

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКАЕМОСТИ ДРЕВОСТОЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНОЙ

Ушницкий А.А.

ФГБОУ ВПО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, e-mail: docalexus@mail.ru

---

Немаловажным критерием результативности проведения рубок промежуточного пользования является выполнение запланированной программы рубок, успешная реализация которой подразумевает удаление всех намеченных в рубку нежелательных деревьев при минимальной площади технологических коридоров и минерализации лесной почвы. При рубках без прокладки технологических коридоров эта задача сводится к установлению доступности насаждения к освоению в зависимости от таксационных характеристик древостоя и конструктивных параметров применяемой машины. Отсутствие технологических коридоров и минимальное повреждение лесной почвы при проведении рубок промежуточного пользования ведет к повышению продуктивности насаждений. Это возможно при применении технологии, основанной на использовании малогабаритной лесной техники. Проведенное имитационное моделирование проницаемости насаждения малогабаритным транспортным средством позволяет прогнозировать доступность насаждений к освоению.

---

Ключевые слова: рубки промежуточного пользования, проницаемость насаждения, имитационное моделирование, активный многофакторный эксперимент.

## SIMULATION MODELING OF GROWING PENETRATION OF SMALL-SIZE TRANSPORT MACHINE

Ushnitskiy A.A.

Yakutsk state academy of agriculture, Yakutsk, e-mail: docalexus@mail.ru

---

An important criterion for the effectiveness of intermediate felling is the implementation of the planned program of felling, the successful implementation of which involves the removal of all planned for felling trees with a minimum of unwanted areas of technological corridors and mineralization of forest soil. When logging without laying technological corridors, this problem reduces to establishing the availability of spaces for development, depending on the taxation characteristics of the stand and the design parameters of the machine used. A lack of technological corridors and minimum damage of the forest soil during intermediate felling leads to increased productivity of plantation. It is possible when applying the technology based on the of compact forest machines. The conducted simulation of permeation of planting using small vehicles allows predicting the availability of forest land.

---

Keywords: intermediate felling, permeability of plants, simulation modeling, active complex experiment.

Доступность насаждения к освоению можно охарактеризовать проницаемостью, под которой понимается вероятность существования траектории перемещения машины из одной точки в другую, по условиям не пересечения определенной габаритной полосы движения и повреждения стволов произрастающих деревьев [3, 4].

Обзор работ в данном направлении [1, 4, 5] показывает, что неплохие результаты по определению проницаемости насаждения могут быть получены с помощью имитационного моделирования движения машины, с расхождением между теоретическими и экспериментальными данными не более 8 %. Однако применение существующих моделей для малогабаритных лесных машин не представляется возможным из-за их конструктивной специфики.

Рассмотрим модель движения малогабаритной одноосной машины с длинномерным грузом под пологом леса. Имитационную модель движения машины можно свести к решению задачи о плоскопараллельном движении твердого тела среди случайно распределенных препятствий, что подразумевает поэтапное решение следующих задач:

1. Генерирование пространственной структуры древостоя.
2. Математическое описание траектории движения максимально удаленных друг от друга двух точек машины, одна из которых, в соответствии с курсом теоретической механики, принимается за полюс.

В практике лесной таксации, при определении среднего расстояния между деревьями исходят из случайно-равномерного расположения деревьев на лесном участке. Поэтому, на первом этапе в декартовой системе координат генерируется  $n$  случайных точек с координатами  $(x_i; y_i)$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ . При этом некоторые точки могут оказаться в непосредственной близости друг к другу, так как их распределение на данном этапе совершенно случайно. Если точки рассматривать как деревья, то, учитывая законы естественного отбора, такая ситуация будет далека от реальности. В этом случае для более естественного расположения деревьев необходимо потребовать, чтобы каждое дерево было локализовано от своих соседей на определенном расстоянии, в результате чего и достигается случайно-равномерное распределение [2].

Для математического описания траектории движения машины представим ее в виде отрезка конечной длины, равного длине машины с грузом. Ширину (колею) машины, во избежание излишней громоздкости модели, удобнее задавать увеличенным на определенную величину диаметром деревьев [4].

Примем следующие допущения:

- 1) поворот происходит вокруг мгновенного центра скоростей, в качестве которого принимается вершинный отрез хлыста, на который опирается машина, а перемещение и скорость точек корпуса машины пропорциональны их удалению от точки опоры хлыста на опорную поверхность;
- 2) при повороте в области сцепки тягово-энергетического и грузонесущего модулей отсутствует степень свободы в горизонтальной плоскости;
- 3) при отсутствии препятствий движение машины параллельно оси ординат.

