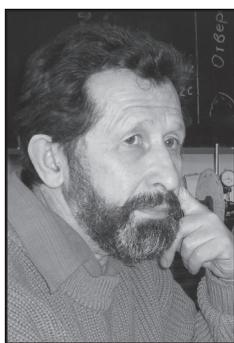
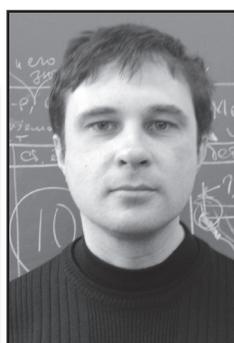
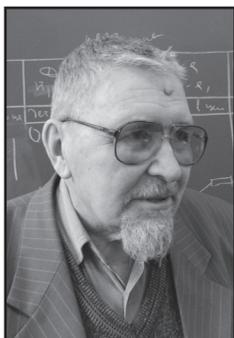


Процесс служебного торможения автомобиля



Вячеслав ЗОТОВ
Viacheslav M. ZOTOV

Николай ЗОТОВ
Nikolay M. ZOTOV



Алексей ФЕДИН
Alexey P. FEDIN

*Зотов Вячеслав Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Волгоградского государственного аграрного университета.
Зотов Николай Михайлович – кандидат технических наук, доцент Волгоградского государственного технического университета (ВГТУ).
Федин Алексей Петрович – кандидат технических наук, доцент ВГТУ, Волгоград, Россия.*

Служебное торможение автомобиля предполагает, как известно, сведение до минимума или нуля проскальзывания колес на дороге. Однако при этом процесс влечет для техники определенные материальные потери, о которых чаще всего предпочитают не говорить. Используемая авторами статьи математическая модель, а также численный эксперимент и натурные испытания дают основания для разработки рекомендаций водителям по грамотному торможению на разных типах дорожного покрытия. Заданные расчетной моделью значения призваны снизить износ шин, тормозных дисков и другие материальные потери.

Ключевые слова: эксплуатация автомобиля, служебное торможение, математическая модель процесса, численный эксперимент, натурные испытания, сокращение материальных потерь, типы дорожного покрытия.

При служебном торможении автомобиля весьма редко происходят дорожно-транспортные происшествия (ДТП). Поэтому рассмотрению и моделированию сопутствующих ему процессов уделяется незаслуженно малое внимание. В то же время именно на служебное торможение приходится наибольшие материальные потери (износ поверхности шин, тормозных дисков и т. п.) при эксплуатации автомобиля [1]. Для их снижения нужны определенные средства, в том числе математическая модель процесса, способная помочь на основании численного эксперимента разработать рекомендации водителю по более грамотному использованию тормозной системы.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Служебное торможение предполагает такое соотношение угловой ω и продольной V скоростей каждого колеса автомобиля, при котором отсутствует проскальзывание колес относительно дороги или же скорость проскальзывания пренебрежимо мала по сравнению с продольной скоростью машины. При этом, с одной стороны, коэффициент сопротивления качению f_k колеса не превышает коэффициента тре-

Таблица 1

Динамические характеристики автомобильного колеса при его движении в режиме служебного торможения по различным типам дорожного покрытия

$$M_{\text{тор}} = 1689 \cdot t; \quad M_{\text{сопр}}^k = m \cdot g \cdot \xi \quad (\xi - \text{плечо сопротивления качению}); \quad R_{\text{д}} = R \cdot (1 - z);$$

$$R_k = R \cdot (1 - 0,33 \cdot z); \quad z - \text{относительная нормальная деформация колеса}$$

Тип дорожного покрытия	m , кг	I , кг·м ²	R , м	z	ξ , м	f_0	$M_{\text{пред}}$, Н·м	$t_{\text{пред}}$, с
Сухой асфальтобетон	370	1,1	0,287	0,05	0,022	0,7	729,4	0,432
Мокрый асфальтобетон						0,4	409,7	0,243
Обледенелый асфальтобетон						0,1	90,0	0,053

