

УДК 629.35

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Скрыпник В.И., Кузнецов А.В.

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск,
e-mail: kuzalex@psu.karelia.ru

Лесотранспортные операции и затраты на их проведение оказывают существенное влияние на весь лесозаготовительный процесс и рентабельность работы предприятия. Решение инженерных задач на транспорте и определение технико-экономических показателей работы лесотранспортных машин приобретает особую значимость для повышения эффективности транспортно-переместительных операций. В работе обоснованы и выведены зависимости и определена методика расчетов показателей движения лесовозных автопоездов при неустановившемся и установившемся режимах движения. Разработанные методы расчетов учитывают все основные факторы, влияющие на показатели движения, и обладают большей точностью и достоверностью, чем традиционные методы, зачастую применяемые на лесотранспорте. Доказана достаточная точность и адекватность результатов расчетов предлагаемыми методами в сравнении с фактическими показателями, вследствие учета всех основных факторов, влияющих на показатели движения автопоездов. Выведенные зависимости и обоснованные методы позволяют решать широкий круг технико-экономических и инженерных задач при проектировании, планировании и эксплуатации лесотранспорта. Разработанная методика расчета позволяет определять фактические значения скорости и времени движения лесовозных автопоездов в различных режимах движения, определять их производительность, а также реальные технико-экономические показатели работы лесотранспортных систем; обосновывать оптимальный тип автопоезда и его режимы работы.

Ключевые слова: показатели движения, неустановившееся и установившееся движение, лесовозные автопоезда, механическая трансмиссия

METHODS FOR CALCULATING NON-STEADY MOTION INDICATORS OF LOG TRUCKS WITH MECHANICAL TRANSMISSION

Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: kuzalex@psu.karelia.ru

Forest transportation operations and costs on their implementation have a significant impact on the entire logging process and the profitability of an enterprise. In order to increase the efficiency of transport and relocation operations, it is particularly important to solve engineering problems in transport and determine the technical and economic indicators of the work of forest transport machines. The paper presents derived and substantiated dependencies and defined methodology for calculating the motion indicators of log trucks with non-steady and steady modes of motion. The developed calculation methods take into account all the main factors affecting motion indicators and have greater accuracy and reliability than traditional methods often used for forest transport. The authors of the paper compared the results of the calculation made by the proposed methods with actual indicators. They proved sufficient accuracy and adequacy of the calculation results due to taking into account all the main factors affecting the motion indicators of log trucks. Derived dependencies and substantiated methods allow solving a wide range of technical, economic and engineering problems in the design, planning and operation of forest transport. The developed calculation method allows determining the actual values of speed and time of movement of log trucks in various motion modes, allows determining their productivity, as well as real technical and economic indicators of the work of forest transport systems. It also allows justifying the optimal type of a log truck and its operating modes.

Keywords: motion indicators, non-steady and steady motion, log trucks, mechanical transmission

В настоящее время лесотранспортные операции и затраты на их проведение оказывают существенное влияние на весь лесозаготовительный процесс и рентабельность работы предприятия. В этих условиях решение инженерных задач на транспорте и определение технико-экономических показателей работы лесотранспортных машин приобретает особую значимость для повышения эффективности транспортно-переместительных операций.

На протяжении долгого времени многими исследователями разрабатывались и совершенствовались методы тяговых расчетов для определения показателей движе-

ния лесовозных автопоездов. Значительный вклад в разработку подобных методов был внесен исследователями и учеными ЦНИИМЭ и других исследовательских и научных учреждений [1, 2]. Исследованиями в области повышения эффективности лесотранспортных операций и определения показателей и режимов движения лесовозных автопоездов в различных условиях эксплуатации занимались следующие специалисты и ученые: В.И. Алябьев, Б.А. Ильин, О.Н. Бурмистрова, В.К. Курьянов, А.А. Камусин, А.В. Скрыпников, С.И. Сушков и др. [3–6]. Разработкой и совершенствованием методов тяговых расчетов и моде-

лированием движения лесовозных автопоездов – Б.И. Кувалдин, В.И. Скрыпник, И.Р. Шегельман и др. [1, 2, 7, 8].

