

Анализ и расчет параметров движения лесовозных автопоездов

В. И. Скрыпник¹
А. В. Кузнецов
В. Н. Баклагин

Петрозаводский государственный университет

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрены пути повышения достоверности тяговых расчетов. Указанные зависимости могут использоваться для решения различных многовариантных задач, связанных с оценкой эффективности работы лесовозных автопоездов.

Ключевые слова: моделирование движения лесовозных автопоездов, тяговый расчет, параметры движения лесовозных автопоездов.

SUMMARY

The work examines the ways of improving the reliability of traction calculations. The given relations can be used to solve various multivariate problems connected with the evaluation of the timber trucks operating efficiency.

Keywords: modeling of timber trucks movement, traction calculation, the parameters of timber trucks movement.

До настоящего времени тяговые расчеты для определения допустимой нагрузки, скорости движения, производительности автопоездов выполнялись традиционными способами, основанными на методе равновесных скоростей. Эти способы уточнялись и применялись к проектированию лесовозных дорог и организаций лесотранспортных работ М. И. Кишинским, М. М. Коруновым, Р. П. Лахно, В. А. Горбачевским, Б. А. Ильиным, А. П. Ливановым, В. А. Носиковым, Э. О. Салминеным и другими исследователями. Однако на современном этапе традиционные методы расчетов не удовлетворяют возросшим требованиям ввиду того, что не учитывают многие факторы, влияющие на показатели движения. Проведенные исследования показали, что графики движения, рассчитанные по методу равновесных скоростей, не адекватны фактическим. Результаты расчетов не обеспечивают достаточной точности, в частности: расхождение по времени движения по всему маршруту составляет 40–45 % в сравнении с фактическим, а на отдельных участках отличается вдвое.

На кафедре технологии и оборудования лесного комплекса Петрозаводского государственного универси-

тета (ТОЛК ПетрГУ) и в Карельском НИИ лесного комплекса (ПетрГУ) на протяжении значительного времени проводилась работа по совершенствованию методов тяговых расчетов и разработке алгоритмов и программ для моделирования движения лесовозных автопоездов и определению показателей движения в конкретных условиях эксплуатации. Результаты исследований изложены в работах [1–4].

В работе [1] на основе решения дифференциального уравнения движения автопоезда:

$$a - bv^2 = \frac{G\delta}{g} v \frac{dv}{ds} + \omega G + iG + k\Delta\Omega v^2 + G \frac{C_e}{R_e} + G \frac{S}{R} \quad (1)$$

получена расчетная зависимость:

$$Bv^2 = \frac{A - Bv_0^2}{e^{CS}} + \rho + A, \quad (2)$$

где $A = a - G\omega \pm Gi + G \frac{C_e}{R_e}$; $B = b + k\Delta\Omega v^2$; G – вес автопоезда, кгс; R_e – радиус горизонтальной кривой; C_e – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению на горизонтальных кривых; R_e – радиус вертикальной кривой; a и b – коэффициенты зависимости, аппроксимирующей тяговую или тормозную характеристику автопоезда в виде $F = a - bv^2$; k , Δ , Ω – соответственно коэффициент сопротивления воздушной среды автомобиля, коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от прицепов, лобовая площадь автомобиля, кв. м.

$$\rho = \frac{G}{R} \left[\frac{1}{C} (e^{-CS} - 1) + S \right]; \quad C = \frac{2Bg}{G\delta}; \quad e^{CS} = x, \quad (3)$$

где R – радиус вертикальной кривой, м.

Эта зависимость дает возможность определения скорости движения в зависимости от начальной скорости пройденного автопоездом расстояния на вертикальных выпуклых и вогнутых кривых, прямолинейных в профиле участках с учетом изменений тягового усилия и сопротивления воздушной среды с изменением скорости движения, непрерывного изменения сопротивления движения от уклона на вертикальных кривых, дополнительного сопротивления на горизонтальных кривых при движении автопоездов с неповоротными тележками на горизонтальных кривых.

