета манипулятора харвестера, м.

Рабочий вылет манипулятора $l_{\text{раб}}^{\text{X}}$ определяется его кинематическим вылетом, ограниченными эксплуатационными качествами: грузоподъемностью, допускаемой нагруженностью конструкции, устойчивостью харвестера против опрокидывания, возможностью подтягивания ствола с заданного вылета, а также энергетическими возможностями харвестера и др.

В работах [17–19] приближено определяется лишь средний вылет манипулятора (без учета вариантов реализуемого технологического процесса) и с его помощью устанавливаются показатели производительности харвестера. В работах [21, 21] сделана попытка определения координат «центров тяжести» полупазов. Расстояние до него принято за основу расчета времени наведения манипулятора и далее применяется для расчета производительности харвестера по уже известным методикам. В этих подходах для оценки временных затрат на наведение рабочего органа машины на дерево используются параметры среднего рабочего вылета манипулятора и движения от него до края полупазов. Полученные при этом данные о производительности и энергозатратах харвестеров слабо коррелируют с реальными результатами, достигнутыми при реализации реальных технологических процессов.

В 2021–2023 гг. под руководством автора были собраны данные об условиях эксплуатации и производительности работы харвестеров и форвардеров в большинстве лесохозяйственных учреждений страны. На основе их анализа для каждой модели машин, эксплуатируемых на предприятиях Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, были выявлены операторы с наилучшей производительностью. Анализ их работы позволил установить, что они в целом используют схожую схему перемещения рабочего органа манипулятором на каждой технологической стоянке: от транспортного положения — к первому дереву, находящемуся в зоне будущего места раскряжевки, после спиливания дерева вместе с ним — к месту обрезки сучьев и раскряжевки, а после выполнения данных операций — к следующему, ближайшему дереву и так далее для одной полупазовки. Затем рабочий орган машины перемещается к ближайшему дереву другой полупазовки и цикл

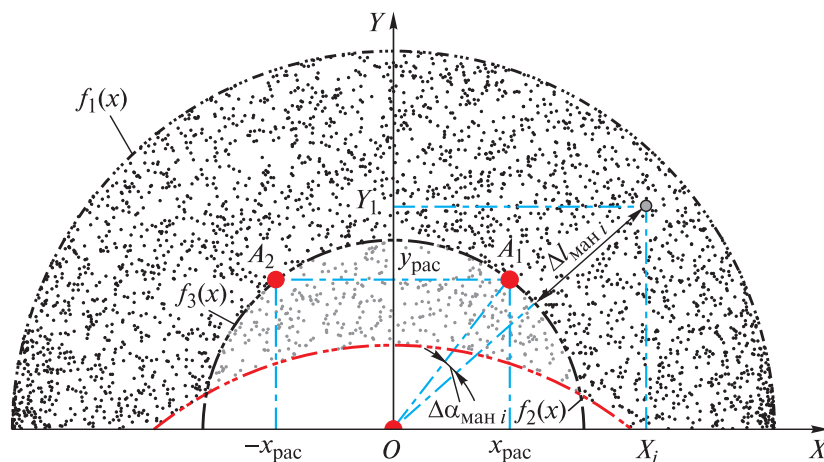


Рис. 1. Схема участка лесосеки, обрабатываемого харвестером с одной технологической стоянки
Fig. 1. Diagram of a logging site processed by a harvester from one technological stop

повторяется. Это означает, что манипулятор совершает циклические рабочие и холостые перемещения рабочего органа машины от пней деревьев к местам раскряжевки и обратно, т. е. от периферии к месту раскряжевки. Учет данных технологических особенностей в предлагаемой аналитической модели является отличием этой модели от ранее предлагаемых.

Перемещение харвестера по лесосекам может происходить как по уже сформированным технологическим коридорам, так и при их непосредственном прорубании в процессе работы. Для обоих случаев в модели приняты следующие допущения:

- траектории передвижения харвестера криволинейны, но равноудалены от криволинейных границ соседних пазек;

- по окончании разработки каждой пазеки харвестер перемещается на следующую путем переезда по кратчайшей возможной траектории без возвращения по пройденному пути.

Минимальный общий путь $l_{дв}^X$, проходимый харвестером для освоения всей лесосеки, определяется выражением

$$l_{дв}^X = \frac{a_{л}}{2l_{раб}^X} (b_{л} - 2l_{раб}^X) + a_{л};$$

общее количество технологических стоянок $n_{т.с}^X$ — выражением

$$n_{т.с}^X = \frac{l_{дв}^X}{l_{пер}^X},$$

где $l_{пер}^X$ — расстояние между технологическими стоянками харвестера.

Участки лесосеки, обрабатываемые харвестером на каждой технологической стоянке (рис. 1) математически ограничиваются осью абсцисс, функцией рабочего вылета манипулятора $f_1(x)$ и функцией, ограничивающей участок, который разработан харвестером с предыдущей технологической стоянки $f_2(x)$. Данные функции описываются выражениями:

$$f_1(x) = \sqrt{(l_{раб}^X)^2 - x^2};$$

$$f_2(x) = \sqrt{(l_{раб}^X)^2 - x^2} - l_{пер}^X,$$

где x — координата по оси OX положения точки подвеса рабочего органа манипулятора в системе координат OXY (см. рис. 1) и начале координат O , находящимся на вертикальной оси поворота манипулятора, м.

Однако эти функции не учитывают ограничений рабочей зоны харвестера по условию его устойчивости. Для учета устойчивости харвестера и более точного описания границ рабочей зоны можно воспользоваться математической моделью работы многооперационной лесозаготовительной машины, разработанной автором, либо результатами оценки устойчивости харвестеров из других работ, к примеру, из работы [22].

Варианты технологических процессов, в которых операторы проводят заготовку деревьев «позади» оси абсцисс, не рассматриваются в связи с имеющимися материалами исследований о пониженной производительности таких технологий и о повышении утомляемости операторов при реализации работ машинами с бесповоротными кабинами [23].