Разработанные методы и программы [1, 7] использовались в Системе автоматизированного проектирования автопоездов, при проектировании лесотранспортных путей, при выборе оптимального типа автопоезда, при многовариантном проектировании и в учебном процессе. На основе расчетных экспериментальных исследований, в процессе которых определялись фактические и расчетные показатели движения, дана оценка точности и адекватности расчетных показателей движения (скорости и времени движения, пройденного расстояния, режимов движения и др.). Доказано, что обеспечивается достаточная точность и адекватность результатов в сравнении с фактическими показателями, вследствие учета всех основных условий, влияющих на показатели движения автопоездов.

В то же время в связи с появлением новых типов и моделей лесовозных автопоездов и необходимостью учета всех факторов, оказывающих влияние на их режимы движения, а также расширением круга решаемых задач и упрощения расчетов без снижения их точности полученные методы и зависимости тяговых расчетов требуют дальнейшего совершенствования и развития.

Цель исследования: разработать алгоритм и методику расчета для определения показателей неустановившегося движения лесовозных автопоездов с механической трансмиссией.

Материалы и методы исследования

При условии аппроксимации кривой тяговой характеристики в рабочем диапазоне двигателя семейством кривых вида

$$F_T = a - bv^2, \quad (1)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты для определения скорости движения, выведены зависимости, дающие возможность определять скорость в конце участка длиной S с учетом начальной скорости движения v_0 .

Расчетные формулы имеют вид

$$v = \sqrt{\left(v_0^2 - \frac{A}{B}\right) e^{-\frac{2Bg_s}{G\delta}} + \frac{A}{B} + \frac{\rho}{B}}, \quad (2)$$

$$\rho = \frac{G^2\delta}{2BR_b g} \cdot \left(e^{-\frac{2Bg_s}{G\delta}} - 1 \right) + \frac{GS}{R_b}, \quad (3)$$

где $A = a - iG + \omega G$; i – продольный уклон; G – вес автопоезда, кгс; S – пройденное расстояние, м; ω – коэффициент сопротивления движению; δ – коэффициент учета инерции вращающихся масс; R_b – радиус вертикаль-

ной кривой, м; $B = b + k\Delta\Omega v^2$; k – соответственно, коэффициент сопротивления воздушной среды для автомобиля; Δ – коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от прицепов; Ω – лобовая площадь автомобиля, м².

Формула (2) применяется для определения скорости движения автопоезда на вертикальных кривых. На прямолинейных в профиле участках последний член в формуле (2), т.е. $\frac{\rho}{B}$, исключается, так как на прямолинейных участках $R_b = \infty$, следовательно, ρ равно 0.

Сформированы таблицы $\rho = f(S)$ для всех передач КПП. При этом радиус кривой R_r принят равным 1000 м. При большем или меньшем значении R_r определяется по формуле $\rho = \rho_{1000} \cdot \frac{1000}{R_r}$.

В таблице приведены значения ρ при движении автопоезда на базе МАЗ-6303-26.

С использованием таблиц значительно облегчается определение скорости движения (с работающим двигателем, торможением двигателя и моторным тормозом). Упрощаются расчеты при проектировании и решении технико-экономических задач на транспорте, при выборе различных типов автопоездов и т.д.

Результаты исследования и их обсуждение

Чтобы избежать формирования таблиц $\rho = f(S)$ и упростить зависимости для определения v , не снижая точности расчетов, зависимость для определения ρ на вертикальных кривых преобразуется исходя из следующих предположений.

Дифференциальное уравнение движения при аппроксимации тягового усилия от скорости движения имеет вид

$$\frac{G\delta}{g} v \frac{dv}{dS} = A - Bv^2 + G \frac{S}{R}. \quad (4)$$

В дифференциальном уравнении (4), решением которого является зависимость (6), обозначения те же, что и в формулах (2)–(3).

