

Математическая модель расчёта технологических параметров работы полноповоротной лесозаготовительной машины

А.Ф. Уразова^a, С.С. Рублева^b

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a urazovaaf@m.usfeu.ru, ^b rublevass@m.usfeu.ru,

^a <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2696-0969>

Статья поступила 14.01.2026, принята 04.02.2026

Технологические параметры работы полноповоротной лесозаготовительной машины (ЛЗМ), используемой на лесосечных работах, оказывают существенное влияние на экологическую и эксплуатационную эффективность. ЛЗМ на каждой технологической стоянке формирует пакет лесоматериалов, объём которого определяется параметрами машины, таксационной характеристикой насаждения, некоторыми технологическими параметрами, от которых зависит площадь рабочей зоны, образованной максимальным и минимальным вылетом манипулятора. При переезде ЛЗМ на большее расстояние, чем гарантированное, будут возникать участки, недосягаемые для манипулятора ЛЗМ в результате переезда машиной рабочей точки стоянки, а значит, и к риску оставления деревьев на этих площадях, подлежащих рубке, которые машина не может обработать. Поэтому актуальной является разработка математической модели расчёта технологических параметров работы ЛЗМ. Это необходимо не только для реализуемых технологий, но и позволит провести детальный анализ отдельных элементов технологического цикла работы ЛЗМ, зависящих от параметров технологического оборудования и природно-производственных условий лесосек. Цель работы – расчёт недосягаемой площади на ленте для манипуляторной широкозахватной ЛЗМ при увеличении расстояния переезда между рабочими стоянками. Исследование основано на положениях теории движения лесных машин. В качестве базовой машины был выбран харвестер AMKODOR FH3081. При разработке математических моделей использованы классические методы математического анализа. Разработанный подход может быть использован для моделирования работы в различных условиях лесоводственных и технологических ограничений. В качестве возможных ограничений могут использоваться: отсутствие недосягаемых для манипулятора участков, максимальная рабочая площадь на рабочей стоянке или максимальный объём пакетов древесины, формируемых на рабочей стоянке.

Ключевые слова: ширина ленты; сочетание стоянок; расстояния переезда; досягаемость деревьев; площадь участка, недосягаемого для лесозаготовительной машины.

Mathematical model for calculating the technological parameters of a full-turn logging machine operation

A.F. Urazova^a, S.S. Rubleva^b

Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia

^a urazovaaf@m.usfeu.ru, ^b rublevass@m.usfeu.ru,

^a <https://orcid.org/0000-0003-2771-2334>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-2696-0969>

Received 14.01.2026, accepted 04.02.2026

Technological parameters of the operation of a full-turn logging machine used in harvesting operations have a significant impact on environmental and operational efficiency. The full-turn logging machine at each technological stand forms a package of timber, the volume of which is determined by machine parameters, taxation characteristics of the plantation, some technological parameters, on which the area of the work site formed by the maximum and minimum outreach of the manipulator depends. When moving the full-turn logging machine to a greater distance than the guaranteed distance, there are areas out of reach of the full-turn logging machine manipulator as a result of the machine moving the working point of the stand, and therefore to the risk of leaving trees on these areas to be cut. Therefore, it is urgent to develop a mathematical model for calculating technological parameters of the full-turn logging machine operation. This is necessary not only for the implemented technologies, but will also allows for a detailed analysis of individual elements of the technological cycle of the full-turn logging machine operation, depending on the parameters of technological equipment and natural and production conditions of harvesting areas. The purpose of the work is to calculate the inaccessible area on the belt for the wide-capture full-turn logging machine with an increase in the travel distance between work stops. The study is based on the provisions of the theory of forest machine movement. AMKODOR FH3081 harvester AMKODOR is chosen as a base machine. Classical methods of mathematical analysis are used in the development of mathematical models. The developed approach can be used for modeling the operation under different conditions of forestry and technological constraints. Potential constraints include: the absence of areas inaccessible to the manipulator, the maximum working area at the work site, or the maximum volume of timber bundles formed at the work site.

Keywords: belt width; combination of stops; travel distances; tree reach; area of land inaccessible to logging machine.

Введение. Уровень лесопромышленных производств определяется номенклатурой и техническим уровнем машин и оборудования, а также разнообразием технологий. На современном этапе развития в составе систем лесозаготовительных машин преобладают манипуляторные машины и технологии, предполагающие рубку волоков. Перспективные технологии рубок должны не только экономически эффективными, но и соответствовать возрастающим эколого-лесоводственным требованиям.

Технология работы манипуляторных лесозаготовительных машин (ЛЗМ) предполагает разработку лент леса, как правило, их однократными проходами, с передвижением машины по заданному маршруту, преимущественно по одной схеме – когда волок располагается посередине пасеки при последовательных остановах на рабочих площадках, где производится спиливание деревьев с последующей укладкой в пачку в зоне действия манипулятора [1–5].