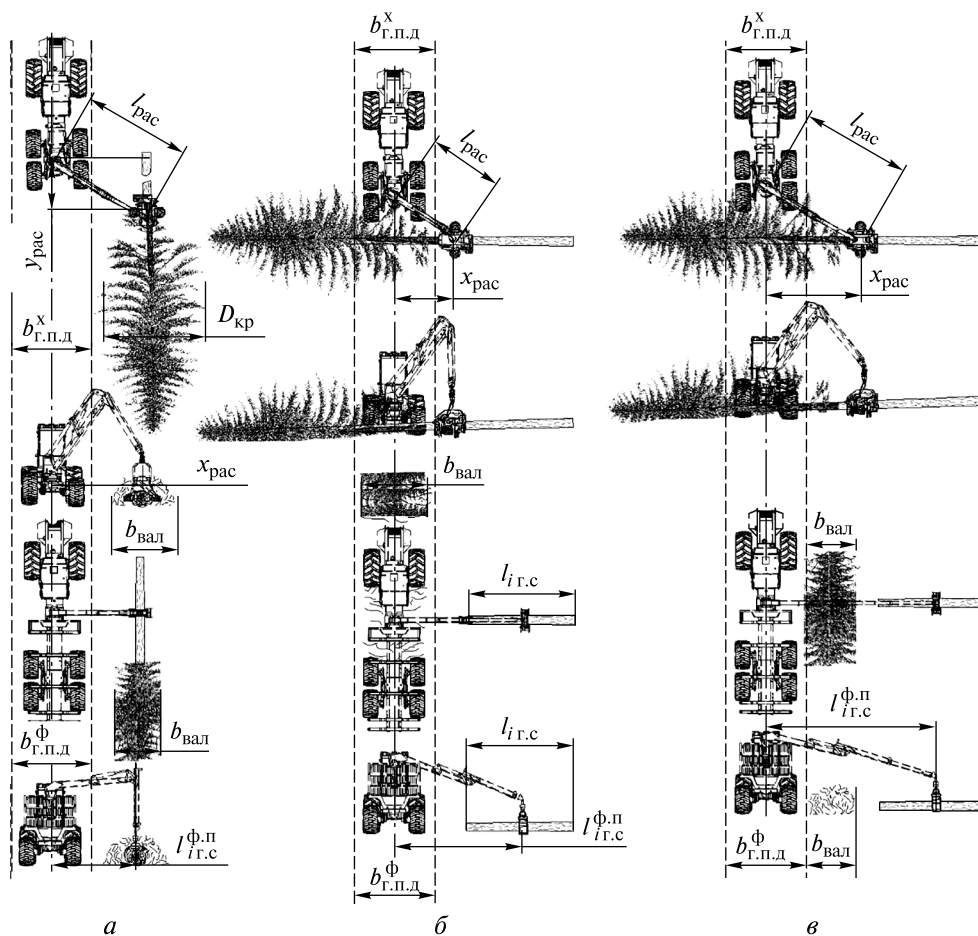


Рис. 2. Типовые схемы размещения лесоматериалов и порубочных остатков на лесосеке относительно мест технологических стоянок харвестера и форвардера: *а* — валка деревьев вдоль волока с образованием куч порубочных остатков; *б* — валка деревьев поперек волока с оставлением порубочных остатков на волоке; *в* — валка деревьев поперек волока с образованием валов порубочных остатков вдоль волока

Fig. 2. Typical layouts for timber and logging residue placement in a logging area relative to harvester and forwarder stops: *a* — felling trees along a skidding track, creating piles of logging residue; *б* — felling trees across a skidding track, leaving logging residue on the skidding track; *в* — felling trees across a skidding track, creating piles of logging residue along the skidding track

В исследованиях отечественных и зарубежных ученых вопросы определения площадей участков, разрабатываемых манипуляторными лесозаготовительными машинами с одной технологической стоянки, рассматривались неоднократно [17–22]. Однако комплексное аналитическое моделирование таких процессов ранее не проводилось.

Площадь $S_{обр}$, которая разрабатывается харвестером с одной технологической стоянки, определяется выражением

$$S_{обр} = \int_{-l_{раб}}^{l_{раб}} f_1(x) - f_2(x) dx - \int_{-\frac{b_{кор}}{2}}^{\frac{b_{кор}}{2}} f_1(x) - f_2(x) dx,$$

где $b_{кор}$ — ширина ранее проложенного технологического коридора при его наличии, м.

Координаты положения мест обрезки сучьев и раскряжевки стволов на круглые лесоматериалы определяются точками A_1 и A_2 пересечения функции $f_3(x)$ вылета манипулятора

$$f_3(x) = \sqrt{l_{рас}^2 - x^2},$$

на котором выполняется раскряжевка с функциями боковых границ, а за ними осуществляется пакетирование сортиментов справа и слева от продольной оси соответственно

$$x = x_{рас}; \quad x = -x_{рас},$$

где $l_{рас}$ — вылет манипулятора, на котором проводится раскряжевка, м;

$x_{рас}$ — координата x продольной границы, за которой осуществляется пакетирование лесоматериалов, м.

В ходе исследований для природно-производственных условий и реализуемых технологических процессов было выделено три типовых варианта размещения продольных границ $x_{рас}$ (см. рис. 1). В первом случае (рис. 2, а) валка деревьев осуществляется вдоль продольной оси движения харвестера, что целесообразно в зимнее время или при работе в низкополнотных древостоях. При таком технологическом процессе лесоматериалы и порубочные остатки располагаются вдоль технологического коридора справа и слева от харвестера на минимальном расстоянии $x_{рас}$, м

$$x_{рас} = \begin{cases} \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \geq \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2} \\ \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} < \frac{b_{г.п.д}^X + D_{кр}}{2} \end{cases},$$

где $b_{г.п.д}^{\Phi}$ — габаритная полоса движения форвардера на заданном участке, связанная с его габаритной шириной $b_{ф}$ (м) зависимостями, изложенными в работе [23], м;
 $b_{г.п.д}^X$ — габаритная полоса движения харвестера на заданном участке, м;
 $D_{кр}$ — диаметр кроны обрабатываемых деревьев, м.

Типовая схема размещения круглых лесоматериалов и порубочных остатков на лесосеке, представленная на рис. 2, б, должна использоваться при необходимости укрепления волока порубочными остатками на грунтах с низкой несущей способностью. При этом валка дерева осуществляется перпендикулярно продольной оси волока, порубочные остатки, получаемые при обрезке сучьев, размещаются на технологическом коридоре, а круглые лесоматериалы — слева и справа от него. В этом случае имеем формулу

$$x_{рас} = \begin{cases} \frac{b_{г.п.д}^X}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^X}{2} \geq \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \\ \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2}, & \text{если } \frac{b_{г.п.д}^X}{2} < \frac{b_{г.п.д}^{\Phi}}{2} \end{cases}.$$

При необходимости сохранения порубочных остатков для последующего сбора и переработки, целесообразно формировать из них валы по сторонам технологического коридора (см. рис. 2, в). При этом граница $x_{рас}$ определяется зависимостью

$$x_{рас} = \frac{b_{г.п.д}^X}{2} + b_{вал} + l_{х.г},$$

где $l_{х.г}$ — габаритная длина харвестерной головки, м;

$b_{вал}$ — допускаемая ширина вала порубочных остатков, м.

