

УДК 630*37

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ

Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В.

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

Работа посвящена совершенствованию расчетов, разработке алгоритмов и программ для моделирования движения лесовозных автопоездов и определения показателей движения в условиях эксплуатации. Существующие методы определения допустимой нагрузки, скорости движения, производительности автопоездов устарели и не учитывают многие факторы, влияющие на показатели движения. В частности, расхождение по времени движения по всему маршруту составляет 40–45% в сравнении с фактическими данными, а на отдельных участках данные отличаются вдвое. Ограничения скорости движения существуют на крутых поворотах, на переломах продольного профиля, на вертикальных кривых, на определенных участках по состоянию покрытия дороги, при движении в населенных пунктах, пересечении дорог и т.д. При подходе к таким участкам и их преодолении необходимо снизить скорость. При расчете скоростей движения при моделировании движения лесовозных автопоездов для решения этой задачи приходилось проводить многочисленные расчеты через короткие интервалы. Выведенные авторами зависимости и предложенная методика расчетов позволяют определить скорость неустановившегося движения лесовозных автопоездов с учетом ограничений скорости, а также выбрать оптимальное чередование режимов движения, ускорить эксплуатационные расчеты.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, методы тяговых расчетов, моделирование движения, показатели движения, неустановившееся движение, режим торможения

FUNCTIONAL-TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF LOG TRUCKS MOTION PARAMETERS

Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V.

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

The article is devoted to the improvement of calculations, development of algorithms and programs for modeling log truck motion and determining the indicators of motion under operating conditions. The existing methods of determining load carrying capacity, motion speed, and productivity of log trucks have gone out of date and do not take into account many factors influencing the indicators of motion. In particular: discrepancy in travelling time all over the route makes 40–45% compared to the factual data, and at separate sections the difference is two-fold. There are speed limits at sharp turnings, breaks in grade, vertical curves, certain sections according to the condition of road surface, when moving in populated localities, road intersections, etc. It is necessary to lower the speed when approaching and passing such sections. Numerous calculations in short intervals had to be done for calculation of motion speed during modeling the motion of log trucks in order to solve this task. The dependencies developed by the authors of the article and the suggested calculation method allow to determine the speed of log trucks unsteady motion with regard to speed limitations, as well as choose optimum alternation of motion modes and quicken exploitation calculations.

Keywords: log truck, methods of tractive calculations, motion modeling, motion indicators, unsteady motion, braking mode

Повышение эффективности транспортно-переместительных операций до сих пор является приоритетной задачей для лесопромышленного комплекса в целом и лесозаготовительных предприятий в частности. Это обусловлено в первую очередь тем, что транспортные расходы на освоение лесного фонда могут достигать значительных величин в общем объеме лесозаготовительных работ. В русле этих тенденций в Петрозаводском государственном университете на протяжении значительного времени проводятся исследования, направленные на повышение эффективности транспортно-переместительных операций [7, 8, 10, 11, 12, 13, 14] с использованием функционально-технологического анализа. Одним из направлений этих исследований стала работа по совершенствованию методов тяговых расчетов, разработке алгоритмов

и программ для моделирования движения лесовозных автопоездов и определению показателей движения в конкретных условиях эксплуатации.

До настоящего времени тяговые расчеты для определения допустимой нагрузки, скорости движения, производительности автопоездов выполняются традиционными способами, основанными на методе равновесных скоростей. Эти способы уточнялись и применялись при проектировании лесовозных дорог и организации лесотранспортных работ рядом известных ученых и исследователей [1, 2, 3, 4, 5, 6]. 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, расчи-

танные 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 фактическими данными, а на отдельных участках данные отличаются вдвое [7, 8, 10, 11, 12, 13, 14].

На практике лесовозные дороги характеризуются сложной структурой и функциональной применимостью. Функционально-технологические ограничения скорости движения имеют место на крутых поворотах по условиям устойчивости движения с учетом центробежной силы, на переломах продольного профиля с учетом допустимой перегрузки рессор, на вертикальных кривых по допусжаемому центростремительному ускорению; по условиям видимости на вертикальных выпуклых кривых, на крутых поворотах в закрытой местности; по состоянию покрытия на определенных участках дороги, а также ограничения, устанавливаемые директивно, например, при движении в населенных пунктах, пересечении дорог и т.д.