При реализации всех видов выборочных рубок с равномерным изреживанием древостоя манипуляторными лесозаготовительными машинами (ЛЗМ) при расчёте ширины пасеки необходимо учитывать возможность заготовки дерева на всей площади пасеки. Возможность заготовки дерева определяется досягаемостью отведённого в рубку дерева, его доступностью [6].

При этом организационно-технологические параметры процесса, ширина разрубаемой ленты леса, число деревьев, достигаемое для манипулятора, и расстояние между рабочими стоянками, определяются габаритами ЛЗМ (прежде всего максимальным и минимальным вылетом манипулятора) и густотой древостоя [7–9]. В свою очередь эти параметры технологического процесса оказывают существенное влияние на производительность и степень повреждения компонентов леса [10–14].

После обработки всех деревьев, подлежащих валке, ЛЗМ переезжает на гарантированное расстояние к сле-

дующей рабочей позиции, исключая наличие недосягаемых участков между смежными лентами. Но при переезде ЛЗМ на большее расстояние, чем гарантированное, будут возникать участки недосягаемые для манипулятора ЛЗМ в результате переезда машиной рабочей точки стоянки, а значит, и к риску оставления деревьев на этих площадях, подлежащих рубке, которые машина не может обработать.

Увеличение расстояния переезда между рабочими стоянками может произойти за счёт промежутков между деревьями (число деревьев на гектаре), которые зависят не только от густоты, но и типа размещения деревьев в древостоях [15, 16].

Поэтому актуальной является разработка математической модели расчёта технологических параметров работы полноповоротной лесозаготовительной машины. Это необходимо не только для реализуемых технологий, но и позволит провести детальный анализ отдельных элементов технологического цикла работы ЛЗМ и составить объективный прогноз качества выполнения рубок и уточнить параметры технологических процессов, зависящие от технологического оборудования и природно-производственных условий лесосек с помощью математических методов [17, 18].

При моделировании расстояния переезда ЛЗМ возможны две тактики работы ЛЗМ, определяющиеся досягаемостью и доступностью деревьев, подлежащих рубке:

1. Передвижение ЛЗМ по ленте к следующей рабочей позиции, исключая наличие недосягаемых участков между смежными лентами (рис. 1).
2. Перемещение ЛЗМ на большее расстояние, чем гарантированное, при котором будут возникать участки, недосягаемые для манипулятора ЛЗМ, в результате переезда машиной рабочей точки стоянки (рис. 2).

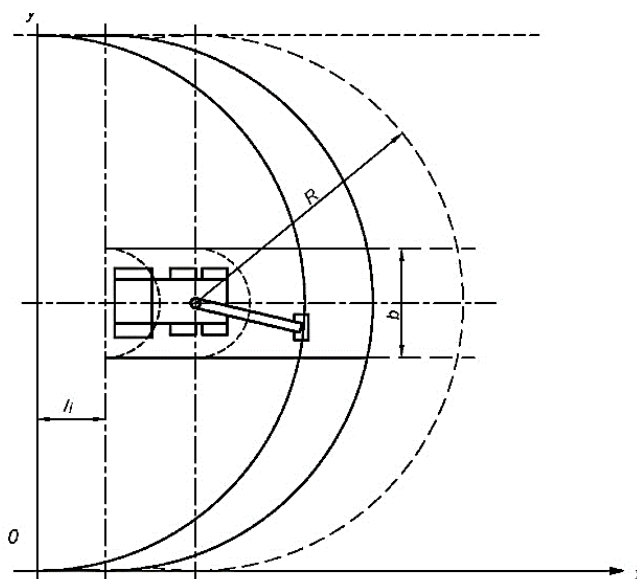


Рис. 1. Схема передвижения манипуляторной лесозаготовительной машины к следующей рабочей позиции, исключая наличие недосягаемых участков между смежными лентами: R – максимальный вылет манипулятора; l_i – возможность переезда на i расстояние; b – ширина волока

