

АНАЛИЗ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ДОРОЖНУЮ ОДЕЖДУ

А. В. КОРОЧКИН, канд. техн. наук

ОАО «Гипротрансмост», 129626, г. Москва, ул. Павла Корчагина, д. 2

E-mail: andrey_korochkin@mai

В статье представлена методика и результаты теоретических исследований по определению силового воздействия грузового транспортного средства на дорожную одежду. Отражено наличие колебаний и динамического фактора. Приводится анализ нормативной документации с рекомендациями по внесению изменений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, цементобетон, прочность, напряжение, прогиб, транспортное средство, дорога.

Дорожная одежда является одним из важнейших составных элементов автомобильной дороги. Затраты на её устройство в ряде случаев достигают 60...70 % от общей стоимости строительства, а состояние дорожной одежды в значительной степени влияет на скорость и безопасность движения.

В настоящее время стремительно увеличивается интенсивность движения транспортных средств, растут осевые нагрузки и удельный вес грузовых автомобилей в составе транспортного потока. Основная нагрузка ложится на автомобильные магистрали, соединяющие крупные области и районы страны. Значительная часть автомобильных магистралей имеет жёсткую дорожную одежду, что делает возможным движение тяжёлых транспортных средств с большой интенсивностью [1].

В наши дни при проектировании и строительстве автомобильных дорог максимальная расчётная нагрузка согласно СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги» и ГОСТ Р 52748-2007 «Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения» составляет 11,5 т. При этом выпускаемые и поставляемые в Россию грузовые автомобили имеют осевую нагрузку порядка 14 т (МАЗ, Scania, MAN).

Прогнозирование работы дорожной конструкции в реальных эксплуатационных условиях требует привлечения мощных средств математического моделирования на основе метода конечных элементов. Для целей исследования напряженно – деформированного состояния дорожной одежды в рамках данного

анализа, по отношению к большинству существующих теорий, требуется расширение динамической модели в области учета упругих свойств дороги.

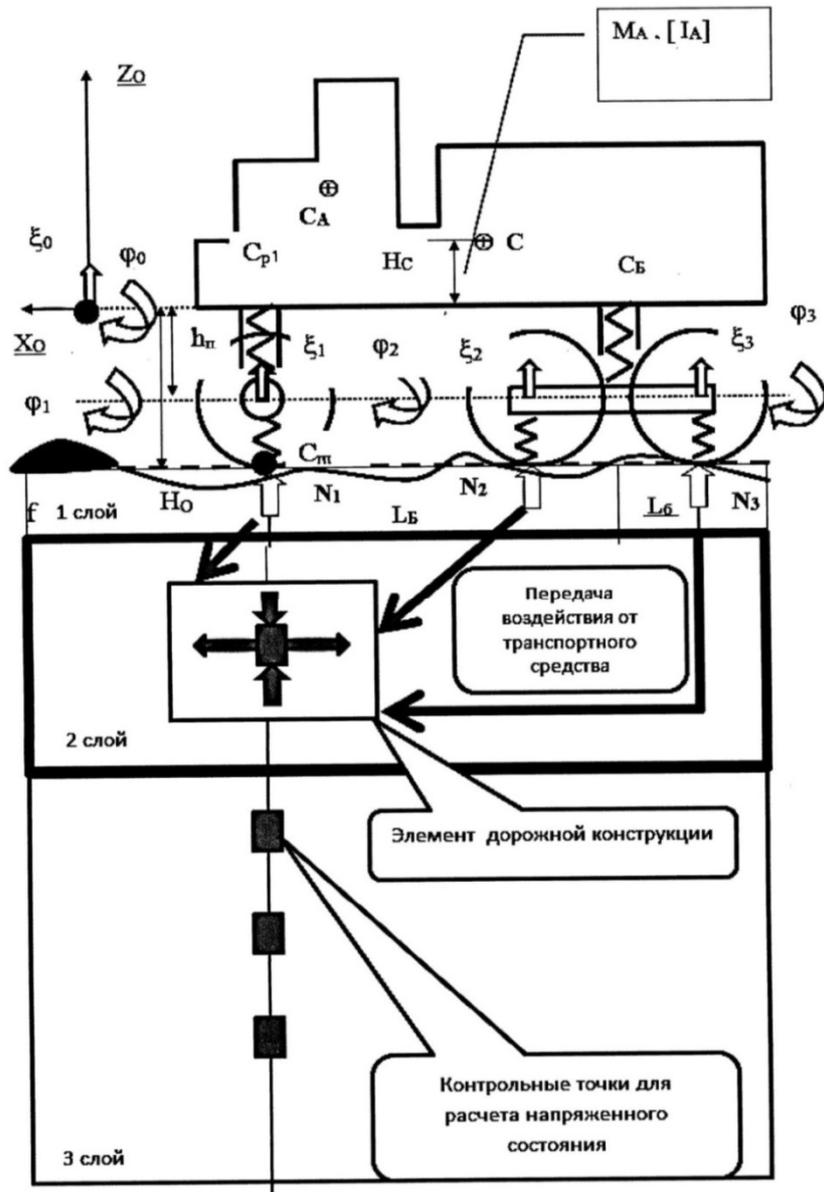


Рис. 1. Расчётная схема транспортного средства как источника формирования напряжённо – деформированного состояния дорожной конструкции: 1-й слой – асфальто-бетон; 2-й слой – цементобетон; 3-й слой – основание (щебень, песок, грунт).

