

Мясников Евгений Анатольевич, доцент кафедры общепрофессиональных и гуманитарных дисциплин, Хабаровский институт инфокоммуникаций, г. Хабаровск

РАСЧЁТ ПРОХОДИМОСТИ ЛЁГКОГО ВЕЗДЕХОДА В ЛЕСИСТОЙ МЕСТНОСТИ

Аннотация. В статье предложен новый способ расчёта вероятности перемещения (проходимости) лёгкого трёхколёсного вездехода в лесной местности. Метод позволяет учесть высокую манёвренность вездехода и основан на авторском алгоритме разбиения серии независимых испытаний. Уточнены результаты предыдущих исследований, полученные при серьёзных ограничениях, и показана высокая возможность передвижения в достаточно сложных условиях. Изучено влияние условий движения и параметров вездехода на вероятность прохождения леса. Рассмотрен вопрос о зависимости проходимости от ширины колеи вездехода и предложены способы решения обратной задачи. Указаны границы применимости метода.

Annotation. In this article we proposed some new method of calculation of a movement probability (cross-country ability) of a light three-wheeled all-terrain vehicle. The method permits us to take into account a high shunt ability of vehicle. It based on author's algorithm of dividing of Bernulli series of independent tests. The results of preceeding investigations which received under sufficient restrictions are specified, and the high possibility of movement in seriously hard conditions is demonstrated. We investigate a relation of cross-country ability from movement conditions and vehicle parameters. The question of dependence of cross-ability from the vehicle rut width is considered. Some methods of a revers task solving are proposed. The boundaries of application of method are given.

Ключевые слова: лёгкий вездеход, трёхколёсный вездеход, проходимость, ширина колеи, плотность деревьев, вероятность, серия испытаний Бернулли.

Keywords: light all-terrain vehicle, three-wheeled vehicle, cross-country ability, rut width, tree density, probability, Bernulli test series.

Введение

Лёгкие колёсные вездеходы, на актуальность которых в условиях таёжных лесов указывают многие авторы [1, с.17-23], от обычных вездеходов отличает высокая экологичность. Вездеход должен сохранять не только травяной покров и почву (что достигается применением шин сверхнизкого давления), но и деревья и кустарники. Контакт с такими препятствиями сводится к минимуму за счёт подбора ширины и длины вездехода. Небольшой вездеход должен перемещаться по лесу, не сталкиваясь с деревьями.

Однако от размеров вездехода зависят грузоподъёмность и устойчивость, и важен вопрос об оптимальных размерах, когда он, с одной стороны, может везти пассажиров, грузы и ценные лесные продукты, а с другой – легко вписывается в окружающую обстановку, свободно проходя между деревьями.

В [2] поставлена математическая задача: по ширине колеи вездехода найти вероятность его перемещения по лесу на необходимое расстояние, и дано решение, основанное на вычислении необходимой для манёвра площади.

Решение рассмотрено в [3, с. 47-53] и [4, с.36-41] и уточнено в [5].

Также в [2-5] изучена обратная задача о подборе ширины колеи по вероятности перемещения на любое расстояние.

При поворотах важна длина вездехода. Учитывается плотность деревьев, центры которых распределены по закону Пуассона. Менее важна, но тоже учитывается толщина деревьев.

В [6, с. 61] отмечено, что исследование зависимости движения вездехода от его параметров и условий находится в неудовлетворительном состоянии.

Все решения предложены при сильном ограничении манёвренности, когда вездеход из каждой точки движется только прямо или с максимальным поворотом. Но вездеход чаще поворачивает на небольшие углы, что не требует крупных площадей для манёвра, и игнорирование этого занижает вероятность перемещения и при проектировании размеры вездехода будут занижены.

В [7] и [8] предложен новый подход к решению, позволяющий учесть высокую манёвренность вездехода и рассмотрены случаи движения от одной полосы леса к другой, а для трёхколёсного вездехода – также от одного сектора леса к другому, но с некоторыми геометрическими упрощениями.

В данной статье продолжено изучение движения трёхколёсного вездехода, более перспективного, по мнению ряда авторов [1, с.17-23 и источники] для дальневосточных лесов. Уточнены площади, доступные и необходимые для манёвра, и найдены некоторые характеристики проходимости в зависимости от ширины колеи и плотности деревьев.

Движение вездеходов прямоугольной формы и вездеходов с шарнирной рамой требует отдельного изучения, и результаты будут предложены позже.

Постановка задачи и идея решения

Известны ширина колеи вездехода b , длина вездехода a , плотность деревьев на участке ρ , средняя толщина деревьев d , шаг (расстояние, которое необходимо преодолеть) l . Параметр ρ измеряется в $ед/м^2$, остальные – в $м$. Также известен предельно возможный поворот переднего колеса α_{max} .

Надо найти: вероятность перемещения вездехода

- на расстояние l (проходимость);
- по лесу независимо от расстояния (общую проходимость).

Вездеход находится в некоторой точке леса и выбирает направление очередного перемещения на расстояние l . Он может повернуть влево или вправо в пределах α_{max} (в том числе поехать прямо).

Основание вездехода – его задняя ось. Ось переднего колеса – обычная ось, перпендикулярная ему. Для поворота вездехода на угол α оси также образуют между собой угол α за счёт поворота передней оси (рисунок 1).

При повороте все точки вездехода движутся по дугам, центры кривизны которых – пересечение линии основания и линии оси переднего колеса.