Координата $y_{рас}$ положения места раскряжевки вдоль оси OY определяется выражением

$$y_{рас} = \sqrt{l_{рас}^2 - x_{рас}^2}.$$

Для последующей оценки временных и энергетических затрат на работу харвестера участки лесосек, обрабатываемые харвестером с одной технологической стоянки, важно подразделить на отдельные зоны, в которых харвестер совершает однотипные действия. Так, деревья, растущие на левой полупасеке после валки, перемещаются в точку раскряжевки A_2 (см. рис. 1), а деревья с правой полупасеки — в точку раскряжевки A_1 .

Сам процесс валки следует осуществлять таким образом, чтобы центр давления кроны упавшего дерева находился близко к горизонтальной или вертикальной осям, проходящим через точки A_2 или A_1 соответственно, в зависимости от принятой типовой схемы размещения круглых лесоматериалов (см. рис. 2). Такой подход обеспечит необходимую их ориентацию после обрезки сучьев и уменьшит необходимое количество корректирующих движений манипулятора.

Деревья, находящиеся за границей функции уровня раскряжевки $f_3(x)$, перемещаются в точки раскряжевки A_1 и A_2 путем уменьшения вылета манипулятора, а деревья, находящиеся до границы $f_3(x)$, — путем его увеличения.

Величина $\Delta l_{ман i}$, на которую должен быть сокращен или увеличен вылет манипулятора после валки i -го дерева, определяется выражением

$$\Delta l_{ман i} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - l_{рас},$$

где X_i и Y_i — координаты положения i -го дерева относительно оси поворота манипулятора, м.

В обоих случаях с подтаскиванием деревьев последовательно или параллельно осуществляется поворот манипулятора в направлении места раскряжевки на требуемый угол $\Delta\alpha_{ман i}$

$$\Delta\alpha_{ман i} = \arctg\left(\frac{y_{рас}}{x_{рас}}\right).$$

Расположение деревьев на отдельных лесосеках весьма разнообразно. Так, могут наблюдаться локальные сгущения деревьев, куртины и прогалины. Однако ученые лесоводы [24] сходятся во мнении, что при больших объемах выборки лесосек, вне зависимости от способа лесовосстановления (искусственного или естественного), уже к 20-летнему возрасту распределение деревьев по площади близко к равномерному. При этом количество стволов деревьев $n_{\text{ств}}$ на 1 га площади и на всей лесосеке $n_{\text{ств}}^{\text{л}}$ до и после прохода харвестера определяется соответственно

$$n_{\text{ств}} = \frac{S_{\text{сеч}}(1-i_{\text{руб}})}{\left(\frac{\pi d_{1,3}^2}{4}\right)}; \quad n_{\text{ств}}^{\text{л}} = \frac{S_{\text{сеч}}(1-i_{\text{руб}})a_{\text{л}}b_{\text{л}}}{k\left(\frac{\pi d_{1,3}^2}{4}\right)},$$

где $i_{\text{руб}}$ — интенсивность проводимой рубки, до проведения рубки харвестером $i_{\text{руб}} = 0$;
 $S_{\text{сеч}}$ — сумма площадей сечений на 1 га при полноте равной 1, м² [10];
 k — коэффициент перевода размерности площади, $k = 10\,000$ м²/га.

Для моделирования координат X_i и Y_i расположения каждого i -го дерева (см. рис. 1) рационально применять два основных подхода.

1. Для технологических процессов рубок прочистки в искусственно посаженном лесу.

Деревья в нем располагаются рядами с шириной междурядья $b_{\text{мр}}$ и средним расстоянием между деревьями в ряду $l_{\text{дер}}$

$$l_{\text{дер}} = \frac{k}{n_{\text{ств}} b_{\text{мр}}}.$$

2. Для иных видов рубок ухода и главного пользования. Подход основывается на случайном равномерном распределении координат деревьев по площади лесосеки с последующим их приведением к месту одной технологической стоянки харвестера с началом координат в точке O (см. рис. 1).

Вне зависимости от используемого подхода каждая пара координат X_i и Y_i определяет положение i -го дерева относительно точки O , расположенной на вертикальной оси поворота манипулятора.

Для описания таксационных характеристик деревьев использовались данные справочных таблиц [25], отражающих взаимосвязь между породой деревьев, бонитетом условий их произрастания, возрастом, таксационным диаметром ствола $d_{1,3}$ и высотой $H_{\text{ств}}$ ствола, а также расчетные данные о высоте центра давления кроны $H_{\text{ц.д.к}}$.

Моделирование работы форвардера. Работа форвардеров осуществляется на участках лесосек, где харвестеры выполнили свои операции, т. е. харвестеры частично формируют условия последующей эксплуатации форвардеров. Их технологический цикл заключается в циклическом повторении на лесосеке операций погрузки лесоматериалов в пакет на собственную грузовую платформу, операций перемещения к месту их разгрузки на погрузочном пункте, непосредственно разгрузки и возвращения к местам погрузки.

Путь $L_{\text{пер}}^{\Phi}$, проходимый форвардером по лесосеке во время набора очередного пакета лесоматериалов, зависит от запаса древесины Q , грузоподъемности форвардера Q_{Φ} и рабочего вылета манипулятора харвестера $l_{\text{раб}}^X$ работающего перед ним

$$L_{\text{пер}}^{\Phi} = \frac{kQ_{\Phi}}{2l_{\text{раб}}^X Q}.$$

Общий путь $L_{\text{дв}}^{\Phi}$, м проходимый форвардером по лесосеке в порожнем и загруженном состоянии определяется зависимостью

$$L_{\text{дв}}^{\Phi} = \sum_{i_{\text{пас}1}=1}^{n_{\text{пас}1}} \sum_{j_{\text{т.с}}^{\Phi1}=1}^{n_{\text{т.с}}^{\Phi1}} 2(l_{\text{раб}}^X(2i_{\text{пас}1}-1) + L_{\text{пер}}^{\Phi} j_{\text{т.с}}^{\Phi1} + l_{\text{под}}) + \\ + \sum_{i_{\text{пас}2}=1}^{n_{\text{пас}2}} \sum_{j_{\text{т.с}}^{\Phi2}=1}^{n_{\text{т.с}}^{\Phi2}} 2(l_{\text{раб}}^X(2i_{\text{пас}2}-1) + L_{\text{пер}}^{\Phi} j_{\text{т.с}}^{\Phi2} + l_{\text{под}}),$$

где $n_{\text{пас}1}$ и $n_{\text{пас}2}$ — количество пасек, находящихся слева и справа от въезда на лесосеку, соответственно;

$i_{\text{пас}1}$, $i_{\text{пас}2}$ — порядковый номер пасеки слева и справа от въезда на лесосеку соответственно;

$j_{\text{т.с}}^{\Phi1}$, $j_{\text{т.с}}^{\Phi2}$ — порядковый номер технологической стоянки на пасеке $i_{\text{пас}1}$ и $i_{\text{пас}2}$ соответственно;

$n_{\text{т.с}}^{\Phi1}$, $n_{\text{т.с}}^{\Phi2}$ — количество технологических стоянок на пасеках $i_{\text{пас}1}$ и $i_{\text{пас}2}$ соответственно;

$l_{\text{под}}$ — расстояние от погрузочного пункта до места въезда на лесосеку, м.

