

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ НА ПОДХОДЕ К УЧАСТКАМ, ИМЕЮЩИМ ОГРАНИЧЕНИЯ СКОРОСТИ, И ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ПЕРЕДАЧ

Шегельман И. Р.<sup>1</sup>, Скрыпник В. И.<sup>1</sup>, Кузнецов А. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, Россия (Республика Карелия, 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33) kuzalex@psu.karelia.ru

Для повышения эффективности транспорта леса необходимо адекватно описывать режим движения лесовозного автопоезда при неустановившемся движении. Традиционные способы расчетов, основанные на методе равновесных скоростей, не позволяют в должной мере учитывать многие факторы, влияющие на движение лесовозного автопоезда в постоянно меняющихся условиях грузоперевозок. При этом значения параметров движения, полученные на основе известных зависимостей, отличаются от фактических в среднем в 1,4 раза, а на отдельных участках — в 2 раза. При расчетах и при моделировании движения на ПЭВМ затруднено определение момента перехода от одного режима движения к другому. В частности, это переход от режима разгона автопоезда к режиму снижения скорости с тем, чтобы не допустить превышения скорости на участке, имеющем ее ограничение, и обеспечить прохождение этого участка с максимально допустимой скоростью при выполнении условий безопасности движения; определение скорости движения, при которой наиболее целесообразно начинать переключение передач, особенно с  $n$ -ой на  $(n-1)$  передачу. Выведенные авторами расчетные зависимости позволяют получить необходимые значения параметров движения лесовозных автопоездов в этих режимах движения. Полученные зависимости и обоснованный новый рациональный метод расчетов рекомендуются для моделирования и расчетов показателей движения лесовозных автопоездов и обеспечивают упразднение итерационных вычислений и оптимизацию расчетов.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, методы тяговых расчетов, моделирование движения, показатели движения, ограничения скорости, переключение передач

## THEORETICAL APPROACH TO DESCRIBING THE PROCESS OF LOGGING TRUCKS MOTION DURING GEAR SHIFT AND ENTERING THE AREAS THAT HAVE SPEED LIMITATIONS

<sup>1</sup>Shegelman I. R., <sup>1</sup>Skrypnik V. I., <sup>1</sup>Kuznecov A. V.

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Petrozavodsk State University», Petrozavodsk, Russia (the Republic of Karelia, 185910, Petrozavodsk, Lenina prospect, 33) kuzalex@psu.karelia.ru

Increasing the efficiency of forest transport requires an adequate description of logging truck motion mode during unstable motion. Traditional calculation methods, based on the method of equilibrium velocity, do not allow paying due regard to many factors influencing logging truck motion in constantly changing conditions of cargo transportation. The values of motion parameters achieved on the basis of known dependencies differ from the real ones on the average 1,4 times, and at certain plots 2 times. It is difficult to define the moment of transition from one motion mode to another during calculations and motion simulation on PC. In particular, the transition from the mode of speeding-up of logging truck to the mode of speed reduction to avoid overspeeding at a plot with speed limitations, and in order to provide passing this plot at a maximum allowable speed fulfilling the conditions of traffic safety. It is also difficult to define the most suitable driving speed to begin gear shift, especially from  $n$  to  $(n-1)$  gear. Calculation dependencies deduced by the authors of the article allow obtaining all the necessary values of logging trucks motion parameters in these motion modes. The derived dependencies and the justified new rational method of calculations are recommended for modelling and calculations of logging trucks motion parameters. These dependencies and method provide abolishing of iterative computations and help to optimize calculations.

Keywords: Logging truck, methods of speed-time-distance calculation, motion simulation, motion indicators, speed limitations, gear shift.

В реальных производственных условиях водитель лесовозного автопоезда при движении по разным категориям лесовозных дорог самостоятельно определяет в зависимости от условий режим движения своей машины: момент переключения передач и торможения, начало замедления и ускорения и т.д. Для решения различных инженерных задач [2–6] необходимо адекватно учитывать действия водителя лесовозного автотранспорта и соответственно режим движения лесовозного автопоезда при неустановившемся движении. Традиционные способы расчетов, основанные на методе равновесных скоростей, не позволяют в должной мере учитывать многие факторы, влияющие на движение лесовозного автопоезда в постоянно меняющихся условиях движения (подъемы, спуски, наличие ограничений скорости и т.д.). При этом, как было доказано ранее [1, 7, 8, 9], значения параметров движения, полученные на основе этих зависимостей, отличаются от фактических в среднем в 1,4 раза, а на отдельных участках — в 2 раза.

Коллективом авторов [1, 7, 8, 9] на протяжении значительного периода времени проводились исследования, посвященные разработке методики и алгоритма расчетов и получению зависимостей, которые адекватно описывают режимы движения лесовозного автопоезда при неустановившемся движении. Выведенные зависимости позволяют с достаточной точностью получить необходимые значения параметров движения лесотранспорта, которые отличаются от фактических не более чем на 6% [9].