В настоящей статье автомобильная дорога рассматривается в виде объекта системы «Дорожная конструкция- транспортное средство».

Использование в современном транспортном процессе на автомобильных дорогах многоосных транспортных средств делает актуальным формирование расчетной нагрузки на элементы дорожной конструкции с учетом сложного пространственного характера нагрузок.

На рис. 1 показано расчетное транспортное средство с основными элементами. В качестве аналога объекта исследования принято трёхосное транспортное средство с параметрами модели МА3-6501 (грузоподъёмностью порядка 20 тонн, полная масса 33,5 тонны) (рис. 2). Данные параметры транспортного

средства полностью соответствуют расчётной нагрузке, указанной в ГОСТ Р 52748-2007 «Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения».

Дифференциальные уравнения движения транспортного средства записаны в виде следующей матричной структуры:

$$[A]\ddot{q} + [B]\dot{q} + [C]q = [R_1][f_1] + [R_2][f_2] \quad (1)$$

Принят следующий набор обобщенных координат: $[\xi_0]$ – смещение направляющей точки в вертикальном направлении; $[\varphi_0]$ – угол поперечного крена; $[\alpha_0]$ – угол продольного крена; $[\xi_1]$ – смещение центра первого моста в вертикальном направлении; $[\varphi_1]$ – угол поперечного крена первого моста; $[\xi_2]$, $[\varphi_2]$, $[\xi_3]$, $[\varphi_3]$ – то же для второго и третьего мостов.



Рис. 2. Расчётное транспортное средство МАЗ-6501 (грузоподъёмность порядка 20 тонн, полная масса 33,5 тонны).

В правую часть уравнений движения транспортного средства входят воздействия от дорожных неровностей, которые задаются в базе двух составляющих: f_1 – полусумма высот неровностей по двум колеям, f_2 – полуразность высот неровностей по двум колеям,

$$\begin{bmatrix} f_{11}(t) \\ f_{12}(t) \\ f_{13}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_1(t - \tau_1) \\ f_1(t - \tau_2) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} f_{21}(t) \\ f_{22}(t) \\ f_{23}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_2(t) \\ f_2(t - \tau_1) \\ f_2(t - \tau_2) \end{bmatrix}.$$

Запаздывания воздействия по второй и третьей оси определяются с учетом запаздывания τ_1 и τ_2 соответственно по формулам

$$\tau_1 = L_B/V \quad \text{и} \quad \tau_2 = (L_B + L_0)/V, \quad \text{где } V - \text{ скорость транспортного средства.}$$

В этих уравнениях матрицы $[A]$, $[B]$, $[C]$ выражаются с помощью структурных матриц модели транспортного средства

$$\begin{aligned} [A] &= [X_i]^T [E_{20}] [M_i] [X_i], \\ [B] &= [X_c]^T [E_{10}] [B_x] [X_c], \\ [C] &= [X_b]^T [E_{10}] [C_x] [X_b]. \end{aligned}$$

В указанные структуры входят координаты X , Y и Z соответствующих точек: центры масс (Ц.М.) и узлы силовых элементов подвески (рессоры и амортизаторы). Полный перечень параметров расчетной модели транспортного средства приведен в таблице 1,

$$\begin{aligned}
 [X_{ij}] = & \begin{pmatrix} 0 & 0 & Z_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -X_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 [M_{ij}] = & \begin{pmatrix} M_A \\ M_A \\ M_A \\ I_{Axx} \\ I_{Ayy} \\ M_1 \\ M_1 \\ M_1 \\ I_{1xx} \\ I_{1yy} \\ M_B \\ M_B \\ M_B \\ I_{Bxx} \\ I_{Byy} \\ M_B \\ M_B \\ M_B \\ I_{Bxx} \\ I_{Byy} \end{pmatrix} \\
 [X_{c/ X_b}] = & \begin{pmatrix} 1 & d_p & -X_1 & -1 & -d_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -d_p & -X_1 & -1 & d_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & d_p & -X_B & -1 & -d_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -d_p & -X_B & -1 & d_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -d_w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & d_w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -d_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & d_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -d_w \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & d_w \end{pmatrix} \\
 [C_x/B_x] = & \begin{pmatrix} c_p/b_p \\ c_p/b_p \\ c_E/b_E \\ c_E/b_E \\ c_w/b_w \\ c_w/b_w \\ c_w/b_w \\ c_w/b_w \\ c_w/b_w \\ c_w/b_w \end{pmatrix} \\
 [R_1] = & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_w \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 [R_2] = & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ c_w/d_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_w/d_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_w/d_w \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Таблица 1