В качестве допущений в данной зависимости принято, что форвардер движется по прямой траектории без подъемов и спусков и собирает пачки лесоматериалов на пасеке подряд, а при необходимости их добора до полного пакета с другой пасеки перемещается до него по кратчайшему пути, протяженность которого не учитывается. При этом половину обозначенного пути форвардер движется груженым, а половину — в порожнем состоянии.

Вылет манипулятора форвардера $l_{i_{\text{т.с}}^{\Phi\Pi}}$ с которого проводится подъем лесоматериалов

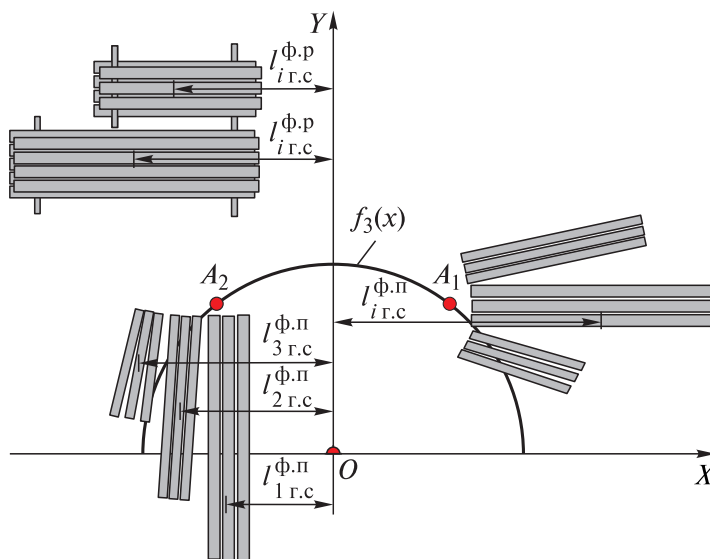


Рис. 3. Схема вариантов расположения сортиментов на лесосеке и на погрузочном пункте
Fig. 3. Layout options for timber placement in a logging area and at the loading point

(рис. 3), помимо прочего зависит от принятой технологической схемы их укладки харвестером (см. рис. 2), количества групп сортировки $n_{i.g.c}$, средних диаметров лесоматериалов в них $d_{i.g.c}$, ширины вала порубочных остатков $b_{вал}$, а для схем, приведенных на рис. 2, б, в — от длины полученных лесоматериалов в соответствующей группе сортировки $l_{i.g.c}$, м.

Для схемы, приведенной на рис. 2, а, применяется выражение

$$l_{i.g.c}^{фП} = x_{рас} + \sum_{i.g.c=1}^{n_{г.с}} d_{i.g.c} \frac{n_{i.g.c} n_{ств}^{г.с}}{2i_{укл}}$$

для схем, приведенных на рис. 2, б, в выражение

$$l_{i.g.c}^{фП} = x_{рас} + \frac{l_{i.g.c}}{2},$$

где $n_{г.с}$ — количество групп сортировки лесоматериалов;

$n_{i.g.c}$ — количество лесоматериалов $i_{г.с}$ -й группы сортировки;

$i_{г.с}$ — порядковый номер группы сортировки лесоматериалов;

$n_{ств}^{г.с}$ — количество стволов деревьев заготавливаемых харвестером с одной технологической стоянки;

$i_{укл}$ — количество мест раскряжевки стволов на технологической стоянке; при односторонней укладке сортиментов $i_{укл} = 1$, при двухсторонней — $i_{укл} = 2$; $l_{i.g.c}$ — длина лесоматериалов в $i_{г.с}$ -й группе сортировки, м;

$d_{i.g.c}$ — средний диаметр лесоматериала в $i_{г.с}$ -й группе сортировки, м.

При этом разгрузка форвардера на погрузочном пункте осуществляется с рабочим вылетом манипулятора $l_{i.g.c}^{фП}$

$$l_{i.g.c}^{фП} = \frac{b_{ф} + l_{i.g.c}}{2} + 1.$$

Для сбора всех лесоматериалов с одной лесосеки при условиях набора полных пакетов и погрузки сортиментов подряд форвардер должен совершить $n_{г.с}^{ф}$ технологических циклов

$$n_{г.с}^{ф} = \frac{b_{л}}{L_{пер}} n_{пас} = \frac{a_{л} b_{л} Q}{10\,000 \cdot Q_{ф}}$$

На каждом из них форвардер должен выполнить $n_{г.с}^{п}$ циклов погрузки пачек каждой из $n_{г.с}$ групп сортировки

$$n_{г.с}^{п} = \begin{cases} \frac{S_{k.g.c}}{S_{раб}^{г.з} \xi_{пд}}, \text{ при } S_{раб}^{г.з} \leq \frac{m_{лм}}{\rho_{лм} l_{лм} \xi_{пд}}; \\ \frac{S_{k.g.c} \rho_{лм} l_{лм}}{m_{лм}}, \text{ при } S_{раб}^{г.з} > \frac{m_{лм}}{\rho_{лм} l_{лм} \xi_{пд}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $k_{г.с}$ — номер группы сортировки лесоматериалов, для которой проводится расчет;

$\xi_{пд}$ — коэффициент полндревесности пакета лесоматериалов;

$\rho_{лм}$ — плотность лесоматериалов, кг/м³;

$S_{k_{г.с}}$ — общая площадь сечения лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, сконцентрированных на одной технологической стоянке в зоне их захвата, м²;

$S_{раб}^{г.с}$ — рабочая площадь зева рейферного захвата, м²;

$m_{лм}$ — масса лесоматериалов, погружаемых за один прием, кг.

Масса лесоматериалов $m_{лм}$ ограничивается грузоподъемностью манипулятора на заданном вылете, устойчивостью форвардера и грузоподъемностью его рейферного захвата. Нецелая величина $n_{k_{г.с}}^{\Pi}$, полученная по зависимости (1), означает, что последняя пачка лесоматериалов, погружаемая из данной группы сортировки, будет неполной. Масса неполной пачки равна произведению массы полной пачки на значение дробной части величины $n_{k_{г.с}}^{\Pi}$.

