

УДК 625.711.83

И. И. ЛЕОНОВИЧ, А. В. ЖУКОВ, К. Б. АБРАМОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ДОРОГУ

В процессе эксплуатации автомобильные дороги испытывают динамическое воздействие транспортных систем. Величина и характер этого воздействия могут существенно изменяться в зависимости от скорости движения системы, ее общих параметров, качества подрессоривания и степени ровности дорожного покрытия.

На степень ровности автомобильных дорог влияют многие факторы: качество дорожно-строительного материала, технология строительства, интенсивность и скорости движения, перенасыщение влагой дорожной конструкции, своевременное и качественное проведение всех ремонтных работ, особенности взаимодействия транспортных систем с дорогой (колебания систем, режимы движения) и т. д. Наличие того или иного вида неровностей на поверхности покрытия является практически неизбежным. Даже при сдаче дорог в эксплуатацию на них имеются первоначальные неровности, обусловленные технологией строительства и качеством дорожно-строительного материала. В эксплуатационных условиях начальные неровности начинают увеличиваться под действием движения транспортных систем и природных факторов, что приводит к увеличению динамической нагруженности элементов транспортной системы и дополнительному динамическому воздействию на дорогу.

При расчете дорожных одежд удельное давление колеса расчетного автомобиля, которое является величиной общего давления (веса и динамических воздействий транспортной системы), приходящегося на единицу площадки, принимается по нормативам [4]. Однако имеющиеся нормативы не являются достаточно полными и не могут учесть всех особенностей силового взаимодействия транспортной системы и дороги, зависящего от типа и конструкции подвижного состава, расчетных скоростей движения, степени ровности дорожного покрытия. Поэтому очевидно необходимость в получении коэффициентов динамичности расчетным путем с учетом всех перечисленных факторов, в противном случае возможно значительное занижение или завышение расчетных нагрузок при определении толщины покрытия. Кроме того, очень важно иметь информацию не только о величине динамических нагрузок, но и о характере их изменения (продолжительность действия, периодичность и т. д.).

Вскрытие сущности происходящих динамических процессов позволит изыскать наиболее целесообразные пути снижения нагруженности дорожного покрытия, выбрать оптимальные параметры автомобилей и прицепного состава, найти объяснение различным сложным явлениям, происходящим в конструкции дорожных одежд. К таким явлениям относятся, в частности, образование и развитие волнообразных неровностей на автомобильных дорогах. Наряду с другими факторами, влияющими на волнообразование, особое значение имеет динамическое воздействие,

вызванное колебаниями подрессоренных и неподрессоренных масс транспортных систем при движении по неровностям.

С целью изучения процесса динамического воздействия транспортных машин на дорогу рассмотрим систему (рис. 1), имитирующую ось автомобиля или автопоезда [1].

Исследуем сначала частный случай без учета колебаний неподрессоренной массы: жесткость рессор C_p и шин $C_{ш}$ заменяем приведенной жесткостью C , амортизатор отсутствует, подвеску считаем линейной [1].

В самом общем случае [2, 3, 6] микропрофиль дороги носит случайный характер. Неровности на поверхности покрытия, имея различную форму, длину и высоту, чередуются в различном порядке. Однако известно, что на участке достаточной длины можно выделить, как правило, от двух до пяти неровностей [1] более или менее правильной формы, близкой к синусоидальной.

Принимаем в нашем случае форму неровностей синусоидальной, т. е. $q = H \sin \omega t$.

Динамическое давление на дорогу для системы, приведенной на рис. 1, равно ($\xi = 0$):

$$R_K(t) = (G_n + G_{\Pi}) + m_n \ddot{q} - (Z - q)C - (Z - q)K, \quad (1)$$

где G_{Π} и G_n — вес подрессоренных и неподрессоренных частей системы соответственно; m_n — неподрессоренная масса; $(Z - q)$ — деформация упругого элемента подвески; K — коэффициент сопротивления подвески.

Для определения динамического давления $R_K(t)$ необходимо найти перемещения Z . Находим $Z = f(t)$, решая дифференциальное уравнение, описывающее вертикальные колебания системы (рис. 1). Указанное уравнение, полученное на основании принципа Лагранжа, имеет вид

$$\ddot{Z} + 2h\dot{Z} + p^2Z = h' \sin \omega t, \quad (2)$$

где $2h = K/M$; $p^2 = C/M$; $h' = CH/M$.