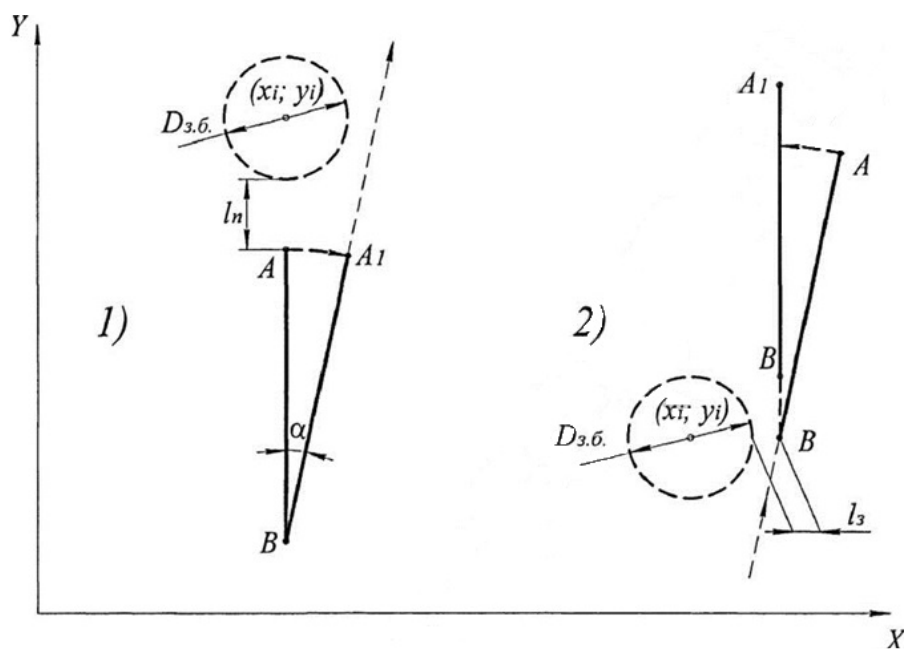


Рис. 1. Расчетная схема траектории машины при объезде дерева

Первое допущение принимаем для достижения естественной стратегии оператора по оцениванию возможной траектории движения заблаговременно до встречи с препятствием, при этом расстояние, остающееся между машиной и деревом, компенсирует занос хлыста при повороте и исключает пересечение необходимой зоны безопасности вокруг каждого дерева.

Второе допущение принимаем из-за сравнительно малого расстояния от вертикальной оси управляемых движителей до узла сцепки, с грузонесущим модулем по сравнению с общей длиной машины.

Третье допущение необходимо для минимизации траектории движения.

Моделирование движения производим следующим образом. При встрече с препятствием, машина заранее, не дожидаясь столкновения, начинает поворачивать на некоторый достаточно малый угол попеременно в обе стороны до тех пор, пока абсцисса точки A (начало машины) не совпадет абсциссой, максимально удаленной от центра дерева точкой зоны безопасности и занимает положение со следующими координатами:

$$x_{A_1} = x_A + L \sin \alpha; \quad (1)$$

$$y_{A_1} = y_A - L \cos \alpha, \quad (2)$$

где  $x_{A_1}$  и  $y_{A_1}$  – абсцисса и ордината начала машины при повороте на угол  $\alpha$ , м;  $x_A$  и  $y_A$  – абсцисса и ордината первоначального положения точки A, м;  $L$  – длина машины с грузом, м;  $\alpha$  – угол поворота, град.

Затем, путем последовательного приращения  $\Delta y$  машина начинает прямолинейное движение, при этом траектории начальной и конечной точек описываются уравнениями:

$$x_A = x_{A-1} + \Delta y \sin \alpha; \quad (3)$$

$$y_A = y_{A-1} + \Delta y \cos \alpha; \quad (4)$$

$$x_B = x_{B-1} + \Delta y \sin \alpha; \quad (5)$$

$$y_B = y_{B-1} + \Delta y \cos \alpha, \quad (6)$$

где  $(x_A; y_A)$  – текущие координаты точек  $A$  и  $B$ , м;  $(x_{A-1}; y_{A-1})$  и  $(x_{B-1}; y_{B-1})$  – предыдущие координаты точек  $A$  и  $B$ , м;  $\Delta y$  – приращение по оси ординат, м.