При подходе к таким участкам и их преодолении необходимо снизить скорость до величины ограничения. На практике водители лесовозных автопоездов определяют режимы движения и интенсивность снижения скорости, руководствуясь опытом. При расчете скоростей движения при моделировании движения лесовозных автопоездов для решения этой задачи приходилось проводить многочисленные расчеты [12, 13, 14] через короткие интервалы, с тем, чтобы при подходе автопоезда к участкам ограничения его скорость не превышала допустимую и не снизилась ниже $v_{\text{орп}}$ в значительных пределах. Поэтому при расчетах очень важно определить расстояние от начала расчетного участка до точки, с которой следует переходить к снижению скорости в различных режимах (с торможением колесными тормозами, моторным тормозом, торможением двигателем).

Для определения расстояния до точки, начиная с которой необходимо прекратить разгон автопоезда и перейти к режиму торможения, в качестве исходной используется зависимость при движении автопоезда на вертикальной кривой [9]:

$$v^2 = \frac{\left(T \cdot S + \frac{k \cdot S^2}{2}\right) \cdot 2}{Z} + v_0^2, \quad (1)$$

$$v_0^2 + 2 \frac{TS}{Z} - 2 \frac{S_T T}{Z} + \frac{kS^2}{Z} - \frac{2kSS_T}{Z} + \frac{kS_T^2}{Z} = v_{\text{орп}}^2 - \frac{2T_T S_T}{Z} - \frac{kS_T^2}{Z};$$

$$v_0^2 + 2 \frac{TS}{Z} - \frac{2S_T k}{Z} + \frac{kS^2}{Z} - \frac{2kSS_T}{Z} + \frac{kS_T^2}{Z} - v_{\text{орп}}^2 + \frac{2T_T S_T}{Z} + \frac{kS_T^2}{Z}, \quad (4)$$

$$\text{где } T = A - Bv^2; \quad Z = \frac{G\delta}{g}; \quad k = \frac{G}{R};$$

$$A = a - G\omega \pm Gi + G \frac{C_r}{R_r}; \quad B = b + k_c \Delta \Omega v^2;$$

v_0 – скорость движения в начале участка, м/с;
 v – скорость движения автопоезда в конце участка, м/с; S – длина расчетного участка, м;
 G – вес автопоезда, кгс; R_r – радиус горизонтальной кривой; C_r – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению на горизонтальных кривых; R – радиус вертикальной кривой (при расчете показателей движения на вертикальных выпуклых кривых применяется со знаком «+», на вогнутой кривой со знаком «-»); a и b – коэффициенты зависимости, аппроксимирующей тяговую или тормозную характеристику автопоезда в виде $F = a - bv^2$; ω – коэффициент сопротивления качению; δ – коэффициент учета инерции вращающихся масс; k_c , Δ , Ω – соответственно коэффициент сопротивления воздушной среды для автомобиля, коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от прицепов; лобовая площадь автомобиля, м²; i – продольный уклон; g – ускорение силы тяжести, м/с².

К точке начала торможения расчетная скорость движения достигается автопоездом в режиме разгона и равна скорости, начиная с которой необходимо начать торможение с тем, чтобы к началу участка, имеющего ограничение скорости, скорость движения автопоезда снизилась до $v_{\text{орп}}$.

При этом при длине элемента продольного профиля S скорость движения в режиме разгона определяется на расстоянии $S - S_m$, где S_m – длина участка торможения.

Следовательно, для определения S_m и $(S - S_m)$, а также величины скорости, с достижением которой в режиме разгона необходимо начать торможение, нужно решить систему двух уравнений, первым из которых определяется значение скорости в точке начала торможения при разгоне автопоезда, а вторым – скорости при торможении автопоезда до снижения скорости в конце участка до $v_{\text{орп}}$.