Для облегчения и ускорения расчетов разработаны таблицы для определения $x = b(S)$, $\rho = f(S)$, A , B , приведенные в работах [1–4]. С использованием таблиц достаточно быстро и эффективно решаются задачи по определению скорости движения в зависимости от v_0 и расстояния, пройденного автопоездом с учетом всех перечисленных выше факторов, во всех режимах движения (движение накатом, торможение двигателем и моторным тормозом).

Для решения этой и обратной задачи (определения расстояния, пройденного автопоездом при изменении скорости от v_0 до v) без применения таблиц диффе-

¹ Авторы – соответственно заведующий лабораторией технологии лесосечных работ и транспорта леса КарНИИЛПК (ПетрГУ), доцент и аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса.

ренциальное уравнение движения автопоезда можно представить в следующем виде:

$$C_1 \cdot v \cdot \frac{dv}{ds} = T \pm k \cdot G, \quad (4)$$

где $T = A - Bv^2$; $C_1 = \frac{G \delta}{g}$; $k = \frac{S}{R}$.

Из начальных условий при $S = S_0$, $v_0 = v$

$$v^2 = \frac{(T \cdot S + \frac{k \cdot S^2}{2}) \cdot 2}{C_1} + v_0^2. \quad (5)$$

Пример. Дано: автопоезд МА3+МА3-63781 с полной нагрузкой ($G = 48000$ кг) начал движение на вертикальной выпуклой кривой радиусом 1500 м со скоростью 12 м/с на восьмой передаче КПП. Продольный уклон в начале кривой $i = -0,015$; $\omega = 0,02$. Определить скорость движения на расстоянии 60 м от начала кривой. Из соответствующих таблиц [3, 4] находим $a = 1460$; $B = 1,41$.

$$T = 1460 - 48000 \cdot (0,02 - 0,015) - 1,41 \cdot 12^2 = 1036,9;$$

$$k = \frac{48000}{1500} = 32; C = 1,073 \cdot \frac{48000}{9,81} = 5250;$$

$$v^2 = \frac{(1036,9 \cdot 60 + \frac{32 \cdot 60^2}{2}) \cdot 2}{5250} + 12^2 = 189,64, \quad v = 13,77 \text{ м/с.}$$

При решении этой задачи с использованием зависимости (2–3) $v = 13,76$ м/с, то есть для решения практических задач точность достаточна. Для решения обратной задачи определения расстояния, которое проедет автопоезд при изменении скорости от v_0 до v_k , уравнение (5) преобразуется к виду:

$$k \cdot S^2 + 2 \cdot T \cdot S + (v_0^2 - v_k^2) \cdot C_1 = 0. \quad (6)$$

Так как в диапазоне 12–13,76 м/с величина T изменяется, с целью уточнения решения, величину T можно принять равной среднеинтегральному значению в указанном диапазоне:

$$T = \frac{Av_0 - \frac{Av_0^3}{3} - Av + \frac{Av^3}{3}}{v - v_0}. \quad (7)$$

Среднеинтегральное значение $T = 985,73$.

$$S = \frac{-2 \cdot T \pm \sqrt{(2 \cdot T)^2 - 4 \cdot k^2 \cdot (v_0^2 - v_k^2) \cdot C_1 \cdot \delta}}{2 \cdot k}. \quad (8)$$

Пример. Определить расстояние, которое пройдет автопоезд МА3-6303-26 на вертикальной кривой радиусом 1500 м при изменении скорости движения от $v_0 = 12$ м/с до $v_k = 13,75$ м/с, $G = 48000$ кг; начальный уклон $i = -0,015$; $\omega = 0,02$.

$$S = \frac{-985,73 \cdot 2 \pm \sqrt{4 \cdot 985,73^2 - 4 \cdot \frac{48000}{1500} \cdot (-13,75^2 + 12^2) \cdot 4893 \cdot 1,073}}{2 \cdot 48000/1500} = 60,03 \text{ м.}$$

Таким образом, по точности расчета показателей движения разработанный метод расчетов не уступает известному табличному методу, обеспечивающему в отличие от традиционных методов достаточно точные и достоверные результаты, ввиду учета большего числа факторов, влияющих на показатели движения. Кроме того, новый метод дает возможность успешно решать и обратную задачу – определение расстояния при изменении скорости движения от v_0 до v .