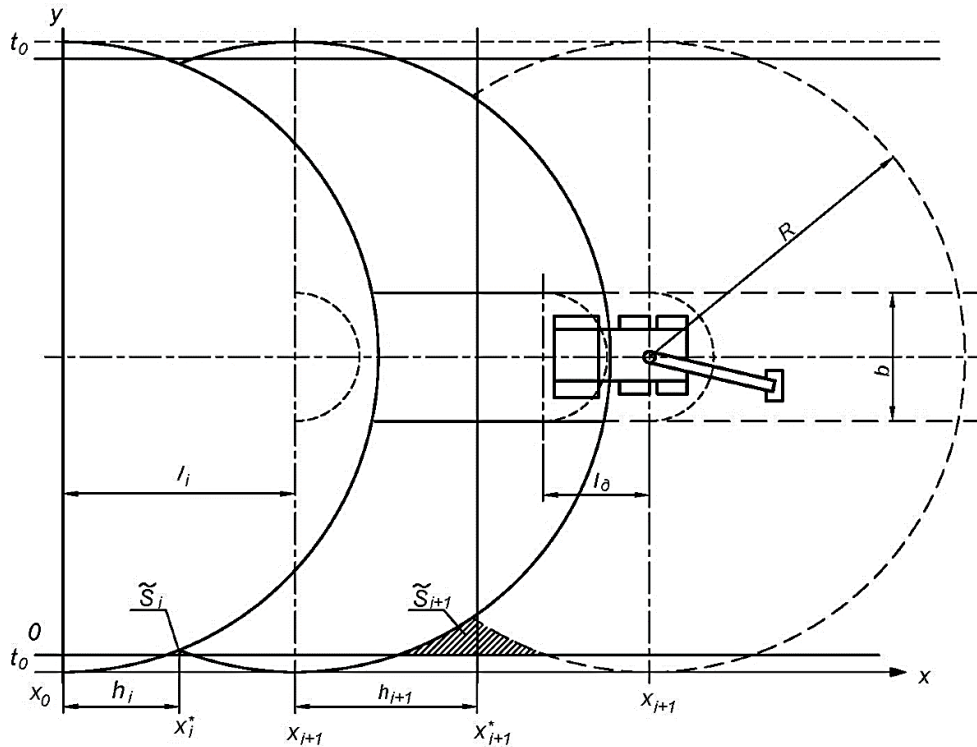


Рис. 2. Схема передвижения манипуляторной лесозаготовительной машины на большее расстояние, чем гарантированное: x_0 – исходное положение машины (центр окружности); x_i – абсцисса, центр i стоянки, x_i^* – точка пересечения окружностей с центрами в точках x_i и x_{i+1} ; S_i – площадь участка, недосягаемого для ЛЗМ; h_i – расстояние от x_i до x_i^* , R – максимальный вылет манипулятора, l_0 – дополнительное расстояние переезда, l_i – возможность переезда на i расстояние; b – ширина волока, $i = 0, 1, 2, \dots$

Первая тактика предполагает визуальный контроль и оценку возможности заготовки всех деревьев в зоне максимального вылета манипулятора справа и слева от ЛЗМ. Такая стратегия предполагает высокий уровень концентрации внимания оператора и частое расположение рабочих стоянок, а как результат повышенную утомляемость оператора и снижение производительности.

Вторая тактика позволит исключить названные недостатки, создавая предпосылки для формирования больших пакетов (сортиментов или деревьев) тем самым создавая предпосылки для увеличения производительности трелёвочных машин, однако создаёт риски оставления на лесосеке не вырубленными деревьев, назначенных в рубку.

Цель работы – расчёт недосягаемой площади на ленте для манипуляторной широкозахватной ЛЗМ при увеличении расстояния переезда между рабочими стоянками.

Методы исследования. Исследование основано на положениях теории движения лесных машин. При разработке математических моделей использованы классические методы математического анализа.

Результаты исследования и их обсуждение. Исходное положение машины на рис. 2 обозначено как т. x_0 . На расстоянии максимального вылета манипулятора R от исходного положения дерева спилены, и появление новых деревьев на рабочей площадке в зоне досягаемости манипулятора возможно только при передвижении машины на новую рабочую позицию x_i^* . За счёт промежутков между деревьями может произойти переезд

ЛЗМ, а значит и перенос рабочей стоянки (точки x_i^*) на дополнительное расстояние переезда в т. x_i . При таком перемещении появляются недоступные участки S_i на ленте (закрашены цветом) для манипулятора ЛЗМ.

Расчёт недосягаемой площади на ленте. В качестве расчётного расстояния примем величину расстояния переезда, равную гарантированному расстоянию переезда в соответствии с условием $l = R - r$.

Введём систему координат так, как показано на рис. 1. Тогда вопрос о нахождении неизвестной площади S_i сводится к задаче вычисления суммы площадей криволинейных трапеций $S_i = S_i^{(1)} + S_i^{(2)}$, ограниченных сверху дугами окружностей.

$$(x - x_i)^2 + (y - R)^2 = R^2 \text{ и}$$

$$(x - x_{i+1})^2 + (y - R)^2 = R^2,$$

соответственно, снизу осью Ox , и прямой $x = x_i^*$, где x_i^* – абсцисса точки пересечения i -ой и $i + 1$ окружности, $i = 0, 1, 2$.