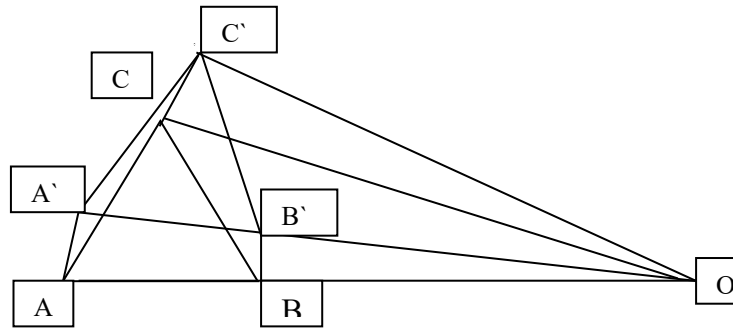


Рисунок 1. Поворот треугольного вездехода, [5]

Перемещение (сдвиг) вездехода на расстояние l – это перемещение середины основания по дуге длины l .

При небольшом l расстояние по дуге почти совпадает с расстоянием по прямой, но формулы расчёта площадей выглядят проще.

Под доступной площадью $S_{дост}$ понимаем часть леса, в которой после сдвига на l и повороте в пределах α_{max} окажется хотя бы одна точка вездехода. Под $S_{ср}$ – площадь, необходимую для сдвига при конкретном значении угла.

В отличие от метода полос [8], при повороте $S_{дост}$ и $S_{ср}$ зависят от формы. Для треугольного вездехода в [8] оценки $S_{дост} = \alpha_{max}(a+l)^2 + bl$ и $S_{ср} = (b+d)l$ позволили быстро выполнить расчёты, но с завышением вероятности. Проведём более точные вычисления и сравним с результатами [5, 8].

Расчёт площади, доступной вездеходу на одном шаге

В системе координат, связанной с центром поворота O (рисунок 1), если ось OX направить в сторону задней оси, а ось OY – вверх, координаты переднего колеса выглядят как $C_x = a \operatorname{ctg} \alpha$, $C_y = a$, где α – угол поворота.

В обозначениях рисунка 1 $\alpha = \angle AOC$, $\beta = \angle AOA'$, $\beta = \frac{l}{a} \operatorname{tg} \alpha$.

После перемещения вездехода координаты примут вид

$$\begin{pmatrix} C'_x \\ C'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \operatorname{ctg} \alpha \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(\operatorname{ctg} \alpha \cos \beta - \sin \beta) \\ a(\operatorname{ctg} \alpha \sin \beta + \cos \beta) \end{pmatrix},$$

или, что тоже самое, $C'_x = \frac{a}{\sin \alpha} \cos(\alpha + \beta)$, $C'_y = \frac{a}{\sin \alpha} \sin(\alpha + \beta)$, что легко получить геометрически. В системе координат, связанной с серединой основания, координаты выглядят как

$$C_x^n = a \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}, \quad C_y^n = a \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}.$$

Выясним, как выглядит кривая, задаваемая такими уравнениями, когда угол меняется от 0 до α_{\max} . На рисунках 2 и 3 отмечено окончательное положение переднего колеса при увеличении правого поворота от 0 до 70° .

Длина вездехода – 3 м, ширина на положение колеса не влияет. Сдвиг составляет соответственно 1 м и 3 м. При пропорциональном изменении длины вездехода и сдвига координаты точек изменятся пропорционально с сохранением формы кривой.

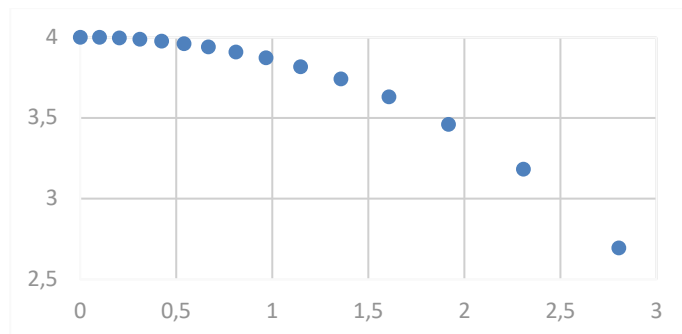


Рисунок 2. Положение переднего колеса при сдвиге вездехода на 1 м

Координаты по вертикали отсчитываются от середины основания. Ниже линии $y = 2,5$ колесо при сдвиге на 1 м не оказывается.

Необычное поведение колеса на рисунке 3 вызвано тем, что при таком сочетании угла и перемещения вездеход просто повернёт в обратную сторону.

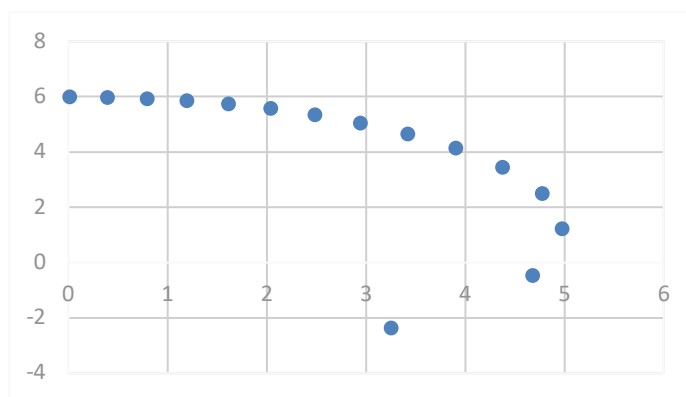


Рисунок 3. Положение переднего колеса при сдвиге вездехода на 3 м

Рисунок 3 показывает, что следует осторожно проводить расчёты при больших углах поворота, поскольку фактический результат движения может быть далёк от предполагаемого. При ведущем переднем колесе большой поворот приведёт к движению по спирали вокруг начального положения. При ведущих задних колёсах, что обычно соответствует действительности, сильно повёрнутое переднее колесо и вовсе не позволит сдвинуться с места.