1	X_A	Координата x Ц.М. подрессоренной части
2	Z_A	Координата z Ц.М. подрессоренной части
3	Z_1	Координата z Ц.М. первого моста
4	Z_2	Координата z Ц.М. второго моста
5	Z_3	Координата z Ц.М. третьего моста
6	X_1	Координата x Ц.М. первого моста
7	X_2	Координата x Ц.М. второго моста
8	X_3	Координата x Ц.М. третьего моста
9	X_B	Координата x оси балансира
10	M_A	Масса подрессоренной части
11	M_1	Масса первого моста
12	M_B	Масса моста балансирной тележки

13	$I_{Аxx}$	Момент инерции подрессоренной части относительно оси x
14	$I_{Аyy}$	Момент инерции подрессоренной части относительно оси y
15	I_{1xx}	Момент инерции первого моста относительно оси x_1
16	I_{1yy}	Момент инерции первого моста относительно оси y_1
17	$I_{Бxx}$	Момент инерции моста балансирной тележки относительно оси $x_Б$
18	$I_{Бyy}$	Момент инерции моста балансирной тележки относительно оси $y_Б$
19	d_p	Половина рессорной колеи
20	$d_{ш}$	Половина колеи
21	c_p	Жесткость рессор моста
22	$c_{ш}$	Жесткость шин
23	$c_Б$	Жесткость рессор балансирной тележки
24	b_p	Коэффициент вязкого сопротивления в подвеске моста
25	$b_Б$	Коэффициент вязкого сопротивления в подвеске балансирной тележки
26	$b_{ш}$	Коэффициент вязкого сопротивления шин

Для системы уравнений (1) проводится Фурье-преобразование:

$$\Delta = -\omega^2 \cdot [A] + [C]; \quad P = \omega \cdot [C].$$

Далее вычислим матрицы $G = (\Delta + P \cdot \Delta^{-1} \cdot P)^{-1}$; $D = -G \cdot P \cdot A^{-1}$.

Действительную $Re(\omega)$ и мнимую $Im(\omega)$ части матричной частотной характеристики системы вычисляют по формулам:

для первого типа воздействия:

$$Re_1(\omega) = G[R_{11}] + G[R_{12}] \cos(\omega\tau_1) + D[R_{12}] \sin(\omega\tau_1) + G[R_{13}] \cos(\omega\tau_2) + D[R_{13}] \sin(\omega\tau_2)$$

$$Im_1(\omega) = D[R_{11}] - G[R_{12}] \sin(\omega\tau_1) + D[R_{12}] \cos(\omega\tau_1) - G[R_{13}] \sin(\omega\tau_2) + D[R_{13}] \cos(\omega\tau_2)$$

для второго типа воздействия:

$$Re_2(\omega) = G[R_{21}] + G[R_{22}] \cos(\omega\tau_1) + D[R_{22}] \sin(\omega\tau_1) + G[R_{23}] \cos(\omega\tau_2) + D[R_{23}] \sin(\omega\tau_2)$$

$$Im_2(\omega) = D[R_{21}] - G[R_{22}] \sin(\omega\tau_1) + D[R_{22}] \cos(\omega\tau_1) - G[R_{23}] \sin(\omega\tau_2) + D[R_{23}] \cos(\omega\tau_2)$$

По передаточным функциям для обобщенных координат и воздействиям определяются нормальные реакции транспортного средства на дорожную поверхность по каждой оси:

$$N_k = (\zeta_k - \varphi_k d_k - f) c_{ш}$$

Далее находятся действительная Re и мнимая Im части амплитудно-частотной характеристики от каждой составляющей воздействия [1,2] для выбранной расчетной величины и квадрат модуля частотной характеристики:

$$H_{[1,2]}^2(\omega) = Re_{[1,2]}^2 + Im_{[1,2]}^2$$

Стохастические воздействия задаются двухмерной моделью дорожной поверхности с помощью спектральных плотностей [2]:

синфазное воздействие по колеям:

$$S_1(\omega) = \frac{D_0 V}{\omega^2} \frac{\omega^2 + 2\omega_0^2}{\omega^2 + \omega_0^2} \frac{\omega^2 + (\lambda_1 V)^2}{\omega^2 + (\lambda_2 V)^2} \frac{(\lambda_{ш} V)^2}{\omega^2 + (\lambda_{ш} V)^2} \frac{(\lambda_B V)^2}{\omega^2 + (V\lambda_B)^2};$$

противофазное воздействие по колеям:

$$S_2(\omega) = \frac{D_0 V}{\omega^2 + \omega_0^2} \frac{\omega^2 + (\lambda_1 V)^2}{\omega^2 + (\lambda_2 V)^2} \frac{(\lambda_{ш} V)^2}{\omega^2 + (\lambda_{ш} V)^2} \frac{(\lambda_B V)^2}{\omega^2 + (\lambda_B V)^2}.$$

Числовые значения параметров выбранного типа покрытия приведены в таблице 2.