Сумма площадей сечений $S_{k_{г.с}}$ лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки с учетом диаметра ствола дерева $d_{1,3}$, среднего сбега ствола $S_{ср}$ с достаточной точностью определяется зависимостью

$$S_{k_{г.с}} = n_{ств}^{г.с} \frac{\pi \left(d_{1,3} - \frac{\left(\sum_{i_{г.с}=1}^{k_{г.с}} \sum_{j_{г.с}=1}^{n_{г.с}} j_{i_{г.с}} l_{i_{г.с}} \right)}{2} - 1,3 \right)^2}{4} S_{ср}$$

где $j_{i_{г.с}}$ — порядковый номер лесоматериала в $i_{г.с}$ -й группе сортировки;

$l_{k_{г.с}}$ — длина лесоматериала в группе сортировки $k_{г.с}$, м;

$S_{ср}$ — средний сбег ствола дерева, рассчитанный по зависимости $S_{ср} = d_{1,3} / (H_{ств} - 1,3)$ [8].

При двухсторонней укладке лесоматериалов харвестером, на каждой стороне, сосредотачивается половина лесоматериалов и соответственно $S_{k_{г.с}}$ уменьшается вдвое.

При этом диаметр каждого лесоматериала $d_{k_{лм}}$ в верхнем отрезе может быть ориентировочно рассчитан по зависимости

$$d_{k_{лм}} = d_{1,3} - S_{ср} \left(\sum_{j_{лм}=1}^{k_{лм}} j_{лм} l_{j_{лм}} - 1,3 \right), \quad (2)$$

где $k_{лм}$ — номер лесоматериала в стволе, для которого проводится расчет;

$j_{лм}$ — порядковый номер лесоматериала в стволе;

$l_{j_{лм}}$ — длина лесоматериала с порядковым номером $j_{лм}$ в стволе, м.

Количество стволов $n_{ств}^{г.с}$, раскряжеванных на одной технологической стоянке харвестера и, соответственно, доступных к загрузке при каждой остановке форвардера, определяется выражением

$$n_{ств}^{г.с} = \frac{S_{обр} n_{ств}}{10\,000}.$$

На этапе разгрузки форвардера доля $\omega_{k_{г.с}}$ лесоматериалов соответствующей группы сортировки, находящихся в нем, определяется зависимостью

$$\omega_{k_{г.с}} = \frac{S_{k_{лм}}}{\sum_{i_{г.с}=1}^{n_{г.с}} S_{i_{г.с}}}.$$

Результаты работы аналитической модели используются впоследствии в блоке моделирования технологических операций [25], где для каждого приема и режима выполнения операций харвестера и форвардера определяются затраты времени и энергии, а также нагрузки, возникающие в конструкциях и силовых приводах машин при их проведении. С некоторыми из математических моделей, реализующих данный блок моделирования технологических операций можно ознакомиться в работах [26–35].

Далее рассчитываются общие энергозатраты и время на выполнение операций каждой из машин комплекса «харвестер + форвардер»:

$$\mathcal{E}_{\Phi} = \left(\begin{aligned} &\mathcal{E}_{xx}^{\Phi} + \mathcal{E}_{px}^{\Phi} + \mathcal{E}_{пер}^{\Phi} \left(\frac{L_{пер}^{\Phi}}{l_{пер}^x} - 1 \right) + \\ &+ \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} \mathcal{E}_{k_{г.с}}^{\Pi} n_{k_{г.с}}^{\Pi} + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} \mathcal{E}_{k_{г.с}}^P n_{k_{г.с}}^P \end{aligned} \right) n_{г.с}^{\Phi},$$

где \mathcal{E}_{Φ} — общие энергозатраты на выполнение технологических операций форвардером, Дж;

\mathcal{E}_{xx}^{Φ} — энергозатраты на порожнее передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{\Phi} / 2n_{г.с}^{\Phi}$, Дж;

\mathcal{E}_{px}^{Φ} — энергозатраты на грузовое передвижение форвардера при среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{\Phi} / 2n_{г.с}^{\Phi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{пер}^{\Phi}$ — энергозатраты на передвижение форвардера при наборе пачки на расстоянии $L_{пер}^{\Phi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{k_{г.с}}^{\Pi}$ — энергозатраты на погрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, удаленной от оси поворота манипулятора на расстоянии $l_{г.с}^{\Phi\Pi}$, Дж;

$\mathcal{E}_{k_{г.с}}^P$ — энергозатраты на разгрузку манипулятором одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель на расстояние $l_{i_{г.с}}^{ФП}$ от оси поворота манипулятора, Дж;

$$\mathcal{E}_X = \mathcal{E}_{пер}^X n_{тс}^X + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{нав} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{под} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^B + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \mathcal{E}_i^{o.c} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \sum_{j_{лм}=1}^{n_{лм}} \mathcal{E}_{j_{лм}}^{рк}$$

где \mathcal{E}_X — общие энергозатраты на выполнение технологических операций харвестером, Дж;

$\mathcal{E}_{пер}^X$ — энергозатраты на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{пер}^X$, Дж;

$\mathcal{E}_i^{нав}$, $\mathcal{E}_i^{под}$ — энергозатраты на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки, на расстояние $\Delta l_{ман i}$ и угол $\Delta \alpha_{ман i}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и местам раскряжевки $x_{рас}$ и $y_{рас}$, соответственно, Дж;

\mathcal{E}_i^B — энергозатраты на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента и спиливания, Дж;

$\mathcal{E}_i^{o.c}$ — энергозатраты на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{рас}$ и $y_{рас}$, Дж;

$\mathcal{E}_{j_{лм}}^{рк}$ — энергозатраты на раскряжевку i -го дерева на $n_{лм}$ -е количество лесоматериалов длиной $l_{j_{лм}}$ каждый и диаметром ствола в месте пропила, рассчитанным по зависимости (2), Дж.

Время выполнения операций в технологическом цикле работы форвардера определяется зависимостью

$$T_{Ф} = \left(T_{xx}^{Ф} + T_{рх}^{Ф} + T_{пер}^{Ф} \left(\frac{L_{пер}^{Ф}}{l_{пер}^X} - 1 \right) + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} T_{k_{г.с}}^{п} n_{k_{г.с}}^{п} + \sum_{k_{г.с}=1}^{n_{г.с}} T_{k_{г.с}}^{P} n_{k_{г.с}}^{P} \right) n_{тс}^{Ф} \quad (3)$$

где $T_{Ф}$ — время выполнения технологических операций форвардером, с;

$T_{xx}^{Ф}$ — время передвижения порожнего форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{Ф} / 2n_{тс}^{Ф}$, с;

$T_{рх}^{Ф}$ — время передвижения груженого форвардера на среднем расстоянии вывозки $L_{дв}^{Ф} / 2n_{тс}^{Ф}$, с;

$T_{пер}^{Ф}$ — время передвижения форвардера при наборе пачки на расстояние $L_{пер}^{Ф}$, с;

$T_{k_{г.с}}^{п}$ — время погрузки одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки, при начальном вылете манипулятора $l_{i_{г.с}}^{ФП}$, с;

$T_{k_{г.с}}^{P}$ — время разгрузки одной пачки лесоматериалов $k_{г.с}$ -й группы сортировки из грузовой платформы форвардера в штабель при конечном вылете манипулятора $l_{i_{г.с}}^{ФП}$, с.