При $\alpha \geq \gamma$, где $\gamma = \arctg(2a/b)$ – угол при основании вездехода, колесо повернётся под острым углом к боковой стороне (к направлению на заднее колесо), центр поворота окажется на задней оси, и движение прекратится.

Большие повороты в основном нужны для оперативного объезда помех или резкой смены направления, для расчёта площадей достаточны $\alpha_{\max} \approx 60^\circ$.

На рисунке 4 можно сравнить, как двигалось бы переднее колесо в предположениях [8], останавливаясь на границе сектора радиуса $a+l$, и где

оно окажется на самом деле. При перемещении вездехода на 1 м погрешность намного меньше толщины колеса.

Система координат по-прежнему связана с серединой основания.

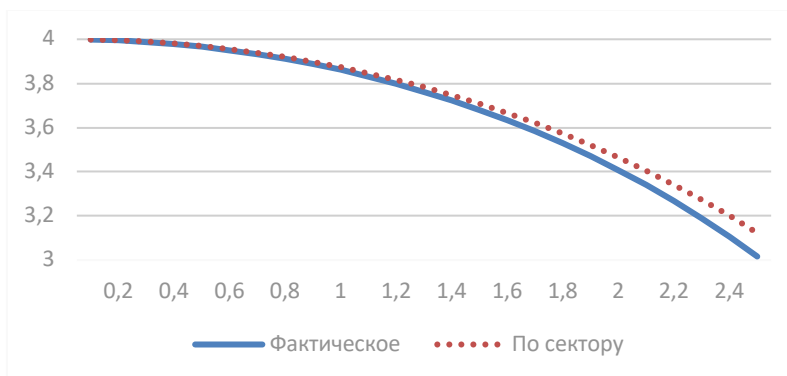


Рисунок 4. Положение переднего колеса при сдвиге вездехода на 1 м

Смещение по горизонтали на 1,5 м, где графики начинают расходиться, соответствует углу поворота 53° , смещение на 2,5 м – 67° . Представление области в виде сектора радиуса $a+l$ при $l < a/3$ незначительно завышает значение площади при редко применяемых больших углах поворота.

На рисунке 5 такое же отличие показано уже при сдвиге вездехода на 3 м. Смещение по горизонтали на 2,5 м соответствует углу поворота колеса 31° , на 5 м – углу 59° . Здесь различие заметнее – до 40%, но 3-я линия, пересекающая график фактического положения, соответствует границе сектора радиусом $0,95(a+l)$, и площади под кривыми практически совпадают. А именно это важно при оценке доступной площади.

При проезде на 1 м подобное совпадение площадей получится при уменьшении радиуса сектора на 1% – при $0,99(a+l)$.

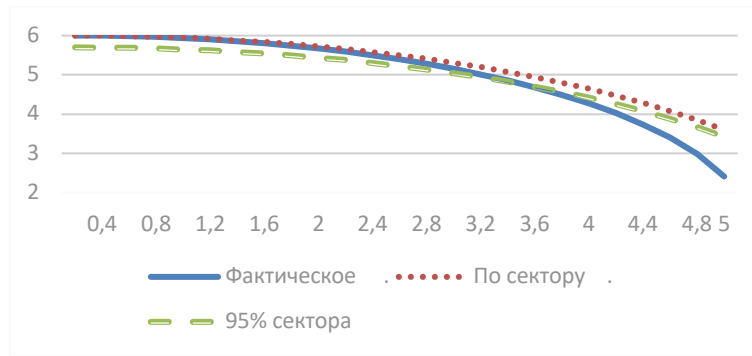


Рисунок 5. Положение переднего колеса при сдвиге вездехода на 3 м

Можно предложить при длине сдвига, не превышающей длины вездехода, и поворотах, не превышающих 60° , при выводе доступной площади брать 95% площади обычного сектора. Это не завышает площадь и одновременно позволит учесть непредвиденные помехи (пни, ямы, муравейники и др.), как раз возникающие примерно на 5% дистанции.

Перемещение заднего колеса, ближнего к центру поворота, можно считать выполняемым по дуге радиуса $a / \operatorname{tg} \alpha - 0,5b$ с углом $\beta = (l / a) \operatorname{tg} \alpha$.

Второе заднее колесо полностью попадает в площадь, образуемую при повороте в другую сторону, и не нуждается в рассмотрении.

К сектору, образуемому передним колесом, примыкает фигура $DBB'C'$ (рисунок 1), где D – середина основания.

Её оценим как трапецию со сторонами $a+l$ и $d = \beta(a / \operatorname{tg} \alpha_{\max} - 0,5b)$ (дуга, образуемая задним колесом) высотой $0,5b$. Площадь трапеции

$$S_{\text{тран}} = 0,5 \cdot 0,5b \cdot (a+l + \beta_{\max} (a / \operatorname{tg} \alpha_{\max} - 0,5b))$$

с учётом $\beta_{\max} = (l / a) \operatorname{tg} \alpha_{\max}$ можно свести к виду

$$S_{\text{тран}} = 0,25b \cdot \left(a + 2l - 0,5b \frac{l}{a} \operatorname{tg} \alpha_{\max} \right),$$

но, поскольку дуга d в несколько раз меньше, чем $a+l$, лучше пренебречь ей вовсе и оставить более осторожную оценку $S_{\text{тран}} = 0,25b(a+l)$.