На участках вертикальных кривых в связи с непрерывным изменением уклона изменяется суммарное сопротивление движению, при этом на выпуклых вертикальных кривых сопротивление непрерывно уменьшается, а на вогнутых – возрастает.

При этом на вертикальной выпуклой кривой непрерывное увеличение скорости движения обеспечено, если $A - Bv_0^2 > 0$; на вогнутой вертикальной кривой снижение скорости имеет место, если $A - Bv_0^2 < 0$.

При невыполнении этих условий, при прохождении точки, где $\Delta v = 0$, вектор изменения скорости меняется на противоположный.

Как известно, экстремальные значения непрерывных функций определяются в точках, где первая производная равна 0. Для определения S возьмем первую производную от зависимости (6).

Следовательно,

$$v^{2'} = 0 = 2 \cdot T / C + 2 \cdot S \cdot k / C; \quad S = -\frac{T}{k}. \quad (9)$$

В точке экстремума $T = 0$, следовательно:

$$v^2 = \frac{(\frac{k \cdot S^2}{2}) \cdot 2}{C_1} + v_0^2.$$

Пример. Автопоезд МА3-6303-26+МА3-63781 ($G = 48000$ кг) начал движение на вертикальной кривой радиусом 10000 м, $i = 0,0136$, $\omega = 0,03$. Движение осуществляется на восьмой передаче $\delta = 1,048$; $a = 1047$; $B = 0,972$. Определить расстояние до точки экстремума и экстремальное значение скорости. Остальные условия те же.

$$T = 1047 - 48000(0,030 + 0,0136) - 0,972 \cdot 17^2 = -1327,9;$$

$$S = -\frac{1327,9 \cdot 10000}{48000} = 276,5 \text{ м;}$$

$$v^2 = \frac{2(-1327,9 \cdot 276,5 + 4,8 \cdot 276,5^2 / 2)}{5128} + 289 = 217,26;$$

$$v = 14,74 \text{ м/с (рис. 1).}$$

В таблице 1 представлены значения скорости в диапазоне от 50–300 м от точки экстремума при $v_s = 14,74$ м/с.

Таблица 1
Скорость в диапазоне от 50–300 м от точки экстремума при $v_3=14,74$ м/с

S, м	v, м/с	v, км/ч
50	14,82	53,52
100	15,05	54,18
150	15,43	55,55
200	15,95	57,42
250	16,61	59,8
300	17,36	62,5

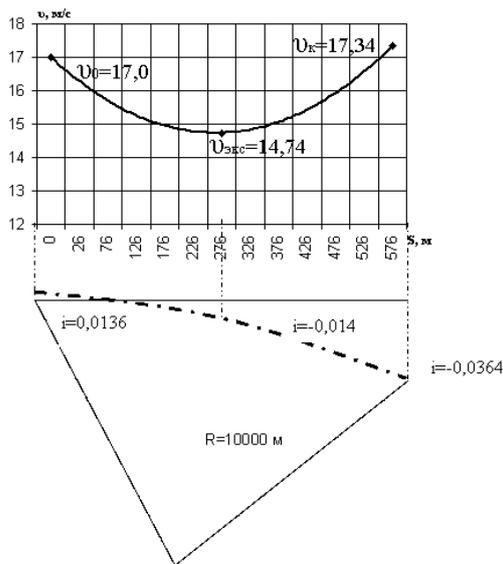


Рис. 1. Расстояние до точки экстремума и экстремальное значение скорости

Расчетная скорость движения на участках ограничения не должна превышать такую величину, при которой будет обеспечена остановка автопоезда перед препятствием в пределах расстояния видимости.

Расстояние видимости на вертикальных выпуклых кривых, в закрытой местности (косогор, наличие в полосе отвода кустарников, деревьев) определяется по известным зависимостям (3, 4).

