

УДК 656.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В  
КОНКРЕТНЫХ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

О. Ю. Киреев, Е. А. Корсунова, Д. А. Вишнеvский

Филиал Воронежского государственного  
технического университета в г. Борисоглебск

Email: s.i.sushkov@mail.ru

С целью моделирования движения лесовозных автомобилей и расчета показателей их движения в конкретных дорожных условиях режимы движения, выбираемые водителем, описываются дифференциальными уравнениями.

При движении на подъеме:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta_k} \left( D(v) - i - f - \frac{(kF \pm k'F')v^2}{G_a} \right), \quad (1)$$

где  $D(v)$  – динамический фактор, зависящий от скорости;  $i$  – продольный уклон;  $f$  – коэффициент сопротивления качению;  $\delta_k$  – коэффициент учёта вращающихся масс при  $k$ -ой передаче;  $t$  – время, с;  $k$  – коэффициент обтекаемости, зависящий от формы тела;  $v$  – скорость движения автомобиля относительно воздуха, м/с;  $G_a$  – сила веса автомобиля, кгс;  $F$  – площадь лобового сопротивления автомобиля, м<sup>2</sup>;  $k'$  – коэффициент обтекаемости с учётом сопротивления среды, действующего под углом к направлению движения;  $F'$  – площадь миделевого сечения автомобиля в плоскости, перпендикулярной к направлению движения среды, м<sup>2</sup> (рис. 1).

Сопротивление воздуха обуславливается в основном следующими факторами: трением в пограничном слое (сопротивление трения) и вихреобразованием в воздухе при различном давлении на переднюю и заднюю части автомобиля. Воздушное сопротивление движению лесовозного автопоезда рассматривается при неподвижной воздушной среде. В данном случае относительная скорость автопоезда соответствует его поступательной скорости [2]. Площадь лобового сопротивления автопоезда составляет наибольшую площадь сечения тела в плоскости, перпендикулярной направлению движения. Площадь сечения автопоезда в плоскости, перпендикулярной к движению ветра, определяется из 2 треугольников, показанных на рисунке 1:

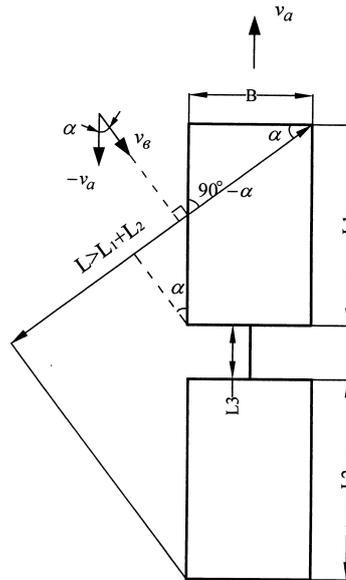


Рисунок 1 – Схема к определению показателя  $F'$  (площади миделевого сечения автомобиля)

$$F' = \left[ (L - B \operatorname{tg} \alpha) \sin \alpha + \frac{B}{\cos \alpha} \right] H, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол направления ветра;  $L$  – длина миделевого сечения, соответствующего направлению движения активной среды, м;  $B$ ,  $H$  – ширина и высота автопоезда, м;  $L_1 + L_2$  – длина транспортных средств, составляющих автопоезд, м;  $L_3$  – длина сцепного устройства, м.

При движении накатом (после разгона и отключения коробки перемены передач)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta_n} \left( i - f - \frac{(kF \pm k'F')v^2}{G_a} - \frac{2 + 0,09v}{1000} \right), \quad (3)$$

где  $\delta_n$  – коэффициент учета вращающихся масс при отсоединенном двигателе.

В формуле (3) последнее слагаемое определяет сопротивление трения трансмиссии. При движении на спусках в уравнение движения вводится тормозная сила двигателя и сила основной тормозной системы.

При торможении двигателем уравнение имеет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta_k} \left[ -i - f - \frac{(kF \pm k'F')v^2}{G_a} - \frac{2 + 0,09v}{1000} - \frac{i_k i_o V_A}{G_a r_k \eta_T} - \left( \frac{a_1 i_k}{0,105 r_k} - v - b_1 \right) \right], \quad (4)$$

где  $V_A$  - рабочий объем двигателя, л;  $a_1, b_1$  - коэффициенты ( $a_1 = 0,008, b_1 = 0,15$  для карбюраторных двигателей;  $a_1 = 0,001, b_1 = 0,2$  для дизелей);  $i_k, i_o$  - передаточные числа  $k$ -й и главной передач;  $r_k$  - радиус качения колеса, м;  $\eta_T$  - КПД трансмиссии.