При повороте в другую сторону картина симметрична, и вся площадь, доступная вездеходу

$$S_{\text{дост}} = 2(S + S) - S_{\Delta} = 0,95\alpha_{\max}(a+l)^2 + 0,5b(a+l) - 0,5ab = 0,95\alpha_{\max}(a+l)^2 + 0,5bl,$$

что незначительно меньше, чем в [8], из-за понижающего коэффициента 0,95 и осторожной оценки трапеции.

Расчёт площади, необходимой для передвижения

Движение с поворотом можно разложить на поворот относительно середины основания и на непосредственное перемещение прямо. В [5] получены формулы расчёта площадей при движении прямо и при движении под максимальным углом.

Если γ – угол при основании вездехода, α – выбранный угол поворота и $\beta = \frac{l}{a} \text{tg} \alpha$, то для поворота на угол α необходима площадь [5]

$$S_{\text{нов}} = \frac{a^2}{2} \beta - \frac{bl}{4},$$

если угол поворота $\alpha > 90^\circ - \gamma$. Если углы поворота меньше, какой-либо площади не требуется, но такие углы невелики. Так, при длине вездехода 3 м и ширине 2 м $\gamma = \text{arctg} 3 \approx 72^\circ$, что даёт всего лишь $90^\circ - \gamma \approx 18^\circ$.

Если считать углы поворота равномерно распределёнными (по модулю) от 0° до α_{\max} , то считать равномерно распределённой необходимую площадь со средним значением $S_{\text{ср нов}} = 0,25l(a \text{tg} \alpha_{\max} - b)$ уже сложнее из-за функции $\text{tg} \alpha$.

Предпочтительнее найти среднее значение площади поворота как

$$S_{\text{ср нов}} = \frac{1}{\alpha_{\max} - 0} \int_{90-\gamma}^{\alpha_{\max}} \left(\frac{a^2}{2} \frac{l}{a} \text{tg} \alpha - \frac{bl}{4} \right) d\alpha,$$

что приводит к функции

$$S_{\text{ср нов}}(\alpha_{\max}) = \frac{0,5l}{\alpha_{\max}} (a(\ln \sin \gamma - \ln \cos \alpha_{\max}) - 0,5b(\alpha_{\max} + \gamma - 0,5\pi)),$$

которую и можно принять для дальнейших расчётов.

В таблице 1 даны значения функции для вездехода длиной 3 м и шириной 2 м ($\gamma = \arctg 3 \approx 72^\circ$) при проезде на 1 м. Средняя площадь пропорциональна перемещению l , поэтому при других l достаточно умножить значения на l .

Таблица 1

Средняя необходимая площадь при допустимых угла поворота, м²

угол	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
1 м	0,0214	0,1648	0,3247	0,5112	0,7442	1,0684	1,6318

Как отмечено выше, для исследования достаточны значения α_{\max} в 50°-60°.

С учётом площади $(b + d)l$, необходимой для перемещения после поворота, средняя площадь всего участка, необходимого вездеходу на одном шаге:

$$S_{cp} = \frac{0,5l}{\alpha_{\max}} \left(a \ln \frac{\sin \gamma}{\cos \alpha_{\max}} + 0,5b(0,5\pi - \gamma) \right) + (0,75b + d)l,$$

где $\gamma = \arctg \frac{2a}{b}$, $\sin \gamma = \frac{a}{\sqrt{0,25b^2 + a^2}}$.

Важно учесть, что среднее значение относится к изменению угла, поскольку именно он меняется при движении по лесу. Исследовать влияние ширины, длины или шага вездехода надо при помощи графиков и таблиц. Фиксировать же угол поворота не имеет смысла, поскольку вездеход не обязан каждый раз поворачивать на один и тот же угол.

На рисунке 6 виден почти равномерный рост необходимой площади при изменении ширины колеи вездехода от 1,2 до 3 м. Длина вездехода – 2,8 м, предельный угол поворота – 60°. Нелинейно ширина в составе угла γ влияет на расчёт логарифма, и в основном увеличивает площадь за счёт $0,5bl$.

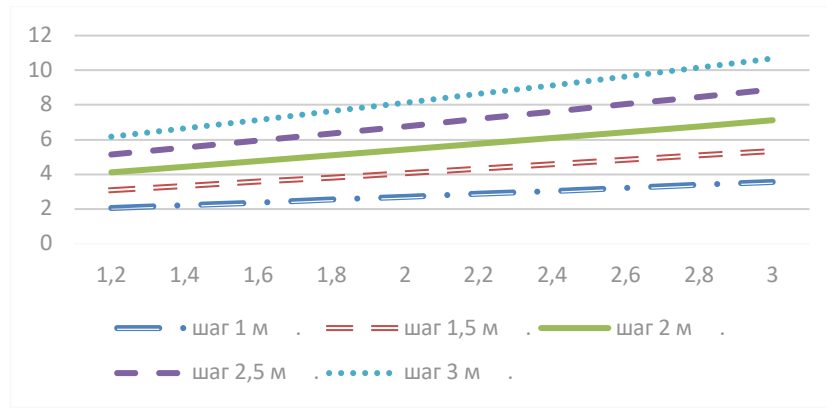


Рисунок 6. Площадь, необходимая вздеходу

Сведение к математической задаче о серии успехов

В [8] задача о перемещении сведена к задаче о вероятности **непрерывной** серии из M успехов в серии из N независимых испытаний при вероятности отдельного успеха p . Решение такой задачи предложено в [7]:

$$P_N(K \geq M) = 1 - \sum_{k=2}^N D_{N-1}^{k-1} (1-p)^k p^{N-k} + (D_N^k - D_{N-1}^{k-1}) (1-p)^{k-1} p^{N-k+1},$$