В работах [7, 8] выведены зависимости для определения скорости движения лесовозного автопоезда в конце участка длиной  $S$  с учетом начальной скорости –  $v_0$  и пройденного расстояния при изменении скорости от  $v_0$  до  $v_k$ , в режиме движения накатом, с полным и частичным использованием мощности двигателя, при торможении двигателем, моторным и колесными тормозами.

Однако при определении показателей движения вручную, а также при моделировании движения на ПЭВМ затруднено определение момента перехода от одного режима движения к другому, например:

1) переход от режима разгона автопоезда к режиму снижения скорости с тем, чтобы не допустить превышения скорости на участке, имеющем ее ограничение, и обеспечить прохождение этого участка с максимально допустимой скоростью при выполнении условий безопасности движения;

2) определение скорости движения, при которой наиболее целесообразно начинать переключение передач, особенно с  $n$ -ой на  $(n-1)$  передачу.

При моделировании движения лесовозного автопоезда через короткие интервалы пути приходится проводить большое количество итеративных вычислений [9]. Для уменьшения объемов расчетов при подходе к участкам, имеющим ограничения скорости, на ПЭВМ и

особенно при производстве их вручную предлагается определять необходимые показатели путем решения двух уравнений, одним из которых описывается движение при разгоне и определяется оптимальная величина скорости движения в точке начала торможения, а вторым — процесс изменения скорости движения при торможении.

Скорость движения на вертикальных кривых при разгоне и торможении определяется по формуле [7]:

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

здесь  $T = A - B \cdot v^2$ ;  $A = a - G \cdot \omega \pm G \cdot i + G \cdot \frac{C_c}{R_c}$ ;  $B = b + k_g \cdot \Delta \cdot \Omega \cdot v^2$ ;  $Z = \frac{G \cdot \delta}{g}$ ;  $k = \frac{G}{R}$ ,

где  $G$  – вес автопоезда, Н;  $R_c$  – радиус горизонтальной кривой, м;  $C_c$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению на горизонтальных кривых;  $a$  и  $b$  – коэффициенты зависимости, аппроксимирующей тяговую или тормозную характеристику автопоезда в виде  $F = a - b \cdot v^2$ ;  $\omega$  – коэффициент сопротивления качению;  $\delta$  – коэффициент учета инерции вращающихся масс;  $k_g$  – коэффициент сопротивления воздушной среды автомобиля;  $\Delta$  – коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от прицепов;  $\Omega$  – лобовая площадь автомобиля, м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус вертикальной кривой, м;  $i$  – продольный уклон;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $v$  – скорость движения автопоезда, м/с;  $S$  – расстояние от начала участка до точки, в которой определяется скорость движения, м.

Исходя из зависимости (1) скорость движения в точке начала торможения –  $v_{nm}$  на участке длиной  $l$ :

$$v_{nm}^2 = \frac{2T(l - S_T) + k(l - S_T)^2}{Z} + v_0^2; \quad (2)$$

или

$$v_{nm}^2 = \frac{2Tl - 2TS_T + kl^2 - 2klS + kS^2}{Z} + v_0^2, \quad (3)$$

где  $l$  – длина участка, м;  $S_T$  – расстояние, на котором производится торможение автопоезда, м.

Принимая в начале участка торможения  $v_{nm}$  за начальную скорость, получим:

$$v_{опр}^2 = \frac{2T''S_{морм} + kS_{морм}^2}{Z} + v_{nm}^2; \quad (4)$$

$$-v_{nm}^2 = \frac{2T''S_{морм} + kS_T^2}{Z} - v_{опр}^2. \quad (5)$$

$R$  и  $k$  принимаются со знаком «+» на вертикальной выпуклой кривой, со знаком «-» на вогнутой кривой.

Величина  $T''$  — тормозное усилие в точке начала торможения

$$T'' = T' + kl - kS_T$$

Следовательно,

$$-v_{um}^2 = \frac{2TS_T + 2lkS_T - 2S_T^2k + S_T^2k}{Z} - v_{oep}^2. \quad (6)$$

Просуммировав уравнения (3) и (6), получим:

$$\frac{2Tl - 2TS_T + kl^2 - 2klS_T + kS_T^2}{Z} + v^2 + \frac{2T'S_T + 2lkS_T - 2S_T^2k + kS_T^2}{Z} =$$

$$\frac{2Tl + kl^2}{Z} + v_0^2 - v_{oep}^2 = \frac{2TS_T - 2klS_T - 2T'S_T + 2lkS_T}{Z}. \quad (7)$$

Исходя из зависимости (4) получаем:

$$S_T = \left( \frac{2Tl + kl^2}{Z} + v_0^2 - v_{oep}^2 \right) \frac{Z}{2TS_T - 2klS_T - 2T'S_T + 2lkS_T};$$

$$S_T = \left( \frac{2Tl + kl^2}{Z} + v_0^2 - v_{oep}^2 \right) \frac{Z}{2T - 2T'}. \quad (8)$$