Исходя из формулы (5) и преобразуя ее с учетом того, что на участке ограничения на расстоянии видимости необходимо остановить автопоезд (т. е. конечная скорость равна 0), а начальная скорость движения на участке не превысит $v_{огр}$.

$$v_{огр} = \sqrt{2 \frac{-A_T S - kS^2}{C_1}} \quad (10)$$

На прямолинейном в профиле участке

$$v_{огр} = \sqrt{2 \frac{-A_T}{C_1}}, \text{ где } A_T = G\phi + Gi + G\omega.$$

Пример. Автопоезд МАЗ-6303-26+МАЗ-63781 входит на вертикальную выпуклую кривую радиусом 1500 м. Определить ограничение скорости на кривой. $\varphi = 0,15$; $i = 0,02$; $\omega = 0,03$; $A = -9600$.

$$S_e = \sqrt{2 \cdot 1500 \cdot 2,2} = 81,2 \text{ м.}$$

Так как по условиям безопасности движения автопоезд должен остановиться минимум за 10 м до препятствия, следовательно, $S_{пр}$ (расчетное расстояние видимости) равно 71,2 м.

$$v_{огр} = \sqrt{2 \frac{9600 \cdot 71,2 - 32 \cdot 71,2^2 / 2}{1,037 \cdot 48000 / 9,81}} = 15,55 \text{ м/с.}$$

При том же расстоянии видимости в закрытой местности на вогнутой вертикальной кривой $v_{огр} = 17,53$ м/с (63,11 км/ч), на прямолинейном в профиле участке 16,57 м/с (59,66 км/ч).

Выведенные на основе дифференциального уравнения движения в виде (4) расчетные формулы позволяют определять скорость движения v в зависимости от пройденного автопоездом расстояния и начальной скорости v_0 , а также пройденное расстояние при изменении скорости от v_0 до v_k .

Для определения времени движения на участке S_0-S_1 при изменении скорости от v_0-v_1 решается уравнение $T = C \frac{d^2 S}{dt^2} \pm kG$, где T – среднееинтегральное тяговое усилие на рассматриваемом участке.

При $k > 0$

$$t_{1,2} = \frac{\arcsin\left(\frac{2A_3 A_2 \pm \sqrt{4A_3^2 A_2^2 - 4(A_1^2 + A_3^2)(A_2^2 - A_1^2)}}{2(A_1^2 + A_3^2)}\right)}{\sqrt{k/C}} \quad (11)$$

При $k < 0$

$$t_{1,2} = \frac{\ln\left(\frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4C_1 C_2}}{2 \cdot C_1}\right)}{\sqrt{k/C}} \quad (12)$$

Здесь $A_1 = -\frac{T}{k}$; $A_2 = \frac{T}{k} - S$; $A_3 = v_0 \sqrt{\frac{k}{C}}$;

$$C_1 = \left(\frac{T}{k} \sqrt{\frac{k}{C}} + v_0\right) / 2 \sqrt{\frac{k}{C}}; \quad C_2 = \left(\frac{T}{k} \sqrt{\frac{k}{C}} - v_0\right) / 2 \sqrt{\frac{k}{C}}.$$

Пример. Автопоезд ТМ-45 (автомобиль КаМАЗ-53228 с прицепом ТМЗ-8966-10) весом 41000 кг начал движение на вертикальной выпуклой кривой радиусом 5000 м; продольный уклон в начале участка $i = 0,001$, $\omega = 0,018$; $v = 8,56$ м/с. Длина участка 150 м. Определить время движения на участке. Из таблицы,

приведенной в работе [4], определяем $a = 1101$, $B = 1,2$.

$$A = 1101 - 41000(0,001 + 0,018) = 332, \quad k = \frac{41000}{5000} = 8,2.$$

Для рассматриваемого случая по формуле (5) определим скорость в конце участка $v = 11,42$ м/с.