Площадь криволинейной трапеции, ограниченной сверху графиком функции $y = f(x)$, вычисляется с помощью определённого интеграла $S = \int_a^b f(x) dx$, при работе с дугой окружности удобнее перейти к параметрическому заданию кривой $\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t). \end{cases}$

$$\text{Тогда } S = \int_{\alpha}^{\beta} y(t)x'(t) dt,$$

где t – величина сектора, град.

Запишем уравнение окружности с радиусом R с центром в точке (x_i, R) в параметрическом виде:

$$\begin{cases} x - x_i = R \cos t, \\ y - R = R \sin t \end{cases} \text{ или } \begin{cases} x = x_i + R \cos t, \\ y = R + R \sin t, \end{cases}$$

(для всех окружностей центр по y не смещается $y_0 = R$).

Найдём первообразную

$$\begin{aligned} F(t) &= \int y(t)x'(t)dt \\ &= \int (R + R \sin t)(-R \sin t)dt \\ &= -R^2 \int (\sin t + \sin^2 t)dt = \\ &= R^2 \cos t - R^2 \int \frac{1}{2}(1 - \cos 2t)dt = R^2 \cos t - \frac{R^2}{2}t + \\ &\quad \frac{R^2}{2} \int \cos 2t dt. \end{aligned}$$

Окончательно приходим к равенству:

$$F(t) = R^2 \left(\cos t - \frac{t}{2} + \frac{\sin 2t}{4} \right) + C \quad (1)$$

Для нахождения площади S_i остаётся определить, в каких пределах меняется параметр t .

1) Рассмотрим случай $S_i^{(1)}$:

При $x = x_i$ параметр $t = -\frac{\pi}{2}$.

При $x = x_i^*$ получаем $x_i^* - x_i = R \cos t$,

тогда $\cos t = \frac{x_i^* - x_i}{R}$ и, следовательно, $t = \pm \arccos\left(\frac{x_i^* - x_i}{R}\right)$.

Значение $t = -\arccos\left(\frac{x_i^* - x_i}{R}\right)$ соответствует точке пересечения окружностей, таким образом

$$t \in \left[-\frac{\pi}{2}; -\arccos\left(\frac{x_i^* - x_i}{R}\right) \right]. \quad (2)$$

2) Рассмотрим случай $S_i^{(2)}$

При $x = x_i^*$ $\cos t = \frac{x_i^* - x_{i+1}}{R}$ или $\cos t = -\frac{x_{i+1} - x_i^*}{R}$, следовательно,

$$t = \pm \left(\pi - \arccos\left(\frac{x_{i+1} - x_i^*}{R}\right) \right),$$

а значение $t = -\pi + \arccos\left(\frac{x_{i+1} - x_i^*}{R}\right)$ соответствует точке пересечения окружностей X_i^* .

При $x = x_0$ значение параметра $t = -\frac{\pi}{2}$.

Таким образом,

$$t \in \left[-\pi + \arccos\left(\frac{x_{i+1} - x_i^*}{R}\right); -\frac{\pi}{2} \right]. \quad (3)$$

Обозначим $h_i = \frac{x_{i+1} - x_i^*}{2}$, $i = 0, 1, 2$. Отметим, что для всех S_i справедливо $x_i^* - x_i = x_{i+1} - x_i^* = h_i$. С учётом последнего и в силу (1), (2), а также чётности $\cos x$, $\arccos x$ и нечётности $\sin x$, и справедливости равенства $\cos(\arccos x) = x$ при $x \in [-1; 1]$, получаем для $S_i^{(1)}$:

$$\begin{aligned} S_i^{(1)} &= R^2 \left(\cos t - \frac{t}{2} + \frac{\sin 2t}{4} \right) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{-\arccos \frac{h_i}{R}} \\ &= R^2 \left(\cos\left(-\arccos \frac{h_i}{R}\right) + \frac{\arccos \frac{h_i}{R}}{2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin\left(2 \arccos \frac{h_i}{R}\right)}{4} \right) - R^2 \left(\cos \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} - \frac{\sin(2\pi)}{4} \right) = \\ &= R^2 \left(\frac{h_i}{R} + \frac{\arccos \frac{h_i}{R}}{2} - \frac{\sin\left(2 \arccos \frac{h_i}{R}\right)}{4} - \frac{\pi}{4} \right). \end{aligned}$$

Аналогичные рассуждения проведём для вычисления площади $S_i^{(2)}$:

$$\begin{aligned} S_i^{(2)} &= R^2 \left(\cos t - \frac{t}{2} + \frac{\sin 2t}{4} \right) \Big|_{-\pi + \arccos \frac{h_i}{R}}^{-\frac{\pi}{2}} \\ &= R^2 \left(\cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{4} - \frac{\sin \pi}{4} \right) - \\ &\quad - R^2 \left(\cos\left(-\pi + \arccos \frac{h_i}{R}\right) - \frac{(-\pi + \arccos \frac{h_i}{R})}{2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin 2\left(-\pi + \arccos \frac{h_i}{R}\right)}{4} \right) - \\ &= R^2 \left(\frac{\pi}{4} - \left(-\frac{h_i}{R}\right) - \frac{\pi}{2} + \frac{\arccos \frac{h_i}{R}}{2} - \frac{\sin\left(2 \arccos \frac{h_i}{R}\right)}{4} \right). \end{aligned}$$