Движение продолжается до совпадения ординат точки  $B$  и центра дерева, после чего происходит выравнивание машины до равенства абсцисс начала и конца машины. Далее, для минимизации длины траектории движения, машина последовательно поворачивает на малый угол в противоположную началу поворота сторону, одновременно передвигаясь вверх по оси ординат до тех пор, пока абсциссы точки  $B$  и вертикальной оси полосы движения не будут равны, при этом после каждого приращения проверяется условие допустимости нового положения.

В общем случае, при объезде препятствия, центр которого совпадает с траекторией движущейся параллельно оси ординат машины, расстояние, остающееся между машиной и зоной безопасности, максимально и определяется из следующего выражения:

$$l_3 = [L(1 - \cos \alpha) + D_{з.б.} + l_n] \operatorname{tg} \alpha; \quad (7)$$

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{D_{з.б.}}{2L} \right), \quad (8)$$

где  $D_{з.б.}$  – диаметр зоны безопасности, м;  $l_n$  – расстояние, остающееся между машиной и деревом в момент принятия решения о необходимости поворота, м.

По мере удаления траектории движения от центра тяжести дерева  $l_3$  убывает обратно пропорционально, достигая минимального значения при движении машины по касательной к препятствию, что позволяет в качестве диаметра зоны безопасности принимать сумму значений диаметра дерева и ширины (колеи) машины.

Для реализации процесса движения машины в насаждении была составлена программа на языке программирования Delphi.

Целью имитационного моделирования является определение зависимости проникаемости насаждения от конструктивных параметров машины (длины, колеи) и таксационных характеристик древостоя (густоты, диаметра деревьев).

Для решения поставленной цели проведена серия активных многофакторных экспериментов. В качестве структурной модели матрицы планирования выбран полный факторный эксперимент типа  $3^3$ .

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Обозначение		Уровни варьирования		
	натуральное	кодированное	-1	0	+1
Густота, шт./га	$n$	$x_1$	300	450	600
Колея, м	$b$	$x_2$	0,9	1,15	1,4
Длина машины, м	$L$	$x_3$	5	9	13

Минимизация суммы квадратов, характеризующих расхождение между экспериментальными точками и значениями выходного параметра, вычисленными по уравнению регрессии, после исключения незначимых эффектов, позволила получить следующую регрессионную модель в натуральных обозначениях факторов:

$$\eta = 612,4 - 0,7n - 558,78b - 10,87L + 3,31 \cdot 10^{-4}n^2 + 0,28n \cdot b + 127,2b^2 + 7,58b \cdot L. \quad (9)$$

Адекватность модели исходным данным, близкий к 100 % коэффициент детерминации  $R = 98$  % и сравнительно низкая ошибка выходного параметра  $S_e = 3$  % дают все основания полагать, что полученная регрессионная модель имеет неплохие прогностические свойства, и ее использование для анализа доступности насаждения к освоению будет сопровождаться минимальным риском принятия ошибочного решения.

### Список литературы

1. Герасимов, Ю.Ю. Экологическая оптимизация технологических процессов для лесозаготовок / Ю.Ю. Герасимов, В.С. Сянев. – Йоэнсуу : Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1998. – 178 с.
2. Ушницкий, А.А. Обоснование параметров малогабаритной тягово-транспортной машины для рубок промежуточного пользования: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.01 / А.А. Ушницкий; Сибирский гос. технологический университет. – СибГТУ, 2006. – 25 с.
3. Ширнин, Ю.А. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины / Ю.А. Ширнин, Е.М. Онучин // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2003. – № 4. – С. 65-71.
4. Ширнин, Ю.А. Результаты имитационного моделирования движения колесной лесной машины по ленте леса / Ю.А. Ширнин, Е.М. Онучин // Лесн. вестн. – 2003. – № 5. – С. 107-114.
5. Ширнин, Ю.А. Имитационное моделирование движения многооперационной лесной машины / Ю.А. Ширнин, Е.М. Онучин // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2003. – № 4. – С. 65-71.

### Рецензенты:

Самсонова И.В., д.э.н., доцент, главный консультант, Общество с ограниченной ответственностью «Малое инновационное предприятие «Агрикон», г. Якутск;

Исаев А.П., д.б.н., зав. лабораторией, лаборатория мерзлотного лесоведения Института биологических проблем СО РАН, г. Якутск.