где D_x^k – число разбиений серии из x испытаний на k серий успехов, ни одна из которых не достигает по длине M . Коэффициенты находятся по формулам

а) $D_x^1 = 1$ при $1 \leq x \leq M$, $D_x^1 = 0$ при $M < x < N$,

и далее для всех $1 < k \leq x$:

б) $D_x^k = D_{x-1}^k + D_{x-1}^{k-1}$ при $1 < x \leq M+1$, $D_x^k = D_{x-1}^k + D_{x-1}^{k-1} - D_{x-M-1}^{k-1}$ при $M+1 < x < N$,

в) $D_N^k = D_{N-1}^k + D_{N-1}^{k-1} - D_{N-M-1}^{k-1} - D_{N-M}^{k-1}$.

Для решения выбираем число M от 5 до 10 и разбиваем площадь S_{cp} на M единичных участков площадью $S_0 = S_{cp} / M$ каждый. Тогда S_{ocm} разобьётся на $N = S_{ocm} / S_0$ таких участков. При $S_{ocm} / S_{cp} > 15$ достаточно взять $M = 3$.

Соотношение зависит от a, b, d, α_{max} , и при решении по алгоритму, данному в [7], число N менять удобнее, чем M . Также при округлении N до целого числа вниз вероятность занижается меньше, чем при округлении M вверх.

Для расчётов в пакетах типа Excel приемлемы значения примерно N от 20 до 50. При малых N теряется цель метода, при больших неудобны расчёты.

Под событием понимаем отсутствие центров деревьев на единичной площади S_0 . При распределении центров по закону Пуассона вероятность этого, как показано в [2] и [9, с.67], равна $P_{S_0}(0) = e^{-S_0\rho}$, где ρ – плотность деревьев. Толщина деревьев учтена в величине $(b+d)l$.

Рисунок 7 поможет выбрать M для подходящего значения N ($N = rM$) и на примере вездехода длиной 2,8 м показывает, как соотношение площадей r падает с ростом колеи и с увеличением шага. Верхний график соответствует шагу 1 м и идёт с большим отрывом от графика для шага 1,5 м, что отразится и на вероятности движения. При шаге длиннее 2 м графики неотличимы.

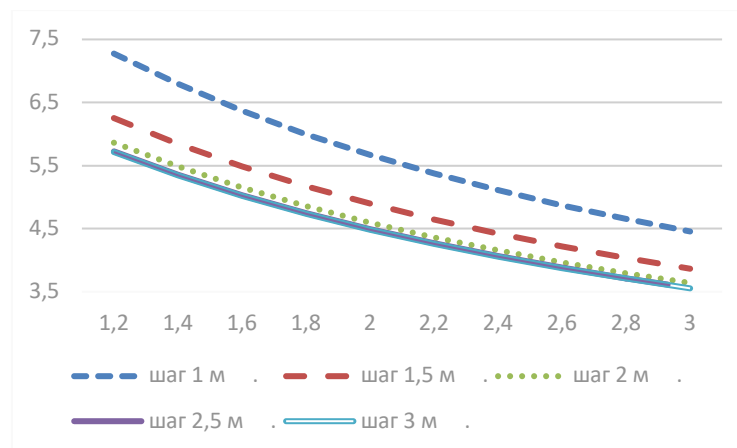


Рисунок 7. Соотношение доступной и средней необходимой площади

Пример 1. Приведём образец расчёта.

Пусть плотность деревьев $\rho = 0,2$ шт/м² при средней толщине $d = 20$ см, ширина колеи $b = 2$ м при длине вездехода $a = 2,8$ м. Какова вероятность проезда на $l = 2$ м, если вездеход способен поворачивать на угол $\alpha_{\max} = 45^\circ$?

Решение. Вездеходу доступна площадь

$$S_{\text{дост}} = 0,95 \frac{\pi}{4} (2,8 + 2)^2 + 0,5 \cdot 2 \cdot 2 \approx 19,2 \text{ м}^2,$$

Угол $\gamma = \arctg \frac{2 \cdot 2,8}{2} = \arctg 2,8 \approx 70^\circ$, или 1,22 рад, при этом $\sin 70^\circ = 0,94$, тогда

$$S_{cp} = \frac{0,5 \cdot 2}{\pi/4} \left(2,8 \ln \frac{0,94}{\cos 45^\circ} + 0,5 \cdot 2(1,5708 - 1,22) \right) + (0,75 \cdot 2 + 0,2) \cdot 2 = 4,86 \text{ м}^2,$$

из которых $1,46 \text{ м}^2$ – площадь, необходимая для поворота, $0,4 \text{ м}^2$ – запас на толщину деревьев и 3 м^2 нужны непосредственно для проезда.

Соотношение $19,2/4,86 \approx 4$, и, взяв $M = 5$, получим $N \approx 20$, что достаточно.

Итак, $M = 5$, $S_0 = 4,86/5 = 0,972$, $N = 19,2/0,972 = 19,7$ округляем вниз до 19.

Вероятность отсутствия центров деревьев на единичном участке

$$P_{0,972}(0) = e^{-0,972 \cdot 0,2} = 0,823.$$

Находим вероятность $M = 5$ успехов подряд в серии из $N = 19$ испытаний при вероятности успеха в отдельном испытании $p_1 = 0,823$.