Используется следующая зависимость

$$\lambda_{ш} = K / B / 2,$$

где $B = 2d_k$ – ширина колеи транспортного средства.

Таблица 2

Параметры	Асфальтовое покрытие (удовлетворительное)
D0	0.00006
λ_1	5.0
λ_2	3.0
K	4.5
λ_B	100

Дисперсия расчетной величины определяется по формуле:

$$D_{\text{РАСЧ}} = (1/2\pi) \left(\int_{\omega_H}^{\omega_K} H_1^2(\omega) S_1(\omega) d\omega + \int_{\omega_H}^{\omega_K} H_2^2(\omega) S_2(\omega) d\omega \right)$$

Эти вычисления проводятся численными методами. В дальнейшем полученные реакции дорожной поверхности используются для формирования тензора напряжений элемента дорожной конструкции, что выходит за пределы данной статьи [3].

Расчёт силового взаимодействия транспортного средства и дорожной конструкции выявил свойство дорожной одежды воспринимать весь частотный спектр воздействий, при этом наибольшая доля дисперсии напряжений (более 90 %) расположена в области высокочастотного резонанса [3].

На сегодняшний день на основных автомобильных дорогах наблюдается достаточно высокая интенсивность движения транспортных средств. Отмечены пиковые значения в 14000...15000 авт./сут на каждую полосу движения с большой долей грузовых автомобилей. При этом перспективные значения интенсивности движения подходят к максимально возможной пропускной способности дороги и составляют 18000...20000 авт./сут на полосу. Как следствие, на дорожную одежду воздействует расчётная нагрузка, соответствующая требуемому общему модулю упругости конструкции 500...550 МПа. Одновременно с этим отмечено высокое изнашивающее воздействие транспортного потока на дорожное покрытие [4]. Перспективное значение расчётной нагрузки за срок службы дороги (25...30 лет) соответствует требуемому общему модулю упругости конструкции порядка 700...800 МПа. Проведённые исследования теоретически доказали зависимость реакции дорожной конструкции на транспортное средство в зависимости не только от его веса, но и скорости. В области эксплуатационных скоростей (до 100-120 км/ч) доля динамической прибавки составляет порядка 30 – 35 %, достигая значений в 35-45 % для скоростей свыше 130 км/ч. Данные положения требуют внесения изменений в нормативную документацию.

Л и т е р а т у р а

1. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Медников И.А. и др. Жёсткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / Под ред. Г.И. Глушкова. – М.: Транспорт, 1987. – 255 с.
2. Динамика системы: Дорога – Шина – Автомобиль – Водитель. – Под ред. А. А. Хачатурова. – М.: «Машиностроение», 1976. – 535 с.
3. Пановко Я. Г., Губанова И. И. Устойчивость и колебания упругих систем. – М.: Изд-во «Наука», 1987. – 352 с.
4. Brian K., Diefenderfer P.E. Composite Pavement Systems: Synthesis of Design and Construction Practices, Virginia, 2008.

References

1. Glushkov, G.I., Babkov, V.F., Mednikov, I.A. et al (1987). Jestkie pokritiya aerodromov i avtomobilnih dorog; Pod red. G.I. Glushkova, Moscow: Transport, 255 p.
2. Dinamika sistemy: Doroga – Shina – Avtomobil – Voditel, Pod. red. A. A. Xachaturova, Moscow: «Mashinostroenie», 1976, 535 p.
3. Panovko, Ya. G., Gubanova, I. I. (1987). Ustoychivost i Kolebaniya Uprugih Sistem, Moscow, “Nauka”, 352 p.

4. Brian, K., Diefenderfer, P.E. (2008). *Composite Pavement Systems: Synthesis of Design and Construction Practices*, Virginia.

**ANALYSIS OF FORCE INFLUENCE OF TRANSPORT VEHICLES
ON ROAD CLOTHING**

Korochkin A.V.

In the article, a methodology and results of theoretical researches on determination of power influence of freight transport vehicle on a travelling clothing are presented. The presence of vibrations and dynamic factors is reflected. An analysis of normative documentations with recommendations on making alteration is given.

KEYWORDS: bituminous concrete, cement-and-concrete, strength, stresses, pavement, road.