На заданном участке длиной S среднеинтегральное значение величины $G \frac{S}{R}$ в диапазоне от 0 до S $\Delta F = \frac{S}{2R} G$.

Следовательно, уравнение (4) может быть представлено в виде

$$\frac{G\delta}{g} v \frac{dv}{dS} = A_1 - Bv^2, \quad (5)$$

где $A_1 = A + \frac{GS}{2R}$.

Значения ρ при движении автопоезда на базе МА3-6303-26 в грузовом направлении с полной нагрузкой на 7 передаче КПИ

S	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ρ	1,278	5,138	11,54	20,479	31,941	45,91	60,382	81,334	102,775	126,633
S	100	120	130	140	150	160	170	180	190	200
ρ	152,95	181,71	212,875	246,45	282,41	320,76	361,47	404,53	449,93	497,67

В этом случае расчетная зависимость (5) упрощается.

$$v = \sqrt{\left(v_0^2 - \frac{A}{B}\right) e^{\frac{2Bg_s}{G\delta}} - \frac{A_1}{B}}. \quad (6)$$

Расхождение в результатах расчетов не превышает 0,08%, т.е. по точности расчетов зависимости (6) и (2) фактически равноценны; в практических расчетах при отсутствии таблиц ρ предпочтительнее использовать зависимость (6).

На прямолинейных в профиле участках для определения скорости движения, A_1 (так как $Rv = \infty$) не определяется в расчетах, а принимается значение A , принятое в формуле (2).

Для определения показателей движения на прямолинейном в профиле участке, исходя из формулы (2), при отсутствии ρ , выведена зависимость для определения расстояния S на прямолинейном в профиле участке, которое пройдет автопоезд при изменении скорости от v_0 до v_k .

$$S = \frac{1}{C} \ln \frac{A - Bv_0^2}{A - Bv_k^2}, \quad (7)$$

где $C = \frac{2Bg}{G\delta}$.

На вертикальных кривых исходя из зависимостей (1), (2) вывод расчетных формул для определения S невозможен.

При от v_0 до v_k

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

где T – среднеинтегральное тяговое усилие на прямолинейном в профиле участке с уклоном, равным уклону в начальной точке вертикальной кривой.

$$Z = \frac{G\delta}{g}; \quad k = \frac{G}{R}.$$

Среднеинтегральное тяговое усилие на прямолинейном в профиле участке при условии аппроксимации тягового уси-

лия в заданном диапазоне зависимостью $F_T = A - Bv^2$ определяется по формуле

$$T = \int_{v_0}^{v_k} A - Bv^2 = \frac{A \cdot v_0 - B \cdot v^3/3 - (A \cdot v_0 - B \cdot v^3/3)}{v_k - v_0}. \quad (9)$$

На прямолинейных в профиле участках пройденное расстояние определяется зависимостью (7) или по формуле:

$$S = \frac{(v_k^2 - v_0^2)Z}{2T}. \quad (10)$$

Таким образом, получены зависимости для решения прямой и обратной задачи тяговых расчетов.

При известном среднеинтегральном значении T на прямолинейном в профиле участке:

$$v = \sqrt{\left(\frac{2Ts}{Z}\right) + v_0^2}. \quad (11)$$

На участках вертикальных кривых:

$$v = \sqrt{\left(\frac{2Ts \pm kS^2}{Z}\right) + v_0^2}. \quad (12)$$

Так как, на первом этапе расчета, при определении скорости на вертикальной кривой до определения конечной скорости движения среднеинтегральное тяговое усилие в диапазоне скоростей $v_0 - v_k$ определить невозможно, задача решается в два этапа. Вначале по формуле (11) или (12) определяется скорость движения в конце участка при заданном тяговом усилии в начале участка и равномерном ускорении. Затем в диапазоне скоростей $v_0 - v_k$ определяется среднеинтегральное тяговое усилие по формуле (9). После этого по формулам (11) или (12) значение скорости уточняется с учетом величины среднеинтегрального значения T и среднеинтегрального ускорения.