В соответствии с общеизвестным решением уравнения (2) выражение Z для установившихся колебаний имеет вид

$$Z = A \sin(\omega t - \alpha), \quad (3)$$

где A — амплитуда вынужденных колебаний,

$$A = \frac{h'}{\sqrt{(p^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}};$$

ω — частота возмущающей силы, $\omega = \frac{2\pi v}{L_n}$; α — разница фаз между вынужденными колебаниями и динамической силой,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\omega h}{p^2 - \omega^2}.$$

Установившиеся колебания имеют место в том случае, когда система движется по волнообразным неровностям в течение достаточно длительного времени и собственные колебания ее уже затухли.

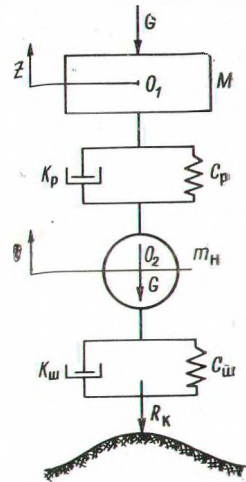


Рис. 1. Расчетная схема

В начальный период движения при проезде всего нескольких неровностей собственные формы колебаний накладываются на вынужденные и в этом случае возможно значительное изменение амплитуд и частот колебаний системы. Учет этого, так называемого переходного процесса часто (в зависимости от постановки задачи) является необходимым [5], например при изучении образования и развития волнообразных неровностей на автомобильных дорогах с гравийным покрытием и других явлений.

Покажем на конкретном примере необходимость учета переходных процессов при расчете динамических воздействий транспортных систем на дорогу.

Общее решение уравнения (3) имеет вид

$$Z = e^{-ht} \left(Z_0 \cos \sqrt{p^2 - h^2} t + \frac{hZ_0 + \dot{Z}_0}{\sqrt{p^2 - h^2}} \sin \sqrt{p^2 - h^2} t \right) - Ae^{-ht} \left[\sin(-\alpha) \cos \sqrt{p^2 - h^2} t + \frac{\omega \cos \alpha + h \sin(-\alpha)}{\sqrt{p^2 - h^2}} \times \right. \\ \left. \times \sin \sqrt{p^2 - h^2} t \right] + A \sin(\omega t - \alpha). \quad (4)$$

Приняты следующие начальные условия:

при $t = 0$, $Z = Z_0 = 0$, $\dot{Z} = \dot{Z}_0 = 0$.

Тогда

$$Z = -Ae^{-ht} \left[\sin(-\alpha) \cos \sqrt{p^2 - h^2} t + \frac{\omega \cos \alpha + h \sin(-\alpha)}{\sqrt{p^2 - h^2}} \times \right. \\ \left. \times \sin \sqrt{p^2 - h^2} t \right] + A \sin(\omega t - \alpha). \quad (5)$$

По формуле (1) были произведены вычисления $R_R(t)$ при следующих параметрах системы:

$$M = 2,41 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{см}; m_n = 0,76 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{см}; G_n = 2380 \text{ кг}; G_{\text{н}} = 760 \text{ кг};$$

$$C_p = 410 \text{ кг/см}; K = 30 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{см}; C_{\text{ш}} = 1600 \text{ кг/см}; C = 327 \text{ кг/см}.$$

Постоянные параметры уравнения равны: $2h = 12,4 \text{ сек}^{-1}$; $\rho^2 = 136 \text{ сек}^{-1}$; $h' = 853 \text{ см/сек}$.

На рис. 2 приведены кривые $R_R = f(t)$ при $v = 10, 15, 20$ и 25 км/ч , для всех случаев $H_n = 3 \text{ см}$, $L_n = 93,3 \text{ см}$.

Из рисунка видно, что кривые динамических давлений имеют волнообразный вид. Общим для всех скоростей движения является характер распределения максимальных динамических давлений по длине волнообразных неровностей. При скорости движения системы более 10 км/ч в начале неровности наблюдается увеличение динамического давления, затем колесо разгружается при проходе через вершину. На графике наглядно видно резкое возрастание динамических давлений с увеличением скорости движения. Максимальные динамические давления при движении транспортной системы наблюдаются при въезде на волнообразную неровность и во впадине. С увеличением скорости движения точка приложения максимального давления во впадине смещается от середины впадины в сторону движения. Очевидно, при установившихся колебани-

ях и многократном воздействии транспортной системы следует ожидать образования очередной неровности при въезде на вершину и углубление впадины.

На рис. 2 приведены кривые динамического воздействия системы для переходного процесса (2, 4, 6, 8).