В режиме разгона:

$$v_{HT} = \frac{T(S - S_T) + k(S - S_T)^2}{Z} + v_0^2. \quad (2)$$

В режиме торможения:

$$v_{HT} = v_{\text{орп}}^2 - \frac{2T_T S_T + kS_T^2}{Z}; \quad (3)$$

где S – длина участка, м; S_T – расстояние, на котором производится торможение, м; $T = A - Bv^2 = a - (\omega \cdot G + iG) - Bv_0^2$; T и T_T значения функционала $a - (\omega \cdot G + iG) - Bv_0^2$ соответственно для режима разгона и торможения.

Обозначив

$$a_1 = v_0^2 - v_{\text{орп}}^2 + \frac{2TS}{Z} + \frac{kS^2}{Z};$$

$$S_T = \frac{-\left(\frac{-2kS}{Z} - \frac{2T}{Z} + \frac{2T_T}{Z}\right) \pm \sqrt{\frac{(-2kS - 2T + 2T_T)^2}{Z} - 4\left(v_0^2 + \frac{2TS}{Z} + \frac{kS^2}{Z} - v_T^2\right) \cdot \left(\frac{k}{Z} + \frac{k}{Z}\right)}}{2 \cdot \frac{k}{Z}}. \quad (5)$$

В качестве примера определим расстояние от начала участка, на котором с режима разгона необходимо перейти на режим торможения моторным тормозом. Автопоезд МАЗ-6303-26 + МАЗ-83781 начинает движение на участке вертикальной кривой радиусом 10000 м с начальным уклоном 0,00 длиной 200 м с начальной скоростью 11,5 м/с, на 7-й передаче, $\omega = 0,02$; на следующем участке по условиям видимости ограничение составляет 11 м/с. В работе [12, 13] приведены коэффициенты зависи-

$$a_2 = -\frac{2T}{Z} - \frac{2kS}{Z} + \frac{2T_T}{Z};$$

$$a_3 = \frac{k}{Z} + \frac{k}{Z},$$

получаем квадратное уравнение вида

$$a_1 - a_2 S_T + a_3 S_T^2 = 0.$$

Решение квадратного уравнения:

мостей, аппроксимирующих тяговую и тормозную характеристики: $a = 1480$; $B = 1,41$; $a_T = -1459$; $B_T = 2,64$. В результате расчетов получим $S_m = 70,27$ м.

Для проверки точности расчетов по формуле (1) определим скорость движения, которой достигает автопоезд на расстоянии $S - S_T$ ($200 - 70,27$ м) = 129,73 м перед началом торможения и значение скорости, с которой автопоезд начнет движение на участке ограничения.

В конце участка разгона:

$$v^2 = 11,5^2 + \frac{2 \cdot 333,5 \cdot 129,73 + 4,8 \cdot 129,73^2}{5235} = 164,33; \quad v = 12,81 \text{ м/с.}$$

В начале участка ограничения:

$$v_{\text{орп}}^2 = 164,33 + \frac{2 \cdot (-1788) \cdot 70,27 + 4,8 \cdot 70,27^2}{5235} = 126,86; \quad v = 10,994 \text{ м/с.}$$

Таким образом, доказана правомерность предложенного метода расчетов и достаточная точность расчетов.

На прямолинейных в профиле участках определение точки начала торможения упрощается. При разгоне скорость движения определяется по формуле

$$v_{HT}^2 = 2 \frac{TS}{Z} + v_0^2. \quad (6)$$

При торможении:

$$v_{\text{орп}}^2 = \frac{2T_T S}{Z} + v_{HT}^2;$$

$$v_{HT}^2 = v_{\text{орп}}^2 + \frac{2T_T S_T}{Z}, \quad (7)$$

где S_T – расстояние, которое пройдет автопоезд в режиме торможения до достижения скорости $v_{\text{орп}}$ (м/с), м.