При расчетах по формуле (2) и (3) и по формулам (11) и (12) с использованием

предлагаемой методики получены одинаковые результаты.

Для определения времени движения на прямолинейных в профиле участках ранее была выведена зависимость [1]:

$$t = \frac{1}{C_1} \ln \frac{A - Bv_0}{A - Bv}. \quad (13)$$

В этом случае тяговое усилие с учетом сопротивления аппроксимируется линейной зависимостью, а не двучленным полиномом $A - Bv^2$, что приведет к снижению точности расчетов.

С целью повышения точности расчетов получено решение дифференциального уравнения в виде

$$\frac{G\delta}{g} \frac{dv}{dt} = \frac{(a - Bv^2 \pm iG - \omega G)g}{G\delta}. \quad (14)$$

Для повышения точности расчетов при определении времени движения в уравнении (14) целесообразно вместо правой его части принять среднеинтегральное значение T , полученное при определении скорости движения по формулам (9), (11), (12).

На прямолинейном в профиле участке:

$$t = (v - v_0) / \frac{gT}{G\delta} = (v - v_0) / (T/z). \quad (15)$$

На участках вертикальных кривых при расчетах t необходимо учитывать изменение сопротивления движению при непрерывных изменениях уклона на вертикальной кривой.

С учетом того, что среднеинтегральное значение изменения тягового усилия на участке длиной S при радиусе вертикальной кривой R (м) определяется по формуле $\Delta F = \frac{SG}{2R}$, дифференциальное уравнение движения на вертикальной кривой имеет вид

$$\frac{G\delta}{g} \frac{dv}{dt} = T - \frac{SG}{2R}. \quad (16)$$

Расчетная зависимость для определения времени на вертикальной кривой:

$$\begin{aligned} t &= (v - v_0) / \frac{Tg}{G\delta} + \frac{gS}{2R\delta} = \\ &= (v - v_0) / \left(T/z + \frac{GS}{2R\delta} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Следует отметить, что при известном среднеинтегральном тяговом усилии T можно определить время движения на участке вертикальной кривой, используя зависи-

мость для решения дифференциального уравнения в виде

$$C \frac{dv}{dt} = T - \frac{G + v_{cp}}{R}; \quad (18)$$

$$t = \frac{-T/C \pm \sqrt{(T/C)^2 - 4(v_0 - v_k)\rho \cdot v_{cp}}}{2\rho v_{cp}}. \quad (19)$$

где $\rho = g/2vR$, остальные обозначения те же, что и в формулах (7)–(9).

Если скорость движения определена с использованием зависимостей (1), (2), то определение времени движения на участке упрощается. Среднеинтегральное ускорение в этом случае определяется по формуле

$$a_{сн} = \frac{\Delta v^2}{2S} = \frac{v^2 - v_0^2}{2S}. \quad (20)$$

где v_0 – скорость в начале движения на участке, м/сек; v – скорость движения в конце участка.

Время движения определяется по формуле

$$t = (v - v_0) / a_{сн}. \quad (21)$$

На вертикальных кривых, на определенном расстоянии от начала движения скорости движения автотранспортных систем достигают экстремального значения – v_3 (максимальное значение скорости при разгоне автопоезда в начале движения и минимальное при снижении скорости на вертикальной выпуклой кривой). В точке экстремума скорости вектор изменения скорости меняется на противоположный.