Из анализа этих кривых видно, что максимальное давление приходится на зону перехода впадины неровности в выступ. Характерно, что в начальный период движения при всех скоростях кривая R_k имеет не-

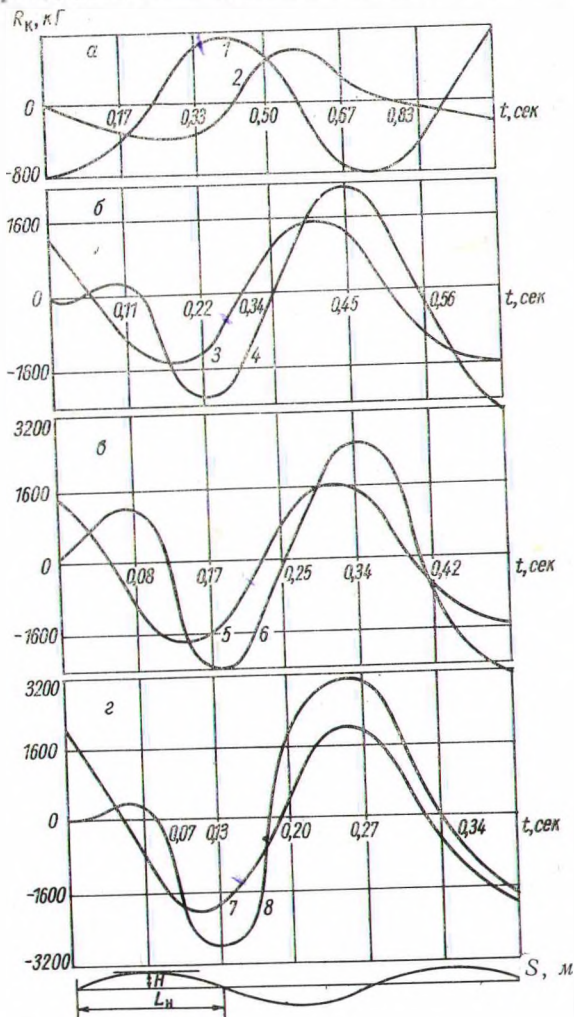


Рис. 2. Зависимости $R_k=f(t)$ при установившихся (1, 3, 5, 7) и неустановившихся (2, 4, 6, 8) колебаниях транспортной системы; $v=10$ км/ч (а), 15 (б), 20 (в) и 25 км/ч (г) ($H_n=3$ см; $L_n=93,3$ см)

сколько меньшую частоту перехода от отрицательных значений к положительным, чем при установившихся колебаниях. Это как раз и объясняется суммированием вынужденных и собственных колебаний подвесной массы системы. Этим также объясняется и различие в значениях амплитуд кривых 1, 3, 5, 7 и 2, 4, 6, 8. Причем с возрастанием скорости движения это различие становится более существенным. Так, при $v=15$ км/ч разница амплитуд R_k^{max} для установившихся и неуста-

новившихся колебаний составляет 450 кг, а при $v=20$ км/ч — 850 кг, т. е. разность динамических давлений увеличилась почти вдвое.

Анализ расчетных данных показывает, что динамическое взаимодействие транспортных систем с неровностями на поверхности покрытия должно определяться с учетом переходного процесса, так как при этом происходит не только сдвиг максимумов и минимумов кривых давлений, но и существенно различаются максимальные значения амплитуд. Если при $v=15$ км/ч $R_{к.уст}^{max}$ составляет 4860 кг, то при $R_{к.перест}^{max}$ — 5510 кг.

На рис. 3, а показана зависимость максимального динамического давления от скорости движения при $\xi=0$. Как видно, для всех рас-

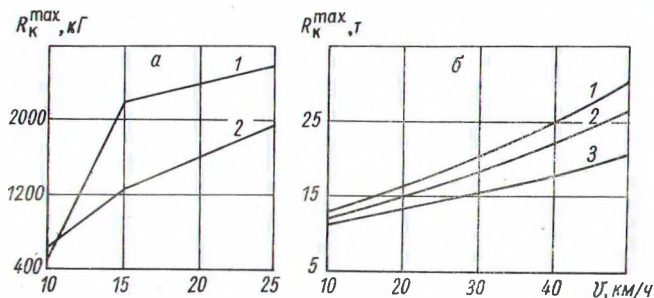


Рис. 3. Зависимость максимального динамического давления системы на дорогу от скорости движения: а— $\xi=0$; 1—при неустановившихся колебаниях; 2—при установившихся колебаниях; б— $\xi \neq 0$; $L_n=1$ м (1), 1,5 (2) и 2 м (3)

смотренных случаев с увеличением скорости наблюдается значительное возрастание значений $R_{к}^{max}$.