Время выполнения операций в технологическом цикле работы харвестера определяется зависимостью

$$T_X = T_{пер}^X n_{тс}^X + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{нав} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{под} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^B + \sum_{i=1}^{n_{ств}} T_i^{o.c} + \sum_{i=1}^{n_{ств}} \sum_{j_{лм}=1}^{n_{лм}} T_{j_{лм}}^{рк}, \quad (4)$$

где T_X — общие энергозатраты на выполнение технологических операций харвестером, Дж;

$T_{пер}^X$ — затраты времени на передвижение харвестера между технологическими стоянками при среднем расстоянии между ними $l_{пер}^X$, Дж;

$T_i^{нав}$, $T_i^{под}$ — затраты времени на наведение харвестерной головки манипулятором на i -е дерево и его подтаскивание к месту раскряжевки, на расстояние $\Delta l_{ман i}$ и угол $\Delta \alpha_{ман i}$ от начальных положений, соответствующих координатам растущих деревьев X_i и Y_i и местам раскряжевки $x_{рас}$ и $y_{рас}$, соответственно, Дж;

T_i^B — затраты времени на валку i -го дерева с учетом его натяга, создания валочного момента и спиливания, Дж;

$T_i^{o.c}$ — затраты времени на обрезку сучьев с i -го дерева в месте раскряжевки с координатами $x_{рас}$ и $y_{рас}$, Дж;

$T_{j_{лм}}^{рк}$ — затраты времени на раскряжевку i -го дерева на $n_{лм}$ -е количество лесоматериалов длиной $l_{j_{лм}}$ каждый и диаметром ствола в месте пропила рассчитанным по зависимости (2), Дж.

Важно учитывать, что операции технологического процесса реализуются харвестером и форвардером параллельно, с некоторым «смещением» по времени, продолжительности которых достаточно для формирования запаса лесоматериалов харвестером и соблюдения безопасного расстояния между машинами. С учетом указанных особенностей организации работы машин из выражений (3) и (4) выбирается максимальная величина.

Выводы

Таким образом, получена математическая модель технологического процесса совместной работы харвестера и форвардера. Она предоставляет данные о положениях харвестеров и форвардеров на лесосеках; координатах их технологических стоянок; путях, проходимых машинами на каждом этапе технологического цикла; положениях рабочих органов, путях их перемещения и задействованных при этом исполнительных механизмах манипуляторов харвестеров и форвардеров. Совместно с авторской математической моделью работы многооперационной лесозаготовительной машины или математическими моделями других авторов, она используется в целях обособленного анализа энергопотребления и производительности технологических операций, схематизации режимов работы машин, создании адаптивных систем управления, а в сочетании с методами конечно-элементного анализа — для оценки прочности и усталостной долговечности их конструкций. Результаты анализа по изложенной модели, также используются в практиках подбора существующих машин в лесозаготовительные комплексы, проектирования конструкций новых отечественных харвестеров и форвардеров, создания типажей многооперационных лесозаготовительных машин.

Список литературы

- [1] Курлович Д.М. Морфометрический ГИС-анализ рельефа Беларуси // Земля Беларуси, 2013. № 4. С. 42–48.
- [2] Соколовский И.В., Юренин А.В. Атлас морфологических признаков лесных почв Беларуси: справочное издание. Минск: Редакция журнала «Лесное и охотничье хозяйство», 2013. 136 с.
- [3] Почвы Республики Беларусь / под ред. В.В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.
- [4] Соколовский И.В. Почвоведение. Минск: Изд-во БГТУ, 2005. 330 с.
- [5] Мисуно Ю.И. Методика экспериментальных исследований по оценке эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2021. № 1 (240). С. 132–140.
- [6] Атрошенко О.А. Лесная таксация. Минск: Изд-во БГТУ, 2009. 468 с.
- [7] Севко О.А. Ландшафтная таксация с основами парколесоустройства. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2012. 107 с.
- [8] Справочник таксатора / под ред. В.С. Мирошникова. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
- [9] Таксационно-лесоустроительный справочник. Минск: Лесное и охотничье хозяйство, 2019. 335 с.
- [10] Машковский В.П. Усредненные ряды распределения диаметров стволов по естественным ступеням толщины с учетом категорий технической годности деревьев и методика их использования для товаризации расчетной лесосеки // Труды БГТУ, 2016. № 1. С. 9–13.
- [11] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки», 2012. № 8 (129). Т. 2. С. 49–51.
- [12] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80
- [13] Долматов С.Н., Бабкина Т.С. Компьютерная симуляция в среде AnyLogic работы мобильной рубительной машины на лесосеке // Системы. Методы. Технологии, 2024. № 2(62). С. 95-102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102
- [14] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Влияние состава древостоя на временной цикл работы харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2024. № 3. С. 153–165.
- [15] Заикин А.Н., Сиваков В.В., Зеликов В.А., Чуйков А.С., Новиков А.И., Стасюк В.В. Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ // Лесотехнический журнал, 2024. Т. 14. № 2 (54). С. 204–226.
- [16] Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 4. С. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [17] Черник К.Н., Федорченко И.С. Особенности использования машин манипуляторного типа для валки деревьев // Лесозэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. статей Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 10 марта 2021 г. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 271–275.
- [18] Карпачев С.П., Быковский М.А., Лаптев А.В. Методика выбора манипулятора харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 123–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129
- [19] Панкратович А.С., Протас П.А. Методы оценки влияния размещения технологических элементов лесосеки на производительность форвардера // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2022. № 2 (258). С. 130–136.
- [20] Татаренко А.П. Совершенствование конструкции лесопромышленных манипуляторов на основе тематического моделирования рабочих процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2000. 20 с.
- [21] Арико С.Е. Обоснование параметров валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для рубок промежуточного лесопользования: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 2012, 225 с.