Таким образом

$$2T \frac{(S - S_T)}{Z} + v_0^2 = v_{\text{орп}}^2 - \frac{2T_T S_T}{Z};$$

$$2T \frac{(S - S_T)}{Z} + v_0^2 - v_{\text{орп}}^2 + \frac{2T_T S_T}{Z} = 0;$$

$$\frac{2TS}{C} - \frac{2TS_T}{C} + v_0^2 - v_{\text{орп}}^2 - \frac{2T_T S_T}{Z} = 0;$$

$$\frac{2TS}{Z} + v_0^2 - v_{\text{орп}}^2 = \frac{2T_T \cdot S_T}{Z} + \frac{2TS_T}{Z};$$

$$S_T = \frac{2TS + (v_0^2 - v_{\text{орп}}^2)Z}{2T_T + 2T}. \quad (8)$$

Правомерность предложенных зависимостей подтверждается следующим примером. Автопоезд МАЗ-6303-26 + МАЗ-83781 начинает движение на участке с уклоном – 0,010 и длиной 200 м с начальной скоростью 11,5 м/с, $\omega = 0,02$ на следующем участке ограничения скорости составляет 11 м/с.

Определить расстояние от начала участка до точки, начиная с которой

$$A = 1480 - 48000 \cdot 0,01 = 1000;$$

$$S_T = \frac{2 \cdot 813,5 \cdot 200 + (11,5^2 - 11^2) \cdot 5235}{2 \cdot 813,5 + 2(-1298,0)} = 90,98 \text{ м.}$$

$$T = 1000 - 1,41 \cdot 11,5 = 813,5;$$

$$A_I = -499 - 48000 \cdot 0,01 = -979;$$

$$T_T = -979 - 2,64 \cdot 11^2 = -1298;$$

Скорость движения в конце участка разгона определяется по формуле (7), при этом

$$S_{кр} = S - S_T = 200 - 90,98;$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot 813,5 \cdot 109,02}{5235} + 11,5^2 = 166,13; \quad v = 12,9 \text{ м/с};$$

$$v_{отр} = \frac{-2 \cdot 1298 \cdot 90,98}{5235} + 166,13 = 121,0; \quad v = 11 \text{ м/с}.$$

Выведенные зависимости и предложенная методика расчетов позволяют определить скорость неустановившегося движения лесовозных автопоездов с учетом ограничений скорости, а также выбрать оптимальное чередование режимов движения, ускорить и уточнить тяговые эксплуатационные расчеты.

Список литературы

1. Горбачевский В.А. Технология вывозки древесины и эффективность лесозаготовок // Промышленный транспорт. – 1984. – № 1. – С. 20–23.
2. Ильин Б.А. Тягово-эксплуатационные расчеты при проектировании лесовозных дорог. – Л.: Изд-во ЛТА, 1986. – С. 70.
3. Кишинский М.И. Исследования по эксплуатации автомобильных и тракторных лесовозных автопоездов и по устройству зимних дорог. – Л., 1969. – 52 с.
4. Корунов М.М. Техническое нормирование средних скоростей движения лесовозных автопоездов // Лесная промышленность. – 1955. – № 8. – С. 13–15.
5. Кувалдин Б.И. Расчеты на ЭВМ режимов движения лесовозных автопоездов / Б.И. Кувалдин, В.И. Скрыпник // Известия вузов. «Лесной журнал». – 1976. – № 6. – С. 60–65.
6. Салминен Э.О. Расчет на ЭЦВМ «Мир-1» скорости движения лесовозных и автомобильных автопоездов / Э.О. Салминен, А.Г. Никифоров // Межвузовский сборник науч. трудов «Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса». – Л., 1979. – С. 67–71.
7. Скрыпник В.И. Новые методы тяговых расчетов на лесовозном транспорте / В.И. Скрыпник, А.Н. Кочанов. – Петрозаводск, 1979. – 118 с.
8. Скрыпник В.И. Исследование эффективности применения различных типов автопоездов и схем вывозки леса с использованием методов моделирования движения на ПЭВМ / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Известия С-Петербургской лесотехнической академии: вып. 185. – СПб.: СПбГЛТА, 2008. – С. 93–100.
9. Скрыпник В.И. Анализ и расчет параметров движения лесовозных автопоездов / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, В.Н. Баглагин // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 8. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. – С. 140–144.
10. Шегельман И.Р. Экспериментально-расчетные исследования движения лесовозных автопоездов / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.В. Пладов // Известия высших учебных заведений «Лесной журнал». – № 4. – Архангельск: АГТУ, 2008. – С. 39–44.
11. Шегельман И.Р. Анализ эффективности лесотранспортных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем (СРНС) / И.Р. Шегельман, А.В. Кузнецов, В.И. Скрыпник // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – № 3. – Мытищи: МГУЛ, 2009. – С. 112–115.
12. Шегельман И.Р. Моделирование движения лесовозных автопоездов на ПЭВМ / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Пладов, А.Н. Кочанов, В.А. Кузнецов. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. – 234 с.
13. Шегельман И.Р. Эффективная организация автомобильного транспорта леса / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. – 280 с.
14. Шегельман И.Р. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.В. Пладов. – СПб.: Изд-во ПРОФИКС, 2008. – 304 с.