С целью исследования влияния неподрессоренных масс системы ($\xi \neq 0$), а также параметров неровностей и скоростей движения на R_k дополнительно были проведены расчеты с помощью АВМ МН-7. При вычислениях R_k широко варьировались скорости движения и параметры неровностей. Числовые значения параметров системы были приняты следующими:

$$M = 9,4 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{см}; m_n = 6,6 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{см}; C_p = 584 \text{ кг}/\text{см};$$

$$K = 8,5 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{см}; C_{ш} = 3686 \text{ кг}/\text{см}; K_{ш} = 40 \text{ кг} \cdot \text{сек}/\text{см}.$$

Результаты вычислений R_k для скорости движения 30 и 50 км/ч показаны на рис. 4. Из анализа кривых для данной системы видно, что общий характер процесса сохраняется таким же, как и в предыдущем случае. Однако при учете колебаний неподрессоренных масс повышается возможность отрыва колес от поверхности дороги, размах колебаний возрастает. Особенно это заметно при увеличении частот воздействия, что соответствует коротким дорожным неровностям и большим скоростям движения. Так, при $v=30$ км/ч и длинах неровностей 1,5 (кривая 2) и 2 м (кривая 3) размах изменения динамических давлений невелик. При $L_n=1$ м (кривая 1) размах колебаний резко возрастает, минимальное значение R_k^{min} близко к нулю, а R_k^{max} имеет наибольшее значение равное 19000 кг. При $v=50$ км/ч величина амплитуд R_k становится значительно больше. Так, при $L_n=1$ м R_k^{max} составляет уже 30000 вместо 19000 кг при $v=30$ км/ч. При $H_n=5$ см и движении через неровности длиной 1 м происходит отрыв колес от поверхности дороги (кривая 4). Это же явление возможно и при $L_n=1,5$ м. Характер изме-

нения R_k^{\max} от v для рассматриваемой системы при различных длинах неровностей и при $\xi \neq 0$ показан на рис. 3, б. Из него видно, что наиболее резкое возрастание давлений на дорогу с увеличением скоростей движения происходит при коротких неровностях (кривая 1), когда частота воздействия от дороги повышается.

Для подтверждения результатов, полученных расчетно-теоретическим путем, проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальное исследование влияния волнообразных неровностей на силы давления колес транспортной системы на покрытие про-

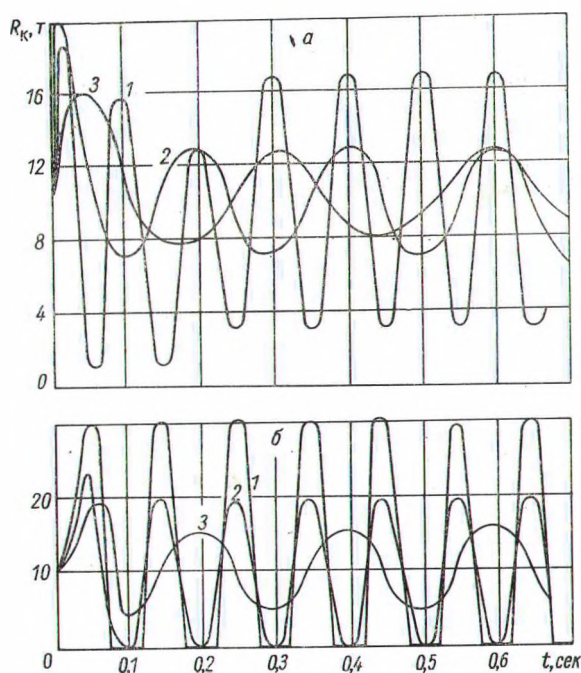


Рис. 4. Кривые изменения R_k , полученные на АВМ, в зависимости от времени ($H_n=5$ см): $L_n=1$ м (1), 1,5 м (2) и 2 м (3); $v=30$ (а) и 50 км/ч (б)

изводилось в лабораторных условиях. Измерение силы давления колеса при взаимодействии с неровностями осуществлялось путем регистрации вертикальных ускорений транспортной системы. Для наглядного представления распределения перепадов вертикальных ускорений по длине неровностей одновременно с регистрацией ускорений записывалась траектория движения оси колеса при переезде неровности. Ускорение регистрировалось с помощью авиационных датчиков перегрузок типа ЗП-15, переоборудованных с механической записи на электрическую. Траектория движения оси колеса записывалась специально изготовленным приспособлением, состоящим из датчика и кронштейна. Датчик представляет собой реохорд из константановой проволоки. Перемещение ползунка, прикрепленного к оси колеса, приводит к изменению силы тока, проходящего через шлейф осциллографа. Для регистрации сигналов датчиков был использован осциллограф Н-700.