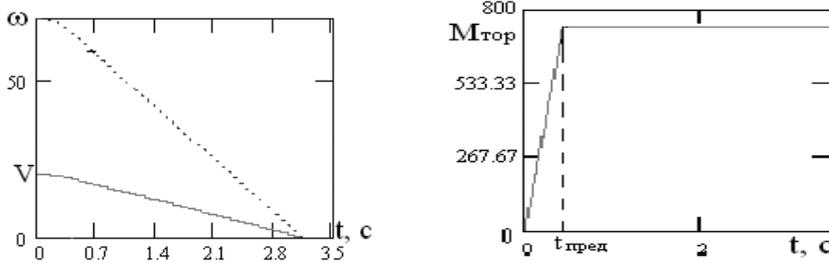


Рис. 1. Графики функций тормозного момента $M_{\text{тор}}$, линейной V и угловой ω скоростей колеса как функции времени t при его торможении по поверхности «сухой асфальтобетон» [модель (1), решение (5); $M_{\text{пред}}=729,4$ Нм; $t_{\text{пред}}=0,432$ с; $t_{\omega}=t_V=3,134$ с].

ния покоя $f_{\text{пок}}$ в пятне контакта колеса с дорогой; с другой стороны, выполняется ожидаемое соотношение между угловым $\dot{\omega}$ и линейным \dot{V} ускорениями колеса: $\dot{V} = \dot{\omega} \cdot R_k$ [2].

С учётом сказанного, а также используя математическую модель качения колеса в режиме торможения, предложенную в работе [3], получим:

$$\begin{cases} I \cdot \dot{\omega} = -(M_{\text{ТОР}}(t) + M_{\text{сопр}}^k) + f_k \cdot R_{\text{д}} \cdot P_z; \\ \dot{V} = -f_k \cdot g; \quad f_k = \frac{(M_{\text{ТОР}}(t) + M_{\text{сопр}}^k) \cdot R_k}{(I + m \cdot R_{\text{кд}} \cdot R_{\text{д}}) \cdot g}; \\ \dot{V} = \dot{\omega} \cdot R_k \end{cases}$$

После соответствующих преобразований математическая модель служебного торможения колеса автомобиля примет вид:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = -\frac{M_{\text{ТОР}}(t) + M_{\text{сопр}}^k}{I + m \cdot R_k \cdot R_{\text{д}}}, \\ \dot{V} = R_k \cdot \dot{\omega} \end{cases} \quad (1)$$

где $M_{\text{тор}}(t)$ — известная функция тормозного момента на колесе (определяется техни-

ческими характеристиками тормозного механизма автомобиля);

$M_{\text{сопр}}^k$ — момент сопротивления качению (определяется деформацией колеса);

I — момент инерции колеса;

m — масса автомобиля, приходящаяся на одно колесо;

R_k — радиус качения колеса;

$R_{\text{д}}$ — динамический радиус колеса.

Математическая модель (1) имеет аналитическое решение:

$$\begin{cases} \omega(t) = \omega_0 - \frac{\int_0^t M_{\text{ТОР}}(t) dt + M_{\text{сопр}}^k \cdot t}{I + m \cdot R_k \cdot R_{\text{д}}}, \\ V(t) = R_k \cdot \omega(t); \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициент трения покоя $f_{\text{пок}}$ больше коэффициента трения скольжения f_0 , поэтому ужесточим требования к модели (1), приняв неравенство $f_k < f_0$ (параметр f_0 характеризует тип поверхности дороги [5]). Тогда

$$f_k = \frac{R_k \cdot (M_{\text{ТОР}}(t) + M_{\text{сопр}}^k)}{g \cdot (I + m \cdot R_{\text{д}} \cdot R_k)} < f_0. \quad (3)$$

Так как с увеличением значения $M_{\text{тор}}(t)$ увеличивается значение f_k , то из (3)