Рассчитав по алгоритму из [7] числа D_{19}^k и D_{18}^k , находим вероятность, что в доступной площади нет 5 свободных единичных участков подряд:

$$P_{19}(K < 5) = \sum_{k=2}^{19} D_{19}^{k-1} 0,177^k 0,823^{19-k} + (D_{19}^k - D_{18}^{k-1}) 0,177^{k-1} 0,823^{20-k} = 0,04$$

и $P_{19}(K \geq 5) = 1 - 0,04 = 0,96$ – вероятность, что такие 5 участков найдутся.

Вероятность продвижения вездехода на 2 м – около 96%, что не очень много для движения на большой дистанции без её просмотра («вслепую»).

На рисунке 8 показано, как в условиях решённой задачи вероятность продвижения зависит от плотности деревьев (по горизонтали). Шансы встретить 5 свободных участков подряд среди 19 возможных выше, чем шансы, что конкретный участок свободен. Виден перегиб проходимости при плотности около 0,5, когда она падает особенно быстро. Плотности около 1 при толщине деревьев 20 см представляют лишь теоретический интерес – в таких условиях трудно передвигаться даже пешеходу.

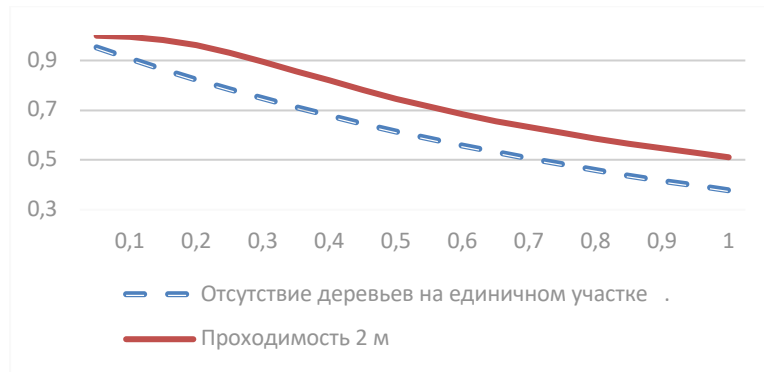


Рисунок 8. Влияние плотности на вероятность продвижения

Замечание об общей проходимости

Если вездеход с вероятностью P_l находит свободный путь в пределах сдвига l и не просматривает дальнейшую обстановку, вероятность движения на расстояние L составит $P_L = P_l^{L/l}$.

При $P_l = 1 - \varepsilon$, где $\varepsilon \rightarrow 0$, верна оценка $P_L \approx e^{-\varepsilon L/l} \approx 1 - \varepsilon L/l$ для небольших дистанций L , но при $L \rightarrow \infty$ вероятность P_L даже при таких P_l обратится в 0.

Так, для $P_{2,м} = 0,9997$ будет $P_{1км} = 0,9997^{1000/2} \approx 0,86$, или $1 - 0,0003 \cdot 500 = 0,85$, но $P_{10км} = 0,9997^{10000/2} = 0,223$, а формула $P_L \approx 1 - \varepsilon L/l$ уже неприменима и даёт $-0,5$.

Чтобы не накапливалось умножение на P_l , необходима возможность видеть дальнейший путь и при необходимости возвращаться назад [4, с.40].

Если из фиксированной точки леса возможны r независимых путей на расстояние l и $P_l > 1/r$, то общая проходимость – корень уравнения ([1], [5])

$$1 - P_* = (1 - P_l P_*)^r,$$

один из которых $P_* = 0$, и нужен максимальный действительный корень.

Можно оценить число путей как $r = S_{\text{досм}} / S_{\text{сп}}$. При $r > 3$ возможно лишь численное решение, но оно не зависит ни от содержания задачи, ни от формы вездехода, что позволяет составить таблицы P_* для r и $P_l > 1/r$.

Трудность обратной задачи определения P_l по P_* для дальнейшего поиска допустимой ширины колеи – в зависимости и P_l , и r от параметров вездехода.

Но с ростом b оба эти параметра уменьшаются (у доступной площади эластичность по ширине колеи намного меньше, чем у необходимой), и зависимость общей проходимости от ширины монотонна. Тогда можно:

- для различных комбинаций a, α_{\max} найти P_l по ширине колеи b ;
- для тех же a, α_{\max} по полученному P_l с учётом соответствующего r найти общую проходимость P_* ;
- оформить результат как зависимость P_* от b при фиксированных a, α_{\max} .

Получится набор таблиц, каждая из которых для конкретных значений длины вездехода и максимального угла поворота указывает общую проходимость в зависимости от ширины вездехода и плотности деревьев.

Толщина деревьев, как показывают расчёты, слабо отражается на общей проходимости, внося 5-10% в необходимую площадь проезда, и играет роль только при плотностях выше 1 дерева на 2 м^2 . При реальных плотностях 0,2-0,4 $\text{ед}/\text{м}^2$ её рост от 0 до 80 см уменьшает вероятность отсутствия деревьев на средней площади на 20-30%, причём практически равномерно.

При изменении толщины на $\Delta d \approx 0$ вероятность сдвига на расстояние l изменится примерно на $\Delta P = -(S_0 \rho) \cdot l \cdot e^{-S_0 \rho} \Delta d$, т.е. на $-S_0 l \rho P_{S_0}(0) \Delta d$.

В Примере 1 $P_{S_0}(0) = 0,823$ получено при $S_0 = 0,972$, $l = 2$, $\rho = 0,2$, $d = 0,2 \text{ м}$.

При толщине $d = 0,15$, т.е. при $\Delta = -0,05$, вероятность отсутствия деревьев на единичном участке растёт на $-0,972 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 0,823 \cdot (-0,05) \approx +0,019$ до 0,842.