References

1. Gorbachevskij V.A. Tehnologija vyvozki drevesiny i jeffektivnost lesozagotovok. Promyshlennyj transport, 1984. no. 1. pp. 20–23.
2. Ilin B. A. Tjagovo-jekspluatacionnye raschety pri proektirovanii lesovoznih dorog. L.: Izd-vo LTA, 1986. pp. 70.
3. Kishinskij M.I. Issledovanija po jekspluatácii avtomobilnyh i traktornyh lesovoznih avtopoezdov i po ustrojstvu zimnih dorog. L., 1969. 52 p.
4. Korunov M.M. Tehnicheskoe normirovanie srednih skorostej dvizhenija lesovoznih avtopoezdov. Lesnaja promyshlennost. 1955. no. 8. pp. 13–15.
5. Kuvaldin B.I., Skrypnik V.I. Raschety na JeVM rezhimov dvizhenija lesovoznih avtopoezdov. Izvestija vuzov. «Lesnoj zhurnal», 1976. no. 6. pp. 60–65.
6. Salminen Je.O., Nikiforov A.G. Raschet na JeCVM «Mir-1» skorosti dvizhenija lesovoznih i avtomobilnyh avtopoezdov. Mezhvuzovskij sbornik nauch. trudov «Lesosechnye, lesoskladskie raboty i transport lesa». L., 1979. pp. 67–71.
7. Skrypnik V.I., Kochanov A.N. Novye metody tjagovyh raschetov na lesovoznom transporte. Petrozavodsk, 1979. 118 p.
8. Skrypnik V.I., Kuznecov A.V. Issledovanie jeffektivnosti primenenija razlichnyh tipov avtopoezdov i shem vyvozki lesa s ispolzovaniem metodov modelirovanija dvizhenija na PJeVM. Izvestija S-Peterburgskoj lesotehničeskoj akademii: vyp. 185. – SPb: SPbGLTA, 2008. pp. 93–100.
9. Skrypnik V.I., Kuznecov A.V., Baklagin V.N. Analiz i raschet parametrov dvizhenija lesovoznih avtopoezdov. Trudy lesoinzhenernogo fakulteta PetrGU. Vyp. 8. Petrozavodsk: izd-vo PetrGU, 2010. pp. 140–144.
10. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V., Pladov A.V. Jeksperimentalno-raschjotnye issledovanija dvizhenija lesovoznih avtopoezdov. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij «Lesnoj zhurnal». no. 4. Arhangelsk: AGTU, 2008. pp. 39–44.
11. Shegelman I.R., Kuznecov A.V., Skrypnik V.I. Analiz jeffektivnosti lesotransportnyh mashin s ispolzovaniem sputnikovyh radionavigacionnyh sistem (SRNS). Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik. no. 3. Mytishhi: MGUL, 2009. pp. 112–115.
12. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Pladov A.V., Kochanov A.N., Kuznecov V.A. Modelirovanie dvizhenija lesovoznih avtopoezdov na PJeVM. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2003. 234 p.
13. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V. Jeffektivnaja organizacija avtomobilnogo transporta lesa. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2007. 280. p.
14. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V., Pladov A.V. Vывozka lesa avtopoezdami. Tehnika. Tehnologija. Organizacija. SPb, Izdatelstvo PROFIKS, 2008. 304 p.

Рецензенты:

Григорьев И.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии лесозаготовительных производств, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург;
Питухин А.В., д.т.н., профессор, декан лесоинженерного факультета ПетрГУ, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск.

Работа поступила в редакцию 04.06.2014.