- [22] Лагереv А.В., Макулина А.В., Лагереv И.А. Влияние конструктивных характеристик манипулятора харвестера на оптимальные размеры рабочей зоны // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2024. № 2. С. 111–123.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity // *Dissertationes Forestales*, 2009, v. 79, 62 p. DOI:10.14214/df.79
- [24] Коцан В.В. Продуктивность сосняков мшистых искусственного происхождения различной пространственной структуры в лесорастительных условиях Беларуси: автореф. дис. ... канд. с.-х.наук: 06.03.02. Минск, 2016, 22 с.
- [25] Севко О.А., Коцан В.В. Зависимость радиального прироста сосны и ели от изменения пространственной структуры сложного древостоя // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2022. № 2 (258). С. 20–26.
- [26] Голякевич С.А., Гороновский А.Р., Коробкин В.А. Методика прогнозирования эффективности комплексов лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 125–131. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17
- [27] Голякевич С.А., Гороновский А.Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 132–143. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18
- [28] Golyakevich S.A., Goronovsky A.R. Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation // *J. of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.
- [29] Богданов Д.С., Попикова А.В., Евсиков И.Д., Попиков С.К., Полумиско А.А. Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортиментовоза, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты // Лесотехнический журнал, 2024. Т. 14. № 2 (54). С. 127–143.
- [30] Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryanha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment // *Central European Forestry J.*, 2020, v. 66, no. 1, pp. 12–22. DOI 10.2478/forj-2019-0027
- [31] Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3. С. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [32] Рукомойников К.П., Купцова В.О., Сергеева Т.В. Математическая модель расхода топлива форвардера «Амкодор-2682» при выполнении лесохозяйственных работ // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 6. С. 148–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-148-158
- [33] Голякевич С.А. Применение систем адаптивного управления для повышения реализации энергетического потенциала харвестерами // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2017. № 2. С. 238–244.
- [34] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Федотов М.В. Расчет конструкции технологического модуля погрузочно-транспортной машины // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2020. № 164. С. 141–153. DOI 10.21515/1990-4665-164-010
- [35] Герман А.А., Голякевич С.А., Мохов С.П. Текущее состояние и перспективы развития модельного ряда и конструкций лесопромышленных машин Амкодор // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 мая 2020 года. Минск: Изд-во БГТУ, 2021. С. 9–14.

Сведения об авторе

Голякевич Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет, gsa@belstu.by

Поступила в редакцию 08.04.2025.

Одобрено после рецензирования 30.10.2025.

Принята к публикации 21.01.2026.

MATH MODEL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF WOOD RAW MATERIAL HARVESTING BY «HARVESTER + FORWARDER» MACHINE COMPLEXES

S.A. Golyakevich

Belarusian State Technological University, 13 a, Sverdlova st., 220006, Minsk, Republic of Belarus

gsa@belstu.by

The article presents a mathematical description of the analytical model of interaction of multi-operational logging machines when they realize typical technological processes of timber harvesting. The model is based on analytical dependencies that determine the position of harvesters and forwarders on the logging sites, the coordinates of their technological stands, the paths traveled by the machines at each stage of the technological cycle, the positions of working bodies, the paths of their movement and the manipulator actuators involved. For the harvester, the accessibility of trees from one technological parking lot was estimated, taking into account the size of the manipulator working area, the presence or absence of technological corridors, the coordinates of bucking places, etc. The study was carried out for three typical harvesting machines. Studies were conducted for three typical variants of timber arrangement after harvester operation: along the technological corridor, across the corridor and leaving felling residues on it, across the corridor and leaving felling residues next to it. Interrelations between the technological process of harvester operation and the formation of future conditions of forwarder operation are analytically obtained. The concentration of timber in the harvesting area, the number of sorting groups, the size, remoteness and direction of their stacking relative to the technological corridor are taken into account.

Keywords: harvester, forwarder, operation, methodology, efficiency, machine complex, technology, operation, conditions, sorting, loading, felling, bucking

Suggested citation: Golyakevich S.A. *Matematicheskaya model' tekhnologicheskikh protsessov zagotovki drevesnogo syr'ya kompleksom mashin «kharvester + forwarder»* [Math model of technological processes of wood raw material harvesting by «harvester + forwarder» machine complexes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 113–126. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-113-126

References

- [1] Kurlovich D.M. *Morfometricheskiy GIS-analiz rel'efa Belarusi* [Morphometric GIS Analysis of the Relief of Belarus]. *Zemlya Belarusi* [Land of Belarus], 2013, no. 4, pp. 42–48.
- [2] Sokolovskiy I.V., Yurenya A.V. *Atlas morfologicheskikh priznakov lesnykh pochv Belarusi: spravochnoe izdanie* [Atlas of Morphological Features of Forest Soils of Belarus: Reference Publication]. Minsk: Editorial Board of the Journal «Forestry and Hunting», 2013, 136 p.
- [3] *Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of the Republic of Belarus]. Ed. V.V. Lapa. Minsk: Information and Central Center of the Ministry of Finance, 2019, 632 p.
- [4] Sokolovskiy I.V. *Pochvovedenie* [Soil Science]. Minsk: BSTU, 2005, 330 p.
- [5] Misuno Yu.I. *Metodika eksperimental'nykh issledovaniy po otsenke ekspluatatsionno-ekologicheskoy sovместimosti lesnykh mashin s pochvogruntami* [Methodology of experimental studies to assess the operational and environmental compatibility of forestry machines with soils]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2021, no. 1 (240), pp. 132–140.
- [6] Atroshchenko O.A. *Lesnaya taksatsiya* [Forest Inventory]. Minsk: BSTU, 2009, 468 p.
- [7] Sevko O.A. *Landshaftnaya taksatsiya s osnovami parkolesoustroystva* [Landscape Inventory with the Basics of Park and Forest Management]. Minsk: Belarusian State Technological University, 2012, 107 p.
- [8] *Spravochnik taksatora* [Taxator's Handbook]. Ed. by V. S. Miroshnikov. Minsk: Urajai, 1980, 360 p.
- [9] *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and Forest Management Handbook]. Minsk: Forestry and Hunting, 2019, 335 p.
- [10] Mashkovskiy V.P. *Usrednennyye ryady raspredeleniya diametrov stvolov po estestvennym stupenyam tolshchiny s uchetom kategoriy tekhnicheskoy godnosti derev'ev i metodika ikh ispol'zovaniya dlya tovarizatsii raschetnoy lesoseki* [Averaged Series of Trunk Diameter Distribution by Natural Thickness Grades Taking into Account the Categories of Technical Suitability of Trees and the Methodology of Their Use for the Commodification of the Estimated Cut]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 1, pp. 9–13.
- [11] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syuney V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation Modeling of Harvester Operation: Algorithms and Implementation]. *Uchenye zapiski*

- Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Estestvennye i tekhnicheskie nauki» [Scientific Notes of Petrozavodsk State University. Series: Natural and Technical Sciences], 2012, no. 8 (129), v. 2, pp. 49–51.
- [12] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesiny na primere lesnogo kharvestera* [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80
- [13] Dolmatov S.N., Babkina T.S. *Komp'yuternaya simulyatsiya v srede AnyLogic raboty mobil'noy rubitel'noy mashiny na lesoseke* [Computer simulation in the AnyLogic environment of a mobile chipping machine operation in a logging site]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2024, no. 2(62), pp. 95–102. DOI 10.18324/2077-5415-2024-2-95-102
- [14] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Vliyanie sostava drevostoya na vremennoy tsikl raboty kharvestera* [Influence of the composition of the forest stand on the time cycle of the harvester]. *Russian Forestry J.*, 2024, no. 3, pp. 153–165.
- [15] Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Chuykov A.S., Novikov A.I., Stasyuk V.V. *Avtomatizirovannoe operativnoe upravlenie lesosechnymi robotami: metodologicheskii analiz* [Automated operational management of logging operations: a methodological analysis]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2024, v. 14, no. 2 (54), pp. 204–226.
- [16] Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. *Programmnnoe obespechenie v lesnom khozyaystve i pri lesozagotovkakh* [Software in forestry and logging]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [17] Chernik K.N., Fedorchenko I.S. *Osobennosti ispol'zovaniya mashin manipulyatornogo tipa dlya valki derev'ev* [Features of using manipulator-type machines for felling trees]. *Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forest exploitation and integrated use of wood: collection of articles from the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, March 10, 2021. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2021, pp. 271–275.
- [18] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Metodika vybora manipulyatora kharvestera* [Method of selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 123–129.
- [19] Pankratovich A.S., Protas P.A. *Metody otsenki vliyaniya razmeshcheniya tekhnologicheskikh elementov lesoseki na proizvoditel'nost' forvardera* [Methods for assessing the impact of the placement of technological elements of a logging site on forwarder productivity]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2022, no. 2 (258), pp. 130–136.
- [20] Tatarenko A.P. *Sovershenstvovanie konstruksii lesopromyshlennykh manipulyatorov na osnove matematicheskogo modelirovaniya rabochikh protsessov* [Improving the Design of Forestry Manipulators Based on Mathematical Modeling of Work Processes]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh*, 2000, 20 p.
- [21] Ariko S.E. *Obosnovanie parametrov valочно-suchkorezno-raskryzhevochnoy mashiny dlya rubok promezhutochnogo lesopol'zovaniya* [Justification of the Parameters of a Felling-Delimiting-Crossing Machine for Intermediate Forest Use]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Minsk*, 2012, 225 p.
- [22] Lagerev A.V., Makulina A.V., Lagerev I.A. *Vliyanie konstruktivnykh kharakteristik manipulyatora kharvestera na optimal'nye razmery rabochey zony* [Influence of the Design Characteristics of a Harvester Manipulator on the Optimal Dimensions of the Working Area]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of Bryansk State University], 2024, no. 2, pp. 111–123.
- [23] Ovaskainen H. *Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity*. *Dissertationes Forestales*, 2009, v. 79, 62 p. DOI:10.14214/df.79
- [24] Kotsan V.V. *Produktivnost' sosnyakov mshistykh iskusstvennogo proiskhozhdeniya razlichnoy prostranstvennoy struktury v lesorastitel'nykh usloviyakh Belarusi* [Productivity of artificial mossy pine forests of different spatial structure in forest growth conditions of Belarus]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.02. Minsk*, 2016, 22 p.
- [25] Sevko O.A., Kotsan V.V. *Zavisimost' radial'nogo prirosta sosny i eli ot izmeneniya prostranstvennoy struktury slozhnogo drevostoya* [Dependence of radial increment of pine and spruce on changes in the spatial structure of a complex forest stand]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing. Renewable Resources], 2022, no. 2 (258), pp. 20–26.
- [26] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R., Korobkin V.A. *Metodika prognozirovaniya effektivnosti kompleksov lesozagotovitel'nykh mashin* [Methodology for forecasting the efficiency of logging machine complexes]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 125–131. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-17
- [27] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R. *Matematicheskaya model' dinamiki manipulyatorov mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin* [Mathematical model of the dynamics of manipulators of multi-functional logging machines]. *Trudy BGTU. Ser. 1, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererabotka vobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 132–143. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-18
- [28] Golyakevich S.A., Goronovsky A.R. *Evaluation of Loading Dynamics of Fatigue Life for a Forwarder Half-Frame Articulation. J. of Machinery Manufacture and Reability*, 2017, no. 5, pp. 463–471.
- [29] Bogdanov D.S., Popikova A.V., Evsikov I.D., Popikov S.K., Polumisko A.A. *Kinematicheskii i dinamicheskii analiz mekhanizma pod'ema manipulyatora sortimentovoza, osnashchennogo gidromekhanicheskim dempferom, na osnove metodov Eylera i Runge-Kutty* [Kinematic and Dynamic Analysis of the Timber Truck Manipulator Lifting Mechanism Equipped with a Hydromechanical Damper Based on the Euler and Runge-Kutta Methods]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Lesotekhnicheskii Zhurnal], 2024, v. 14, no. 2 (54), pp. 127–143.

- [30] Budnik P., Shegelman I., Baklagin V. Variability of forwarder truckload parameters in the Pryazha forestry division of the Republic of Karelia (Russia): A computer experiment. *Central European Forestry J.*, 2020, v. 66, no. 1, pp. 12–22. DOI 10.2478/forj-2019-0027
- [31] Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O. *Obosnovanie norm raskhoda topliva mnogooperatsionnykh lesozagotovitel'nykh mashin na primere kharvestera* [Justification of fuel consumption standards for multi-functional logging machines using the example of a harvester]. *Russian Forestry J.*, 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [32] Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O., Sergeeva T.V. *Matematicheskaya model' raskhoda topliva forvardera «Amkodor-2682» pri vypolnenii lesokhozyaystvennykh rabot* [Mathematical model of fuel consumption of the Amkodor-2682 forwarder during forestry operations]. *Russian Lesnoy J.*, 2020, no. 6, pp. 148–158. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-148-158
- [33] Golyakevich S.A. *Primenenie sistem adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya realizatsii energeticheskogo potentsiala kharvesterami* [Application of adaptive control systems to improve the implementation of the energy potential of harvesters]. *Trudy BGTU. Ser. I, Lesnoe khoz-vo, prirodopol'zovanie i pererab. vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series I, Forestry, Nature Management and Processing. Renewable Resources], 2017, no. 2, pp. 238–244.
- [34] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Fedotov M.V. *Raschet konstruksii tekhnologicheskogo modulya pogruchno-transportnoy mashiny* [Calculation of the Design of the Technological Module of a Loading and Transport Machine]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic Online Electronic Scientific J. of Kuban State Agrarian University], 2020, no. 164, pp. 141–153. DOI 10.21515/1990-4665-164-010
- [35] German A.A., Golyakevich S.A., Mokhov S.P. *Tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya model'nogo ryada i konstruksiy lesopromyshlennykh mashin Amkodor* [Current State and Prospects for the Development of the Model Range and Designs of Amkodor Forestry Machines]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Logging Production: Problems and Solutions: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference], Minsk, May 13–15, 2020. Minsk: Belarusian State Technological University, 2021, pp. 9–14.

Author's information

Golyakevich Sergey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Belarusian State Technological University, gsa@belstu.by

Received 08.04.2025.

Approved after review 30.10.2025.

Accepted for publication 21.01.2026.