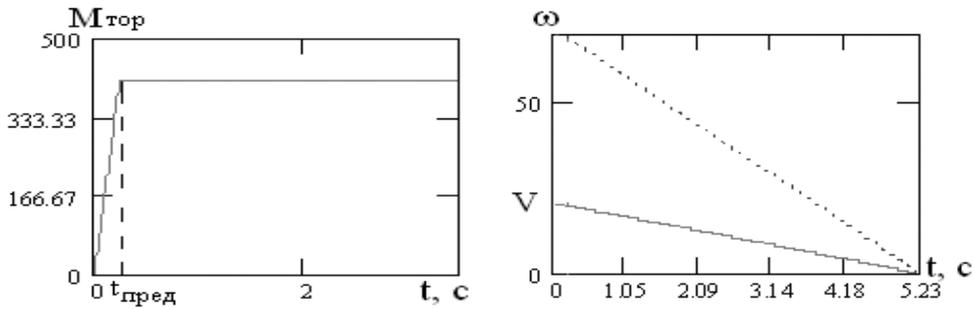


Рис. 2. Графики функций тормозного момента $M_{\text{тор}}$, линейной V и угловой ω скоростей колеса как функции времени t при его торможении по поверхности «мокрый асфальтобетон» [модель (1), решение (5); $M_{\text{пред}}=409,7 \text{ Нм}$; $t_{\text{пред}}=0,243 \text{ с}$; $t_{\omega}=t_v=5,228 \text{ с}$].

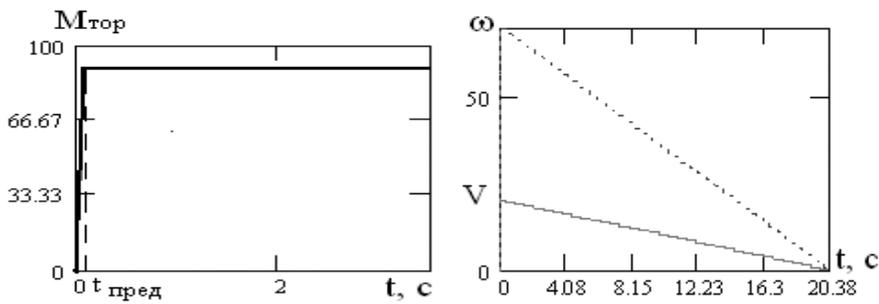


Рис. 3. Графики функций тормозного момента $M_{\text{тор}}$, линейной V и угловой ω скоростей колеса как функции времени t при его торможении по поверхности «обледенелый асфальтобетон» [модель (1), решение (5); $M_{\text{пред}}=90 \text{ Нм}$; $t_{\text{пред}}=0,053 \text{ с}$; $t_{\omega}=t_v=20,381 \text{ с}$].

найдем предельное значение тормозного момента $M_{\text{пред}}$, при котором ещё отсутствует проскальзывание колеса ($f_k = f_0$) и, следовательно, выполняются модель (1) и её решение (2).

$$M_{\text{ТОР}}(t) < M_{\text{пред}} = f_0 \cdot g \cdot \left(\frac{I}{R_k} + m \cdot R_{\text{Д}} \right) - M_{\text{сomp}}^k \quad (4)$$

Таким образом, решение математической модели служебного торможения автомобильного колеса описывается следующей системой уравнений:

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На базе решения (5) математической модели (1) проведено численное исследование

$$M_{\text{ТОР}}(t_{\text{пред}}) = M_{\text{пред}}; \quad M_{\text{пред}} = f_0 \cdot g \cdot \left(\frac{I}{R_k} + m \cdot R_{\text{Д}} \right) - M_{\text{сomp}}^k;$$

$$\text{при } t \in [0; t_{\text{пред}}]: \quad \omega(t) = \omega_0 - \frac{\left(\int_0^t M_{\text{ТОР}}(t) dt + M_{\text{сomp}}^k \right)}{I + m \cdot R_k \cdot R_{\text{Д}}}; \quad (5)$$

$$\text{при } t \in (t_{\text{пред}}; t_v]: \quad \omega(t) = \omega(t_{\text{пред}}) - \frac{(M_{\text{пред}} + M_{\text{сomp}}^k) \cdot (t - t_{\text{пред}})}{I + m \cdot R_k \cdot R_{\text{Д}}};$$

$$\text{при } t \in [0; t_v], \quad V(t) = R_k \cdot \omega(t).$$

процесса служебного торможения автомобиля с техническими характеристиками, представленными в таблице 1. Движение автомобиля происходит по горизонтальной твёрдой поверхности. Для различных типов дорожного покрытия определена верхняя граница тормозного момента $M_{\text{пред}}$, при котором выполнение условия $M_{\text{гор}}(t) < M_{\text{пред}}$ обеспечивает служебное торможение автомобиля.