Таким образом, $S_i^{(1)} = S_i^{(2)}$ и $S_i = 2S_i^{(1)}$. Приходим к расчётной формуле:

$$S_i = 2R^2 \left(\frac{h_i}{R} + \frac{\arccos \frac{h_i}{R}}{2} - \frac{\sin\left(2 \arccos \frac{h_i}{R}\right)}{4} - \frac{\pi}{4} \right). \quad (4)$$

Ниже приведён пример расчёта недостижимых площадей для одной из отечественных манипуляторных ЛЗМ. Это харвестер АМКОDОР FH3081, производящийся в Беларуси и успешно эксплуатирующийся во всех регионах РФ со следующими характеристиками: ширина по колесам – 3000 мм, вылет стрелы манипулятора, 9500/9043 мм.

Пример 1. Проведём расчёт недостижимой для ЗСУ площади для первой области S_0 , показанной на рис. 1, в случае $R = 10$ м, $l_0 = 7,5$ м ($x_1 = l_0 = 7,5$ м).

Найдём x_0^* : абсциссу точки пересечения окружностей $x^2 + (y - 10)^2 = 10^2$ и $(x - 15)^2 + (y - 10)^2 = 10^2$. Решая систему

$$\begin{cases} x^2 + (y - 10)^2 = 10^2, \\ (x - 15)^2 + (y - 10)^2 = 10^2, \end{cases}$$

находим $x_0^* = 3,75$ м.

Отметим, что $\frac{h_0}{10} = 0,375$, $\arccos \frac{h_0}{10} = 1,1864$. Тогда, согласно расчётной формуле (4), получаем

$$S_0 = 2 \cdot 10^2 \left(0,375 + \frac{1,1864}{2} - \frac{\sin(2 \cdot 1,1864)}{4} - \frac{\pi}{4} \right) = 1,8765 \text{ м}^2.$$

Для получения окончательного результата надо полученную величину удвоить:

$$2S_0 = 2 \cdot 1,8765 = 3,75 \text{ м}^2.$$

Пусть ширина исходной полосы уменьшается на $2t_0$ (симметрично с двух грани), тогда уменьшатся и неохваченные площади \tilde{S}_i , при этом они будут составлять часть прежних площадей S_i (см. рис. 2).

\tilde{S}_i – площадь участка, недосягаемого для ЛЗМ, при уменьшении ширины участка (отступ от границы составляет t_0 м).

Выбирая также, как и раньше, систему координат (см. рис. 1), проведём прямую $y = t_0$ и найдём абсциссу точки пересечения этой прямой с i -ой окружностью:

$$\begin{cases} y = t_0 \\ (x - x_i)^2 + (y - R)^2 = R^2, \end{cases}$$

выражая y из первого уравнения и подставляя во второе, получаем:

$$(x - x_i)^2 + (t_0 - R)^2 = R^2 \text{ или } x^2 - 2x_ix + (x_i)^2 + (t_0)^2 - 2t_0R + R^2 = R^2.$$

Найдём корни этого квадратного уравнения:

$$x_{1,2}^{(i)} = \frac{2x_i \pm \sqrt{4x_i^2 - 4(x_i^2 + t_0^2 - 2t_0R)}}{2}.$$

Согласно рис. 1, нас интересует больший корень, соответствующий точке пересечения прямой $y = t_0$, с частью дуги окружности с точками, абсциссы которых больше x_i . Тогда

$$x_1^{(i)} = \frac{2x_i + \sqrt{4x_i^2 - 4(x_i^2 + t_0^2 - 2t_0R)}}{2} = \frac{2x_i + \sqrt{8t_0R - 4t_0^2}}{2} = x_i + \sqrt{2t_0R - t_0^2} \quad (5)$$

Получена абсцисса точки пересечения, перейдём к определению значений параметра t при интегрировании от точки $x_1^{(i)}$ до x_i^* (рис. 3):

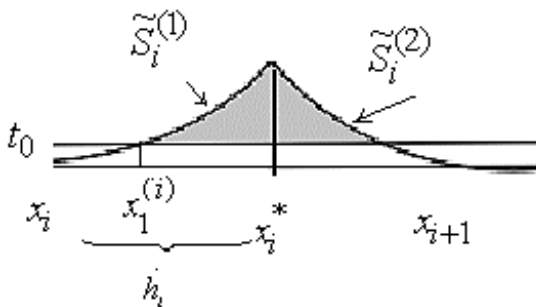


Рис. 3. Площадь участка, недосягаемого для манипуляторной лесозаготовительной машины \tilde{S}_i

1) Точке $x_1^{(i)}$ в силу (5) соответствует значение

$$\begin{aligned} t_1 &= -\arccos\left(\frac{x_i^* - (x_i + \sqrt{2t_0R - t_0^2})}{R}\right) \\ &= -\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right). \end{aligned}$$

2) Точке x_i^* соответствует значение (как и прежде) $t_2 = -\arccos\frac{h_i}{R}$.