При одновременном торможении (торможение двигателем тормозами) уравнение движения имеет вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{\delta_k} \left[ -i - f - \frac{(kF \pm k'F')v^2}{G_a} - \frac{2 + 0,09v}{1000} - \frac{i_k i_o V_A}{G_a r_k \eta_T} \left( \frac{a_1 i_k}{0,105 r_k} v - b_1 \right) - \gamma_T \right], \quad (5)$$

где  $\gamma_T$  - коэффициент использования тормозов.

Сопоставление уравнений (1-5) движения лесовозных автопоездов на различных режимах показывает, что их общий вид можно описать следующим способом:

$$\frac{dv}{dt} = a + bv + cv^2. \quad (6)$$

Применение уравнений движения лесовозного автопоезда в дорожном проектировании сдерживается следующими условиями. Во-первых, недостаточно изучен выбор водителем режима движения в различной дорожной обстановке. Во-вторых, практически отсутствует связь между большой (20-летней перспективой) дорожного проектирования и перспективами развития лесовозного парка автомобилей, то есть проектировщик ориентируется на режимы движения существующих автопоездов, а не на их перспективные модели. В-третьих, недостаточно разработаны алгоритмы моделирования и детальных расчётов на ЭВМ показателей движения при различных режимах, необходимых для детального анализа при вариантном проектировании дорог. В-четвёртых, в уравнениях (1-5) практически не учитываются эксплуатационные качества покрытия [1].

Дорожные сопротивления, в уравнениях (1-5), определяются величиной уклона  $i$  и коэффициентом сопротивления качению  $f$ . При проектировании дорог, необходимо учитывать, что коэффициент  $f$  в составе дорожных сопротивлений может существенно превышать сопротивление подъема  $i$  [3].

На величину  $f$  большое влияние оказывает боковой увод при действии на автопоезд поперечной силы, особенно на кривых малых радиусов. Снижение ров-

ности покрытия в процессе эксплуатации ведет к увеличению сопротивления качению. Это требует введения в уравнения (1-5) коэффициента, учитывающего влияние эксплуатационного состояния покрытия на величину сопротивления движению. Теоретически величина коэффициента сопротивления качению определяется по различным формулам в зависимости от скорости движения.

Предполагается, что поверхность качения имеет геометрически правильную форму. Однако известно, что современные технологические процессы строительства и ремонта автомобильных дорог не могут обеспечить геометрически правильной формы поверхности качения. При качении по неровной поверхности теряется часть энергии на сжатие шин и рессор, на колебание автопоезда, деформацию дорожной одежды. Поэтому, в процессе эксплуатации ровность дороги снижается, уменьшается скорость движения (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1 – Показатели толчкомера  $S_p$  в зависимости от качества и типа покрытия

Тип покрытия	Показатели толчкомера при состоянии покрытия, см/км			
	отличном	хорошем	удовлетворительном	неудовлетворительном
Асфальтобетонное (цементобетонное) дороги I-II категории	Менее 50	50-100	100-200	Более 200
Асфальтобетонное (цементобетонное) дороги III категории	Менее 50	50-100	150-300	Более 300
Щебеночные, обработанные вяжущим материалом	Менее 100	100-250	250-400	Более 400
Грунтовые, укрепленные битумом, с поверхностной обработкой	Менее 150	150-300	300-400	Более 400
Щебеночные без поверхностной обработки	Менее 200	200-350	350-500	Более 400
Гравийные без поверхностной обработки	Менее 200	200-350	350-500	Более 500
Грунтовые, улучшенные в сухой период	Менее 100	100-300	300-500	–
Булыжные мостовые	Менее 250	250-400	400-600	Более 600

Исследованиями отечественных учёных установлено существенное влияние ровности покрытия на величину сопротивления качению. Общепринято определять ровность с помощью толчкомера [2].

Статистические данные, позволяющие судить о влиянии различных факторов на ровность, в основном получены с помощью толчкомера. Сопротивление качению при движении по покрытиям различной ровности определяется величиной коэффициента:

$$f = f_0 + \alpha S_p v^2 10^{-6}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей ходовых частей автомобилей, равен 0,7 для грузовых, 0,5 для легковых;  $v$  – скорость, м/с;  $S_p$  – показатель толчкомера, зависящий от качества и типа покрытия, см/км [6].

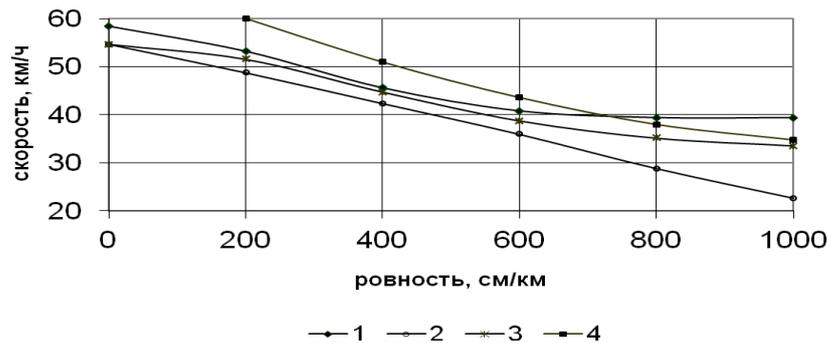


Рисунок 2 – Влияние ровности покрытия на скорость лесовозных автопоездов в зависимости от категории дороги

В виде, показанном в формуле (7), коэффициент сопротивления качению использован в дифференциальных уравнениях (1-5) при моделировании движения автопоездов в различных дорожных условиях. При проектировании лесовозных автомобильных дорог шероховатость покрытий оценивается коэффициентом сцепления  $\phi$ , который во всех расчетах обычно полагают зависящим только от типа покрытия, вида поверхностной обработки, от состояния проезжей части (сухое, мокрое, загрязненное, покрытое льдом) [3].

Исследования последних лет показали, что с ростом скорости коэффициент сцепления существенно меняется (табл. 2). Такого рода зависимости коэффициента сцепления от скорости учтены в расчётах тормозных режимов и при ограничении тягового усилия по сцеплению [4, 5].

Таблица 2 – Зависимость коэффициента сцепления различных покрытий от скорости

Наименование покрытия и его состояние	Коэффициент сцепления при скорости, км/ч		
	20	60	100
Сухое асфальтобетонное	0,75	0,65	0,51
Мокрое асфальтобетонное	0,55	0,43	0,40
Сухое асфальтобетонное с шероховатой обработкой	0,85	0,70	0,48
Мокрое асфальтобетонное с шероховатой обработкой	0,7	0,59	0,4
Тоже мокрое загрязненное	0,45	0,35	0,15

Продолжение таблицы 2

Наименование покрытия и его состояние	Коэффициент сцепления при скорости, км/ч		
	20	60	100
Сухое асфальтобетонное без поверхностной обработки	0,85	0,65	0,45
Тоже мокрое	0,65	0,48	0,32
Тоже мокрое загрязненное	0,3	0,2	0,1
Уплотненная снежная корка	0,2	0,12	0,04
Гололед	0,15	0,05	0,02

Вывод: с ростом скорости движения лесовозных автопоездов, коэффициент сцепления существенно меняется в зависимости от тормозных режимов и при ограничении тягового усилия по ним, зависящих от типа покрытия, вида поверхностной обработки и от состояния проезжей части лесовозной автомобильной дороги.

#### Библиографический список

1 Бурмистрова, О. Н. Методика расчета допускаемых скоростей на участках ЛАД с ограниченной видимостью в профиле [Текст] / О. Н. Бурмистрова, В. К. Курьянов, А. В. Скрыпников // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем лесного комплекса : Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. проф. В. С.Петровского. – Воронеж : ВГЛТА, 2000. – 351с.

2 Сушков, А. С. Методические основы параметров процессов модели управления системой «дорожные условия – транспортные потоки» // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – № 10(84).

3 Афоничев, Д. Н. Формирование проектных решений в автоматизированной системе проектирования объектов лесопромышленного комплекса [Текст] / Д. Н. Афоничев, П. С. Рыбников // Моделирование систем и процессов / ВГЛТА, НИИЭТ. Воронеж, 2012. Вып. 4. – С. 16-19.

4 Сушков, С. И. Методы оценки транспортно-эксплуатационного состояния дорог для транспортировки лесоматериалов [Текст] / С. И. Сушков, О. Н. Бурмистрова, В. Н. Бухтояров // Строительные и дорожные машины. – 2017. – № 6. – С. 30-32.

5 Афоничев, Д. Н. Обоснование протяженности лесовозного уса [Текст] / Д. Н. Афоничев // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011. – № 3. – С. 85-88.

6 Афоничев, Д. Н. Анализ прочностных характеристик дорожных конструкций в лесозаготовительных предприятиях [Текст] / Д. Н. Афоничев, С. И. Сушков, Д. В. Бурмистров // Успехи современной науки и образования. – Том 1, №1, 2017. – С. 77-81.