На рис. 1–3 показаны графики кинематических характеристик колеса, движущегося в режиме служебного торможения в соответствии с решением (5) при технических характеристиках, представленных в таблице 1. Кроме того, даны расчётное время блокировки колеса t_{ω} и время полной остановки колеса t_v .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов численного эксперимента с натурными испытаниями, описанными в работах [1, 4], показывает адекватность математической модели (1) и её решения (5) физике ис-

следуемого процесса и возможность использования модели в разработке рекомендаций водителю по грамотному использованию рабочей тормозной системы автомобиля в зависимости от типа поверхности дороги. В этом случае при сохранении управляемости автомобилем тормозной путь будет соответствовать заданному значению, а материальные потери, связанные с торможением, сведутся к минимуму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарновский В. Н., Гудков В. Н., Третьяков О. Б. Автомобильные шины: устройство, работа, эксплуатация, ремонт. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
2. Иродов И. Е. Основные законы механики: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1985. – 248 с.
3. Зотов В. М., Зотов Н. М., Штельмах Т. В. Исследование решений дифференциальных уравнений движения колеса в тормозящем режиме // Обзорные прикладной и промышленной математики: 7-й всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике. – М., 2006. – Т. 13. Вып. 4. – С. 646–647.
4. Иларионов В. А., Пчелин И. К., Калинин Е. И. Коэффициент сцепления шин с дорогой и безопасность движения: Учеб. пособие. – М.: МАДИ, 1989. – 77 с. ●

PROCESS OF SERVICE BRAKING OF A CAR

Zotov, Viacheslav M. – Ph.D. (Tech), associate professor at the department of physics of Volgograd State agrarian university, Volgograd, Russia.

Zotov, Nickolay M. – Ph.D. (Tech), associate professor of the department of motor car technical operation and service of Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

Fedin, Alexey P. – Ph.D. (Tech), associate professor of the department of motor car technical operation and service of Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.

Service braking of a motor car supposes that tire scrubbing will be minimized or zero limited. But this process causes some material losses for technics that some prefer not to speak about. The mathematical model elaborated by the authors, numerical experiment

and full-scale testing are the basis for wording of instructions for drivers how to brake on different types of pavement and road surfaces. The values determined within calculated model might reduce wear and tear of tires, braking disks, other material damages.

Key words: car exploitation, service braking, mathematical model of a process, numerical experiment, full-scale testing, material losses reduction, pavement types.

REFERENCES

1. Tarnovskiy V. N., Gudkov V. N., Tretyakov O. B. Car tires: design, operation, exploitation, repairing [Автомобильные шины: устройство, работа, эксплуатация, ремонт]. Moscow, Transport publ., 1990, 272 p.

2. Irodov I. E. Basic laws of mechanics. Tutorial [Основныe законы механики: Учеб. пособие]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1985, 248 p.

3. Zotov V. M., Zotov N. M., Shtelmah T. V. Study on solutions of differential equations of wheel motion at braking regime [Исследование решений дифференциальных

уравнений движения колеса в тормозящем режиме]. Обзорные прикладной и промышленной математики: 7 всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике [Review of applied and industrial mathematics. 7th Russian symposium on applied and industrial mathematics]. Moscow, 2006, Vol. 13, Iss. 4, pp. 646–647.

4. Ilarionov V. A., Pchelin I. K., Kalinin E. I. Coefficient of adhesion of tires to the road and traffic safety. Tutorial [Коэффициент сцепления шин с дорогой и безопасность движения: Учеб. пособие]. Moscow, MADI, 1989, 77 p.

Координаты авторов (contact information): Зотов В. М. (Zotov V. M.) – zvmitt@yandex.ru; Зотов Н. М. (Zotov N. M.) – zotovnm@vstu.ru; Федин А. П. (Fedin A. P.) – fedin@vstu.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 30.11.2012
Принята к публикации / article accepted 21.02.2013