На прямолинейном в профиле участке решение упрощается, при  $k = \frac{G}{R} = 0$ , получаем:

$$S_T = \left( \frac{2Tl}{Z} + v_0^2 - v_{oep}^2 \right) \cdot \frac{Z}{-2T' + 2T}. \quad (9)$$

Проведенный анализ показал, что ранее разработанная методика [1] для решения поставленной инженерной задачи с использованием более сложных зависимостей пригодна для решения данной задачи при проведении массовых расчетов на ПЭВМ, но их освоение и использование в учебном процессе при расчетах вручную затруднительно. В то же время расхождения при расчетах с использованием обоих методов по максимальной допустимой скорости при разгоне и расстоянию до точки начала торможения превышают 0,5 %, а значения ограничений скорости движения совпадают практически полностью. Следовательно, новый, более рациональный метод расчетов вполне применим для практических целей.

Как известно, на практике при переключении передач скорость движения автопоезда изменяется. Кроме этого, водитель затрачивает определенное время на саму процедуру переключения, чем зачастую пренебрегают при расчетах, считая, что переключение передач происходит мгновенно, что приводит к значительным погрешностям и неточностям. При

переходе с низшей передачи для получения наибольшей интенсивности разгона необходимо переключение передачи с максимальной скорости на высшую передачу. При переходе с высшей передачи на низшую необходимо стремиться к переключению, при котором движение на низшей передаче начнется с максимально допустимой скорости.

Для определения скорости движения  $v$ , с которой следует переходить к движению на  $(n-1)$  передаче, используется зависимость, полученная в результате решения уравнения:

$$\frac{G \cdot \delta}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = T + \frac{v \cdot t \cdot G}{R}; \quad (10)$$

$$v = \frac{T \cdot g \cdot t}{G \cdot \delta} + \frac{t^2 \cdot v \cdot g}{2R} + v_0, \quad (11)$$

где  $t$  – время переключения передач, с.

Решая это уравнение относительно  $v_0$ , получим:

$$v_0 = -\frac{T \cdot g \cdot t}{G \cdot \delta} - \frac{t^2 \cdot v \cdot g}{2R} + v. \quad (12)$$

На прямолинейных в профиле участках  $R=\infty$ , тогда уравнение для определения скорости движения  $v_0$ , при достижении которой следует начинать переключение на  $(n-1)$  передачу, упрощается:

$$v_0 = -\frac{T \cdot g \cdot t}{G \cdot \delta} + v. \quad (13)$$

На вогнутой кривой в формуле (12) радиус  $R$  принимает отрицательное значение. При переключении с низшей на высшую передачу целесообразно начинать переключение передач при движении автопоезда с максимальной скоростью на  $n$ -ой передаче.

Таким образом, доказаны эффективность и достаточная точность расчетов скорости движения лесовозных автопоездов при переключении передач. Полученные зависимости и обоснованный новый рациональный метод расчетов могут применяться при моделировании и расчете показателей движения лесовозных автопоездов на ПЭВМ, а также при расчетах вручную, и обеспечивают упразднение итерационных вычислений и оптимизацию расчетов.

### Список литературы

1. Аналитические зависимости для определения рационального режима снижения скорости лесовозного автопоезда при дорожных ограничениях [Электронный ресурс] / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.С. Лещевич // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. – Режим доступа:

обращения 29.03.15).

2. Бурмистрова О.Н. Определение оптимальных скоростей движения лесовозных автопоездов из условия минимизации расхода топлива / О.Н. Бурмистрова, С.А. Король // Вестник Московского государственного университета леса. — Лесной вестник. – 2013. – № 1 (93). – С. 25–27.
3. Курьянов В.К. Экспериментальные исследования тормозной динамики лесовозных автопоездов / В.К. Курьянов, О.Н. Бурмистрова // Вестник Московского государственного университета леса. — Лесной вестник. – 2007. – № 4. – С. 105–106.
4. Ларионов В.Я. Расчет средних скоростей движения лесовозного автотранспорта / В.Я. Ларионов, А.А. Камусин, Д.М. Левушкин // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2014. – № S2. – С. 138–142.
5. Макеев В.Н. Определение параметров, характеризующих движение лесовозных автопоездов по участку магистрали общего пользования / В.Н. Макеев, С.И. Сушков, А.И. Фурменко, М.С. Солопанов // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 70–75.
6. Подготовительные работы в отечественной системе лесопользования: монография / И. Р. Шегельман, В. М. Лукашевич. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. – 84 с.
7. Скрыпник В.И. Вывод зависимостей для проведения тяговых расчетов и моделирования движения лесовозных автопоездов / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, В.Н. Баклагин // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2010. – С. 198–202.
8. Скрыпник В.И. Определение оптимальных режимов движения лесовозных автопоездов при наличии участков ограничения скорости / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: ВГЛТА, 2014. – С. 243–247.
9. Шегельман И.Р. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.В. Пладов. СПб, Издательство ПРОФИКС, 2008. – 304 с.

#### **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, директор ИЛИСН ПетрГУ, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск.