

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОГ

Введение

Одной из основных задач дорожной отрасли является обоснование эффективности вложения финансовых и других ресурсов в строительство, ремонты и реконструкцию автомобильных дорог. Эти обоснования включают анализ транспортно-эксплуатационных характеристик дорог на основе моделирования движения транспортных потоков с расчетом комплекса показателей движения в дорожных условиях, формируемых проектными решениями. Одним из главных показателем качества дороги служит скорость движения.

Цель и постановка задачи

Целью настоящей статьи является обобщение уравнений движения автомобилей и составление алгоритма их решения для анализа свободного движения при дорожных условиях, определяемых показателями технического уровня дороги и её эксплуатационного состояния.

Характеристики режимов движения автомобилей

Обоснования проектных решений автомобильных дорог или эксплуатационных мероприятий в течении их срока службы основаны на моделировании режимов движения автомобилей и транспортных потоков с расчетом скорости как при свободном движении, так и в плотных потоках.

Наиболее известны в теории эксплуатации автомобилей [1] следующие режимы движения, которые чаще всего анализируют в решении дорожных задач [2]: тяговое усилие, накат, торможение колесное, торможение двигателем, совместное торможение. Каждый режим характеризуется уравнением движения, решение которых в разных точках дороги позволяет найти скорость и ускорение

(замедление), частоту двигателя, расход топлива и т.п.

Цель статьи – в обобщении уравнений движения автомобилей и составлении алгоритма их решения для анализа свободного движения при дорожных условиях, определяемых показателями технического уровня дороги и её эксплуатационного состояния.

Каждый режим характеризуется уравнением сил.

Тяговое усилие:

$$P_{\kappa} = P_i + P_f + P_w + P_j \quad (1)$$

где P_{κ} – тяговая сила на ведущих колесах автомобиля, Н; P_i – сила сопротивления движению на подъем с уклоном i , Н; P_f – сила сопротивления качению, Н; P_w – сила сопротивления воздушной среде, Н; P_j – сила сопротивления инерции, Н.

Накат – уравнение такое же, как (1), только $P_{\kappa}=0$.

Торможение колесное – уравнение такое же, как для наката, только в правой части добавляется сила трения между шинами и проезжей частью P_{mk} .

Торможение двигателем – уравнение такое же, как для наката, только в правой части добавляются тормозная сила двигателя P_{md} .

Совместное торможение – уравнение такое же, как для наката, только в правой части добавляются и сила P_{md} , и сила P_{mk} .

Сила тяги и тормозные силы регулируются водителем в зависимости от дорожной обстановки, от значений большинства параметров ТУ дороги, которые устанавливаются в проекте дороги и показателей ЭС, меняющихся (снижаясь и возрастающая) в процессе всего жизненного цикла дороги.

От дорожных условий зависит сила торможения, регулируемая водителем

$$P_T = \gamma\varphi G + P_{md}, \quad (2)$$

где γ – степень торможения колесными тормозами, φ – коэффициент сцепления.

Коэффициент γ зависит от дорожных условий и равен 1 во время экстренного торможения (например, в аварийных ситуациях) с максимальным использованием сцепных свойств проезжей части; 0 – во время наката (например, на пологом спуске); более нуля во время служебного торможения, если необходимо уменьшить скорость при снижении видимости, во время въезда на кривую малого радиуса, на перекресток и т.п. В расчетах принято, что на коротких спусках водитель чаще всего тормозит колесными тормозами, а торможение двигателем – на затяжных спусках.

Часть параметров дороги, влияющих на режимы движения, постоянны – это параметры технических условий, другие (параметры эксплуатационного состояния, такие как показатели ровности и сцепных свойств) – переменные и их обосновывают в соответствии с расчетными периодами эксплуатации дороги.

В уравнениях режимов движения силы P_i , P_f и P_T , зависят, в первую очередь, от параметров дороги: i – продольного уклона, f – коэффициента сопротивления качению, φ – коэффициента сцепления. Сумма сил P_i и P_f – это дорожные сопротивления: $P_i = G \cdot i$, $P_f = G \cdot f$. Входящий в эти силы продольный уклон i практически не меняется со временем (исключения – смягчение уклона при реконструкции), а коэффициент сопротивления качению f зависит от типа покрытия, его ровности, которая снижается со временем, но восстанавливается при текущем и капитальном ремонте проезжей части. Согласно исследованиям А.К.Бируля [3]:

$$f = f_o + \alpha \cdot S_p \cdot v^2 \quad (3)$$

где f_o – коэффициент сопротивления качению при малой скорости (до 20 км/час), α – коэффициент жесткости подвески автомобиля, S_p – показания толчкомера, см/км, характеризующий ровность проезжей части.

Коэффициент сцепления φ согласно исследованиям А.П.Васильева [2]

$$\varphi = \varphi_{20} - \beta_\varphi(V - 20), \quad (4)$$

где φ_{20} – коэффициент сцепления при скорости 20 км/ч; β_φ – коэффициенты изменения сцепления в зависимости от скорости, V – скорость, км/ч.

И коэффициент сопротивления качению при малой скорости f_o , и коэффициент сцепления φ_{20} в формулах (3) и (4) назначают в зависимости от типа покрытия проезжей части и в зависимости от периода года.

В любом режиме движения есть ускорение $j = dv/dt$. Поэтому уравнение каждого режима – это дифференциальное уравнение вида

$$dv/dt = a \cdot v^2 + b \cdot v + c \quad (5)$$

где c – коэффициент связанный с продольным уклоном i и коэффициент сопротивления качению f_o , b – с силами трения деталей автомобиля, a – с силой тяги, с обтекаемостью автомобиля и потерей энергии на неровностях проезжей части.

Решение уравнения (5) необходимо для построения графика скорости как результата моделирования движения автомобилей при проезде конкретного участка дороги (проектируемого или эксплуатируемого). Несложно проинтегрировать уравнение (5), но результат, как зависимость скорости от времени t , малопригоден для построения графика скорости, необходима зависимость скорости не от времени, а от расстояния вдоль дороги. Поэтому решать уравнения движения автомобиля целесообразно по схеме на рис. 1.

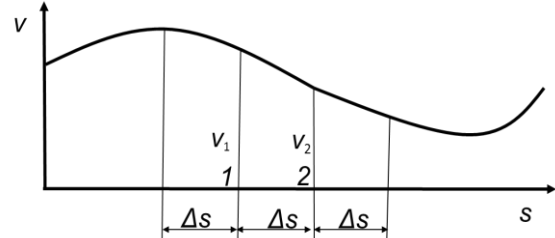


Рис. 1 - График скорости

Путь разбит на отрезки длиной Δs . Криволинейные отрезки заменены прямолинейными хордами, в пределах которых ускорения dv/dt – постоянны. Тогда дифференциальное уравнение (5) преобразуется в алгебраическое

$$j = a \cdot v^2 + b \cdot v + c \quad (6)$$

с решением

$$v_2 = v_1 + \sqrt{2j \cdot \Delta s} \quad (7)$$

где j - средняя величина ускорения (dv/dt) на участке Δs , v_1 и v_2 - соответственно скорость в начале и в конце участка Δs .

Алгоритм расчета скорости по схеме Эйлера с пересчетом

1. Установление режима движения и его параметров a , b , c на участке Δs . Установление начальной скорости v_1 ;

2. Присвоения на нулевой итерации:

$u = v_1, v = v_1$;

3. Расчет среднего ускорения j по формуле (6) и скорости v_2 по формуле (7);

4. Расчет отклонения ε скорости v_2 на данной итерации от скорости v_2 (u) на предыдущей итерации $\varepsilon = |v_2 - u|$;

5. Выполняется проверка: $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}$. Если условие верно, то расчет окончен, если нет, то переход к п.6;

6. Пересчет для следующей итерации: $u = v_2, v = (v_1 + v_2)/2$;

Среднюю величину ускорения вычисляют по формуле (6) в зависимости от параметров дороги и выбранного водителем режима движения на каждом участке Δs . В соответствии с приведенным алгоритмом расчета, последовательно находят значения v_2 и строят весь график скорости.

Трудность реализации данной схемы осложняется тем, что ускорение в формуле (6) зависит от средней скорости v на участке Δs , которая в начале расчета на каждом участке Δs неизвестна, известна только скорость v_1 , скорость v_2 нужно найти. Эта трудность преодолена решением по схеме Эйлера с пересчетом, в которой на первой итерации принимают среднее значение скорости на участке и начальное значение скорости v_2 равным v_1 , а затем уточняют на каждой последующей итерации.

Результаты расчета скорости свободного движения

Результаты расчета средних скоростей свободного движения приведены на рис. 2.

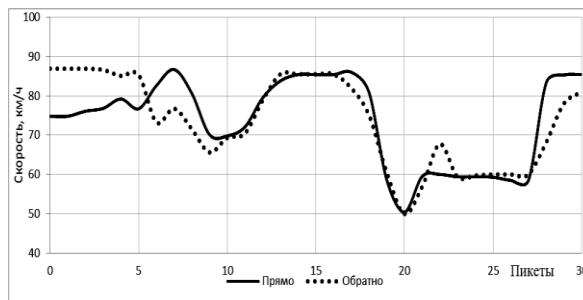


Рис. 2 - Средние скорости свободного движения

Рассчитанная таким образом на основе динамических возможностей автомобиля, скорость не должна превышать максимально допустимую по условиям безопасности скорости: v_R - на кривых, v_S - на участках с ограничением видимости S , $v_{\text{пдд}}$ - скорость, ограниченная правилами дорожного движениями.

Выводы

Скорости свободного движения служат исходными данными для моделирования движения транспортных потоков в течении типичного цикла эксплуатации дороги от ввода её в эксплуатацию с последующими текущими и капитальными ремонтами до момента её реконструкции. Составленный алгоритм вычислительных процедур моделирования позволяет получать для всей дороги зависимости средней скорости как всего потока, так и входящих в состав потока различных групп автомобилей, как основу для технико-экономических обоснований вариантного проектирования дорог.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог. - М.: Автотрансиздат, 1961. - 500 с
2. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
3. Бируля, А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. - М.: Транспорт, 1966. - 326 с
4. Справочная энциклопедия дорожника. Том II Ремонт и содержание автомобильных дорог. Москва, 2004, с. 1129.