При толщине $d = 0,25$ она на те же 0,019 падает до 0,804. Вероятность сдвига на 2 м меняется в этих двух случаях от 0,96 до 0,972 и 0,947 соответственно.

Поскольку соотношение длины дистанции L к длине шага l не имеет значения для общей проходимости, а при реальном движении шаг всегда

можно уменьшить, достаточно в расчётах брать стандартный шаг 1 или 2 м, гарантирующий выполнения условия $P_i > 1/r$.

Но следует помнить, что повышение проходимости излишне широкого вездехода частым маневрированием требует больших физических нагрузок.

Предположение о равномерном распределении угла поворота выдвинуто по личным наблюдениям. Если малые повороты выполняются чаще резких, при расчёте средней площади поможет убывающая весовая функция $g(\alpha)$ со свойством $\int_0^{\alpha_{\max}} g(\alpha) d\alpha = 1$, например, $g(\alpha) = 2 \frac{\alpha - \alpha_{\max}}{\alpha_{\max}^2}$, но это усложнит интеграл.

Можно предложить дискретное вычисление средней площади по углам от 0 до α_{\max} с некоторым шагом и весами, в сумме дающими 1. Фактически здесь трудность – во взятии интеграла $\int_{90-\gamma}^{\alpha_{\max}} g(\alpha) \operatorname{tg} \alpha d\alpha$, и помогут таблицы для различных γ , α_{\max} и $g(\alpha)$, или подобные таблицы для наборов весов.

Сравнение результатов с полученными ранее

В [2-4] найдена и в [5] уточнена общая проходимость, когда движение возможно только прямо или с предельным поворотом влево или вправо. На рисунке 9 общая проходимость меняется при увеличении колеи вездехода от 1 м до 3 м. Длина вездехода – 3 м. Графики соответствуют плотностям от 1 до 3 деревьев на 10 м^2 при шаге 0,5 ед/ м^2 . Проходимость высока, но для колеи шире 2 м при плотностях выше 2 деревьев на 10 м^2 уже становится ниже 95%.

На рисунке 10 – общая проходимость в тех же условиях при возможности сдвига в любом свободном направлении. Предельный угол поворота – 60° .

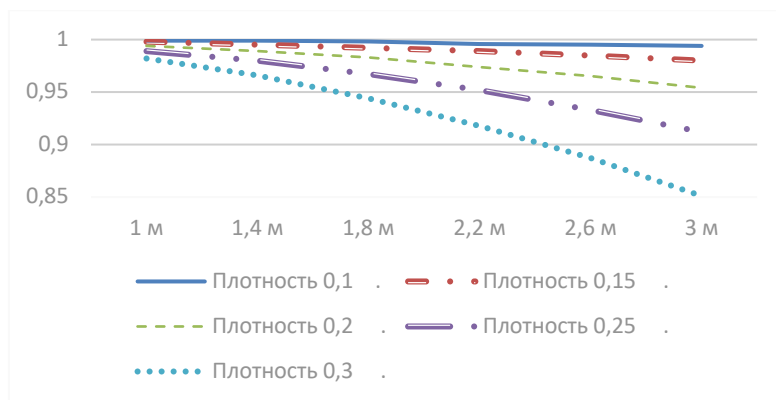


Рис 9. Общая проходимость вездехода по результатам [5]

Доступная площадь в вычислениях для рисунка 10 разбивалась на 30 участков. При ширине колеи вездехода 1 м и 1,4 м для сдвига на 1-2 м нужны 3 свободных участка подряд, при большей – 4 участка. Соотношение $S_{дост} / S_{ср}$ менялось от 11,2 до 7,5.

Проходимость также начинает заметно падать для вездеходов шире 2 м, но даже при ширине 3 м и плотности 3 дерева на 10 кв.м превышает 95%.

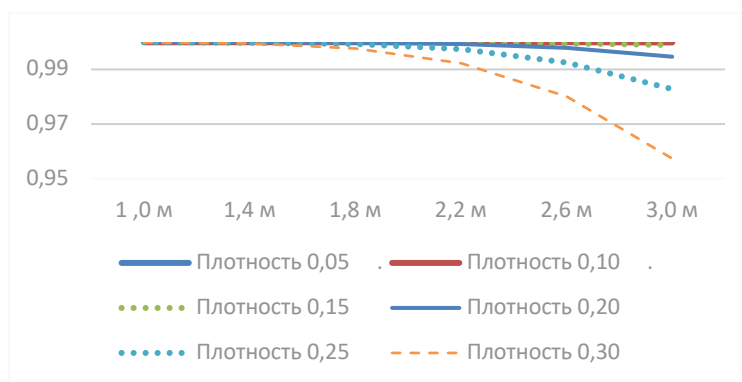


Рисунок 10. Общая проходимость при свободном выборе направления

Вероятность сдвига на 1 м при свободном выборе превышает 0,997 и с точностью до 6-7 знаков равна 1, когда плотность ниже 0,1 ед/м² или ширина менее 2 м. Это делает возможным движение даже вслепую.

При плотности 1 дерево на 20 кв.м общая проходимость неотличима от 1.

На рисунке 11 – вероятность перемещения на 3 м для высоких плотностей от 4 до 10 деревьев на 10 кв.м при средней толщине деревьев 20 см. Параметр r здесь меняется от 7,4 до 5,1, площадь разбита на те же 30 участков, среди которых нужны 5 или 6 свободных подряд. При построении отдельного графика для каждой ширины вездехода и при изменении плотности по горизонтали получается интересное группирование вездеходов по ширине.

Проходимость узких вездеходов вначале заметно выше, но затем резко падает, приближаясь к проходимости широких.