$$T = -332 \cdot 8,56 + 1,2 \cdot \frac{8,56^3}{3} + 332 \cdot 11,42 - 1,2 \cdot \frac{11,42^3}{3} = 211,42;$$

$$C = \frac{41000}{9,81} \cdot 1,04 = 4430,17;$$

$$C_1 = \frac{211,42 \sqrt{\frac{8,2}{4430,17}} + 8,56}{2\sqrt{8,2/4430,17}} = 112,37;$$

$$C_2 = \frac{211,42 \sqrt{\frac{8,2}{4430,17}} - 8,56}{2\sqrt{8,2/4430,17}} = -86,59;$$

$$A_1 = 150 + \frac{211,42}{8,2} = 175,78;$$

$$t_{1,2} = \frac{\ln\left(\frac{175,78 \pm \sqrt{175,78^2 - 4 \cdot 112,37 \cdot (-86,59)}}{2 \cdot 112,37}\right)}{\sqrt{8,2/4430,17}} = 15,62 \text{ с.}$$

Пример. Автопоезд ТМ-45 с грузом ($G = 41000$ кг) начал движение на вертикальной вогнутой кривой радиусом 6000 м на восьмой передаче КПП; продольный уклон в начале участка $i = 0,005$, $\omega = 0,018$, $v_0 = 8,56$ м/с. Определить скорость движения на расстоянии 100 м от начала кривой и время движения. $a = 1101$, $B = 1,2$.

$$k = \frac{41000}{6000} = 6,83;$$

$$c = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 9,81}{41000 \cdot 1,04} = 0,000552; \quad e^{cs} = 1,05675; \quad \frac{1}{e^{cs}} = 0,946;$$

$$\rho = \frac{41000}{6000} \left[\frac{1}{0,000552} (0,946 - 1) + 100 \right] = 18,5;$$

$$Bv^2 = 158 - \frac{158 - 1,2 \cdot 14,5^2}{1,05675} - 18,5 = 202,74; \quad v = 13,8 \text{ м/с.}$$

$$T = \frac{-158 \cdot 14,5 + 1,2 \cdot \frac{14,5^3}{3} + 158 \cdot 13,8 - 1,2 \cdot \frac{13,8^3}{3}}{-14,5 + 13,8} = 82,24;$$

$$A_1 = -\frac{82,24}{6,83} = -12,04; \quad A_2 = \frac{82,24}{6,83} - 100 = -87,96;$$

$$A_3 = -\frac{8,56}{\sqrt{\frac{6,83}{4430,17}}} = -369,20;$$

Тогда $t_{1,2} = 6,95$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Выведенные зависимости позволяют определить показатели неустановившегося движения лесовозных автопоездов во всех возможных режимах и в отличие от традиционных методов расчетов, применяемых на лесовозном автотранспорте, обеспечивают достаточную точность и адекватность расчетов. По точности расчета показателей движения предложенный метод расчетов не уступает разработанному ранее табличному методу, обеспечивающему в отличие от традиционных методов достаточно точные и достоверные результаты, ввиду учета большего числа факторов, влияющих на показатели движения. Максимальное расхождение на контрольных участках между фактическим и расчетным временем движения не превышает 6 %, графики расчетных и фактических показателей движения имеют хорошую сходимость по характеру изменения скорости, режимов движения и используемых передач.

Проведенные исследования позволили вывести расчетные зависимости для определения основных показателей движения (скорости, времени движения, пройденного автопоездом расстояния) во всех режимах движения с учетом всех основных факторов, влияющих на показатели движения. Полученные зависимости могут использоваться для получения исходных данных при решении различных технико-экономических задач при планировании работы автотранспорта в лесозаготовительных предприятиях; расчета обоснованных норм выработки автопоездов, с учетом особенностей плана и профиля конкретной автодороги, в учебном процессе при проведении тяговых расчетов в рамках курсов тяговых машин и сухопутного транспорта леса. Для проведения массовых и многовариантных расчетов с использованием выведенных зависимостей разработаны модели, алгоритмы и программы, которые использовались в учебном процессе и при решении различных технико-экономических задач в конкретных лесозаготовительных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Скрыпник. Новые методы тяговых расчетов на лесовозном транспорте / В. И. Скрыпник, А. Н. Качанов. Петрозаводск, 1979. 118 с.
2. Шегельман И. Р. Моделирование движения лесовозных автопоездов на ПВЭМ / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Пладов и др. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. 234 с.
3. И. Р. Шегельман. Эффективная организация автомобильного транспорта леса / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 280 с.
4. И. Р. Шегельман. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Кузнецов и др. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с.