Расстояние до точки экстремума:

$$S_3 = \frac{G\delta}{2Bg} \ln \left[\frac{2BRg}{G^2\delta} \cdot (A - Bv_0^2) + 1 \right]. \quad (22)$$

Значения ρ в зависимости от S приведены в таблицах приложения [1], а также могут быть рассчитаны по формуле, полученной в результате преобразования зависимости (3):

$$\rho = \frac{G}{R} \left[\frac{1}{C} (e^{-CS} + 1) + S_3 \right]. \quad (23)$$

В формулах (22), (23): S_3 – расстояние до точки экстремума, м;

$$C = \frac{2Bg}{G\delta}. \quad (24)$$

Так как в точке экстремума тяговое усилие, определяемое по формуле $A - Bv^2$, равно 0, то скорость в любой точке, находящейся на расстоянии S_3 от точки экстремума, определяется по формуле

$$Bv^2 = A_3 \pm \rho. \quad (25)$$

Формула (25) получена путем преобразования зависимости (2), исходя из того, что в точке экстремума $A_0 - Bv_0^2 = A_3 - Bv_3^2 = 0$.

При определении скорости движения на вертикальных выпуклых кривых ρ применяются со знаком «+», на вогнутых – со знаком «-».

Определив скорость в точке экстремума, легко определить скорость при движении в любой точке на вертикальной кривой с тем же начальным уклоном по зависимости

$$v = \sqrt{\frac{A_3 \pm \rho}{B}}. \quad (26)$$

где A_3 – тяговое усилие в точке экстремума; v – скорость в конце вертикальной кривой, м/с.

С использованием зависимостей (23), (26) легко определить скорость движения на любом расстоянии до точки экстремума, что значительно ускоряет построение уточненного графика движения лесовозных автопоездов. Для решения обратной задачи – определения расстояния пройденного автопоездом при изменении скорости от v_0 до v_k – находится ρ по формуле (25).

При решении этих задач следует иметь в виду, что решение их указанным способом возможно лишь при наличии экстремальных значений скорости при заданных условиях.

Заключение

В работе обоснованы и выведены зависимости и определена методика расчетов показателей движения лесовозных автопоездов при неустановившемся и установившемся режимах движения. Разработанные методы расчетов учитывают все основные факторы, влияющие на показатели движения, и обладают большей точностью и достоверностью, чем традиционные методы, зачастую применяемые на лесотранспорте.

Выведенные зависимости и обоснованные методы позволяют решать широкий

круг технико-экономических и инженерных задач при проектировании, планировании и эксплуатации лесотранспорта. В частности, приведенные зависимости можно использовать для определения скорости и времени движения лесовозных автопоездов в различных режимах движения и, как следствие, расчета их производительности и технико-экономических показателей при работе в различных природно-производственных условиях, а также для обоснования оптимального типа автопоезда при работе в конкретных условиях эксплуатации и его режимов работы.

Список литературы

1. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Пладов А.В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с.
2. Алябьев В.И., Ильин Б.А., Кувалдин Б.И., Грехов Г.Ф. Сухопутный транспорт леса. М.: Лес. пром-ть, 1990. 416 с.
3. Бурмистрова О.Н., Король С.А. Определение оптимальных скоростей движения лесовозных автопоездов из условия минимизации расхода топлива // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2013. № 1 (93). С. 25–27.
4. Курьянов В.К., Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Морковин В.А. Модель режимов движения транспортных потоков на лесовозных автомобильных дорогах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 2 (338). С. 61–67.
5. Макеев В.Н., Сушков С.И., Фурменко А.И., Солопанов М.С. Определение параметров, характеризующих движение лесовозных автопоездов по участку магистрали общего пользования // Лесотехнический журнал. 2013. № 3 (11). С. 70–75.
6. Рябова О.В., Скрыпников А.В., Никитин В.В., Ломакин Д.В. Факторы, определяющие движения лесовозных автопоездов в транспортных потоках // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 4 (52). С. 54–67.
7. Ларионов В.Я., Камусин А.А., Левушкин Д.М. Расчет средних скоростей движения лесовозного автотранспорта // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2014. № 2. С. 138–142.
8. Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Васильев А.С. Математическое моделирование и оптимизация процессов автомобильного транспорта леса. Петрозаводск: Verso, 2018. 56 с.