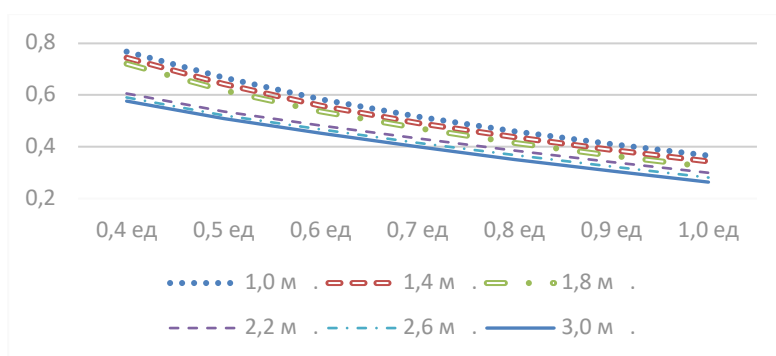


Рисунок 11. Вероятность проезда на 3 м при высокой плотности

При построении графика для каждой плотности (рисунок 12) виден излом (перегиб) в диапазоне 1,8–2,2 м, особенно резкий при плотности 0,4-0,5 ед/м².

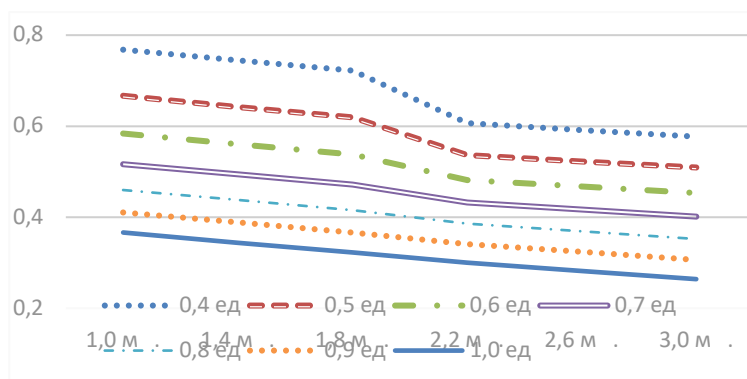


Рисунок 12. Вероятность проезда на 3 м при изменении ширины

Для среднепроходимых лесов (1 дерево на 2-2,5 кв.м.) ширина колеи $2 \pm 0,2$ м оказывается на границе выбора «устойчивость–проходимость».

По свойствам общей проходимости [8, Таблица 1] при ширине колеи до 2м и плотностях до 6-7 деревьев на 10 м² общая проходимость превысит 0,95. При ширине 2–3 м проходимость близка к 0,95 при 4-5 деревьях на 10 кв.м.

Уменьшение шага до 1 м повысит вероятность сдвига и как следствие общую проходимость, но не при плотностях, когда ширина колеи в 2-3 раза больше среднего расстояния между деревьями.

Заключение

При отказе от выбора «прямо или с предельным поворотом» установлена большая возможность движения лесного вездехода, чем в [1-5, 9], что позволяет работать с более грузоподъёмными и устойчивыми вездеходами.

При разбиении на малые участки число вариантов движения из каждой точки резко растёт, что повышает вероятность отдельного шага.

С ростом вероятности шага растёт вероятность перемещения на большое расстояние даже при движении «вслепую».

Дерево выбора сильно разветвляется, повышая степень уравнивания общей проходимости и тем самым – приближая его корень к 1.

В дальнейшем желательно изучить возможность упростить расчёт средней площади и решение обратной задачи получить в аналитическом виде.

Список литературы

1. Иванов Н.А., Лейбович А.В. Основы теории лёгких колёсных вездеходов // Владивосток, Дальнаука, 2010. – 256 с.
2. Александров А.В., Иванов Н.А., Мясников Е.А. Оценка проходимости вездехода по лесистой местности // Научное обеспечение технического и

социального развития ДВ региона: Сборник научных трудов. – Хабаровск: Изд-во Хабаровского гос. техн. ун-та, 2003.

3. Иванов Н.А., Мясников Е.А. Оценка проходимости трёхколесного вездехода по лесистой местности // Известия ВУЗов, «Лесной журнал», 2005, №5, с 45-53.

4. Иванов Н.А., Мясников Е.А. Оценка вероятности преодоления вездеходом лесистой местности // Известия ВУЗов, «Лесной журнал», 2006, №3, с 36-41.

5. Мясников Е.А. Расчёт проходимости лёгкого вездехода в лесистой местности // Вестник ХГАЭП, № 3(65), 2013, Хабаровск

6. Иванов Н.А., Мясников Е.А. Состояние исследований проходимости транспортно-технологических машин и обоснование критерия оценки профильной проходимости // Электронное издание «Учёные заметки ТОГУ», №1(12), 2021, С 58-61.

7. Мясников Е.А. О рекурсивном алгоритме решения одного класса прикладных задач // Химия, физика, биология, математика: теоретические и прикладные исследования: сб.ст. по материалам С Международной научно-практической конференции. – № 9(76). – М., Изд. «Интернаука», 2025.

8. Мясников Е.А. К расчёту проходимости лёгкого вездехода в лесистой местности. // Инновационные подходы в современной науке: сб.ст. по материалам СХСVI Международной научно-практической конференции. – № 16(196). – М., Изд. «Интернаука», 2025.

9. Иванов Н.А., Мясников Е.А., Погребняк М.С. Профильная проходимость транспортно-технологических машин под пологом леса // Электронное издание «Учёные заметки ТОГУ», №1(12), 2021, С 62-66.