Таким образом,

$$t \in \left[-\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right); -\arccos\frac{h_i}{R} \right]. \quad (6)$$

Тогда, с учётом (1), (5) и правил вычисления площадей криволинейных трапеций, получаем

$$\tilde{S}_i^{(1)} = R^2 \left(\cos t - \frac{t}{2} + \frac{\sin 2t}{4} \right) \Big|_{-\arccos\frac{h_i}{R}}^{-\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right)} - S_2,$$

где S_2 – площадь прямоугольника, ограниченного сверху прямой $y = t_0$, снизу осью Ox , и прямыми $x = x_i^*$, $x = x_1^{(i)}$:

$$S_2 = (x_i^* - x_1^{(i)}) \cdot t_0 = \left(x_i^* - (x_i + \sqrt{2t_0R - t_0^2}) \right) \cdot t_0 = (h_i - \sqrt{2t_0R - t_0^2}) \cdot t_0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_i^{(1)} &= R^2 \left(\cos\left(-\arccos\frac{h_i}{R}\right) + \frac{\arccos\frac{h_i}{R}}{2} + \frac{\sin\left(-2\arccos\frac{h_i}{R}\right)}{4} \right) - \\ &- R^2 \left(\cos\left(-\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right)\right) + \frac{\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right)}{2} + \frac{\sin\left(-2\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right)\right)}{4} \right) - S_2. \end{aligned}$$

Из последнего, с учётом (7), в силу чётности функций $y = \cos x$, $y = \arccos x$, нечётности $y = \sin x$, выполнения $\cos(\arccos x) = x$ при $x \in [-1; 1]$, получаем

$$\begin{aligned} \tilde{S}_i^{(1)} &= R^2 \left(\frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R} + \frac{1}{2} \left(\arccos\frac{h_i}{R} - \arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right) \right) - \right. \\ &- \frac{1}{4} \left(\sin\left(2\arccos\frac{h_i}{R}\right) - \sin\left(2\arccos\left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R}\right)\right) \right) \left. \right) - (h_i - \sqrt{2t_0R - t_0^2}) t_0. \end{aligned}$$

С учётом того, что $\tilde{S}_i^{(1)} = \tilde{S}_i^{(2)}$, приходим к расчётной формуле

$$\tilde{S}_i = 2R\sqrt{2t_0R - t_0^2} + R^2 \left(\arccos \frac{h_i}{R} - \arccos \left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R} \right) - \frac{R^2}{2} \left(\sin \left(2 \arccos \frac{h_i}{R} \right) - \sin \left(2 \arccos \left(\frac{h_i}{R} - \frac{\sqrt{2t_0R - t_0^2}}{R} \right) \right) \right) \right) - 2t_0 \left(h_i - \sqrt{2t_0R - t_0^2} \right). \quad (8)$$

Пример 2. Проведём расчёт недостижимой для ЗСУ площади для первой области S_0 , показанной на рис. 2, в случае $R=10$ м, $l_0 = 7,5$ м ($x_1 = l_0 = 7,5$ м) и $t_0 = 0,5$ м.

В *примере 1* было найдено значение $x_0^* = 3,75$ м, $h_0 = 3,75$, $\frac{h_0}{10} = 0,375$, $\arccos \frac{h_0}{10} = 1,1864$. Вычислим $\sqrt{2t_0R - t_0^2} = \sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 10 - 0,5^2} = 3,122$

Тогда, согласно расчётной формуле (8), получаем

$$\tilde{S}_0 = 2 \cdot 10 \cdot 3,122 + 100 \cdot (1,1864 - 1,5080) - 50 \cdot (0,6953 - 0,125) - 2 \cdot 0,5 \cdot (3,75 - 3,122) = 1,16115 \text{ м}^2.$$

Для получения окончательного результата надо полученную величину удвоить:

$$2\tilde{S}_0 = 2 \cdot 1,16115 = 2,322 \text{ м}^2.$$

Замечание. Может возникнуть вопрос о наибольшем значении t_0 , при котором останется неохваченная область. Для этого рассмотрим условие:

$$x_i + \sqrt{2t_0R - t_0^2} \leq x_i^*,$$

тогда $\sqrt{2t_0R - t_0^2} \leq h_i$ или $2t_0R - t_0^2 \leq h_i^2$.

Окончательно приходим к неравенству

$$t_0^2 - 2t_0R + h_i^2 \geq 0,$$

Литература

1. Гороховский К.Ф., Калиновский В.П., Лившиц Н.В. Технология и машины лесосечных и лесоскладских работ : учеб. пособие для вузов по спец. «Лесоинж. Дело» / К.Ф. Гороховский, В.П. Калиновский, Н.В. Лившиц. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 384 с.
2. Лаптев А.В., Макаренко А.В., Быковский М.А. Определение зоны эффективной работы многооперационной лесозаготовительной машины манипуляторного типа // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 170–172.
3. Лаптев А.В. Параметры рабочей позиции многооперационной машины манипуляторного типа // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2013. № 1. С. 85–90.
4. Макаренко А.В. Эффективность применения лесозаготовительных машин с манипулятором на лесосеке // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 120–135.
5. Попиков П.И., Евсиков И.Д., Путятин П.А., Полумиско А.А. Повышение эффективности технологий и лесотранспортных машин манипуляторного типа // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: инновационные разработки и исследования. Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж, 2024. С. 49–53.

из которого следует зависимость t_0 от h_i , R :

$$\begin{cases} t_0 \leq \frac{2R - \sqrt{4R^2 - 4h_i^2}}{2}, \\ t_0 \geq \frac{2R + \sqrt{4R^2 - 4h_i^2}}{2} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} t_0 \leq R - \sqrt{R^2 - h_i^2}, \\ t_0 \geq R + \sqrt{R^2 - h_i^2}. \end{cases}$$

Выберем значения t_0 , при которых мы будем оставаться внутри полосы (см. рис. 2), нас будет интересовать случай $t_0 \leq R - \sqrt{R^2 - h_i^2}$.

Так, для данных из *примера 2* при $R=10$ м, $l_0 = 7,5$ м, $h_1 = 3,75$ получаем:

$$t_0 \leq 10 - \sqrt{10^2 - 3,75^2} \leq 0,73 \text{ м}.$$

При больших значениях отступа ($t_0 > 0,73$ м) неохваченной области \tilde{S}_0 не будет.

Таким образом, предложены расчётные формулы (4), (8) вычисления площадей участка, недостижимых для ЛЗМ.

Заключение. Предложенная математическая модель для расчёта ширины недоступных для манипуляторной ЛЗМ в различных древостоях с учётом расстояния переезда может использоваться для принятия решения в различных условиях лесоводственных и технологических ограничений при определении ширины пасеки разрабатываемой многооперационной машины. В качестве возможных ограничений могут использоваться: отсутствие недостижимых для манипулятора участков, максимальная рабочая площадь на рабочей стоянке или максимальный объём пакетов древесины, формируемых на рабочей стоянке.

6. Герц Э.Ф., Безгина Ю.Н., Иванов В.В., Крюк В.И. Вероятность заготовки деревьев при выборочных рубках манипуляторной машиной // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 2 (49). С. 40–42.
7. Dorokhov A., Kirsanov V., Pavkin D., Shilin D., Shestov D., Ruzin S. Calculation of the manipulator's kinematic model and mounting points of the drive equipment // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1072. С. 339–348.
8. Bahadirov G.A., Rakhimov F.R. Analysis of the relationship between the transfer of the mechanism of the multi-operating machine // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. С. 213–220.
9. Nesmiyanov I.A., Nikolaev M.E., Sharipov R.V. Justification of parameters of the executive drive of a robotic manipulator of a loading and transport unit // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" 2021. С. 012032.
10. Азаренок В.А., Залесов С.В. Экологизированные рубки леса : учеб. пособие. Екатеринбург, 2015. 97 с.
11. Виногоров Г.К. Технология лесозаготовок. М. : Лесная промышленность. 1984. 296 с.

12. Мехренцев А.В., Азаренок В.А., Герц Э.Ф., Залесов С.В. Сортиментная заготовка древесины // Сер. Высшее образование: Бакалавриат. М., 2021. 140 с.
13. Рябухин П.Б. Оптимизация параметров технологических процессов лесопромышленного комплекса дальнего востока на принципах устойчивого лесопользования // дис. ... д-ра техн. наук / Брат. гос. ун-т. Братск, 2008. 383 с.
14. Уразова А.Ф., Азаренок В.А., Герц Э.Ф. Оценка воздействия технологий заготовки древесины на окружающую среду // Екатеринбург, 2020. 122 с.
15. Безгина Ю.Н., Герц Э.Ф., Залесов С.В., Теринов Н.Н., Уразова А.Ф. Рациональные параметры технических элементов пасаки для манипуляторных лесозаготовительных машин // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т. 36. № 4. С. 338–343.
16. Кавалюнене Д.К. Типы размещения деревьев в свете закономерностей роста и производительности древостоев // Тез. науч. конф. Каунас, 1985. С. 40–41.
17. Рябухин П.Б., Рябухин А.П. Как повысить эффективность эксплуатации лесозаготовительных машин // В сборнике: Философия современного природопользования в бассейне реки Амур. Мат-лы VII Междунар. науч.-практ. конф. Тихоокеанский государственный университет. 2018. С. 11–15.
18. Герц Э.Ф. Теоретическое обоснование технологий рубок с сохранением лесной среды (на примере Уральского региона): дис. ... д-ра техн. наук / Екатеринбург : УГЛТА. 2004. 38 с.
6. Hertz E.F., Bezgina Yu.N., Ivanov V.V., Kruk V.I. Probability of tree harvesting during thinning by manipulator machine // Forests of Russia and management in them. 2014. № 2 (49). С. 40–42.
7. Dorokhov A., Kirsanov V., Pavkin D., Shilin D., Shestov D., Ruzin S. Calculation of the manipulator's kinematic model and mounting points of the drive equipment // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1072. С. 339–348.
8. Bahadirov G.A., Rakhimov F.R. Analysis of the relationship between the transfer of the mechanism of the multi-operating machine // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. С. 213–220.
9. Nesmiyanov I.A., Nikolaev M.E., Sharipov R.V. Justification of parameters of the executive drive of a robotic manipulator of a loading and transport unit // In Proceedings: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production" 2021. С. 012032.
10. Azarenok V.A., Zalesov S.V. Ecologized logging // Study guide / Ekaterinburg, 2015. 97 с.
11. Vinogorov G.K. Technology of logging. M. Lesnaya Promyshlennaya Industriya. 1984. 296 с.
12. Mehrentsev A.V., Azarenok V.A., Hertz E.F., Zalesov S.V. Sorting timber harvesting // Ser. Higher Education: Bachelor's Degree. Moscow, 2021. 140 с.
13. Ryabukhin P.B. Optimization of the parameters of the technological processes of the forest-industrial complex of the Far East on the principles of the sustainable forest management (in Russian) // Dissertation for the degree of doctor of technical sciences / Brat. gos. un-ts. Bratsk, 2008. 383 С.
14. Urazova A.F., Azarenok V.A., Hertz E.F. Assessment of the impact of timber harvesting technologies on the environment // Ekaterinburg, 2020. 122 с.
15. Bezgina Y.N., Hertz E.F., Zalesov S.V., Terinov N.N., Urazova A.F. Rational parameters of technical elements of apiary for manipulator logging machines // Conifers of the boreal zone. 2018. Т. 36. № 4. С. 338–343.
16. Kavalyunene D.K. Types of tree placement in the light of regularities of growth and productivity of stands // Thes. of scientific conference Kaunas, 1985. Pp. 40–41.
17. Ryabukhin P.B., Ryabukhin A.P. How to increase the efficiency of forest machines operation // In collection: Philosophy of modern nature management in the Amur River basin. materials of the VII international scientific-practical conference. Pacific State University. 2018. Pp. 11–15.
18. Hertz E.F. Theoretical substantiation of logging technologies with preservation of forest environment (by the example of the Ural region): dissertation ... doctor of technical sciences / Ekaterinburg: UGLTA. 2004. 38 p.

References

1. Gorokhovskiy K.F., Kalinovskiy V.P., Livshits N.V. Technology and machines of forest cutting and timber harvesting works : Textbook for universities on specialty "Lesoinzh. Business" / K.F. Gorokhovskiy, V.P. Kalinovskiy, N.V. Livshits. M. : Lesn. promst, 1980. 384 с.
2. Laptev A.V.; Makarenko, A.V., Bykovskiy M.A. Determination of the effective operation zone of a multi-operational logging machine of manipulator type // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2015. № 6. С. 170–172.
3. Laptev A.V. Parameters of the working position of a multi-operational manipulator-type machine // Bulletin of the Moscow State University of Forestry – Forestry Bulletin. 2013. № 1. С. 85-90.
4. Makarenko A.V. Efficiency of the forest machine application with a manipulator at the harvesting area (in Russian) // Izv. of higher education institutions. Lesn. zhurn. 2023. № 4. С. 120–135.
5. Popikov P.I., Evsikov I.D., Putyatin P.A., Polumisko A.A. Improving the efficiency of technology and forest transportation machines of manipulator type // In Proceedings: Modern forestry complex of the country: innovative developments and research. Materials of the All-Russian scientific-practical conference. Voronezh, 2024. С. 49–53.