Исследования проводились на грунтовом канале кафедры сухопутного транспорта леса и дорожных машин Белорусского технологического института имени С. М. Кирова с помощью подвижной тележки. Нагружение колес тележки осуществлялось включением гидросистемы.

Сигналы от датчиков к регистрирующему прибору передавались с помощью экранированных проводов, подвешенных на скользящих кольцах вдоль грунтового канала.

Питание осциллографа и датчиков осуществлялось от четырех аккумуляторных батарей. Контроль напряжения аккумуляторных батарей производился при помощи вольтметра и добавочного сопротивления, движок которого после установки необходимого напряжения закреплялся неподвижно.

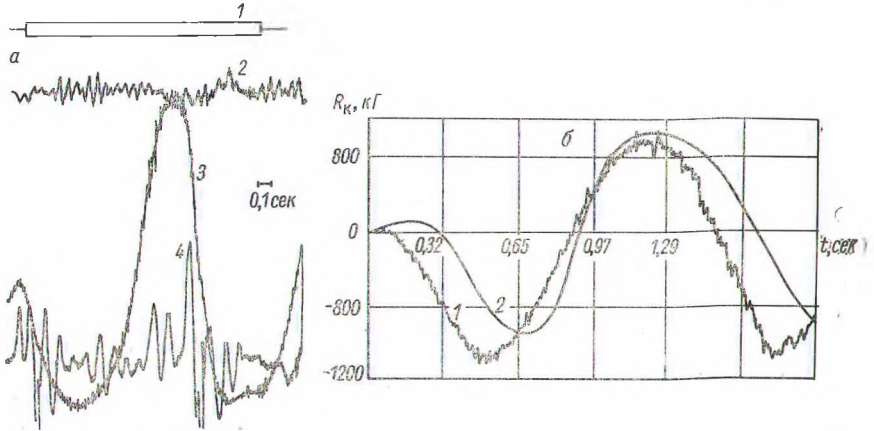


Рис. 5. Образец осциллограммы и зависимость $R_k = f(t)$ ($H_n = 6,3$ см; $L_n = 93,3$ см): а — осциллограмма (1 — путь, 2 — ускорения поддресоренных масс, 3 — траектория движения оси колеса, 4 — ускорения неподдресоренных масс); б — R_k (1 — экспериментальная кривая, 2 — теоретическая); $v = 5,2$ км/ч

Перед каждым циклом измерений и после него датчик для записи траектории движения оси колеса и акселерометры тарировались. Акселерометры тарировались в статике и в динамике. Тарировочные кривые акселерометров и датчика для записи траектории движения оси колеса, построенные по осредненным тарировочным данным, характеризовались линейной зависимостью.

В процессе исследований была проведена целая серия опытов со строгим соблюдением контакта колес с неровностями.

Движение через неровности производилось с установившейся скоростью. Скорость движения тележки в процессе испытаний устанавливалась по данным полученных осциллограм. С целью обеспечения необходимой точности проезд через неровность для каждой скорости движения повторялся 4—5 раз.

При проведении опытов на осциллограмму (рис. 5, а) фиксировались ускорения поддресоренных и неподдресоренных масс системы, траектория движения оси колеса, путь и время.

Анализ экспериментальных данных указывает на достаточную точность полученных теоретических кривых R_k .

На рис. 5, б приведены графики $R_k = f(t)$. Различие между экспериментальной и теоретической кривой незначительно.

Общий анализ данных исследований показывает, что для расматриваемой системы, режимов и условий движения динамические нагрузки на дорогу изменяются в широких пределах:

v , км/ч	10	15	20	25
K_d	1,17	1,70	1,77	1,84

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. В зависимости от типа транспортной системы, режимов и условий движения величина динамических давлений на дорогу может изменяться в широких пределах. Коэффициент динамичности при движении транспортной системы по волнообразным неровностям ($H_{\text{п}}=3$ см, $L_{\text{п}}=93,3$ см) изменяется от 1,17 до 1,84.

Значение $R_{\text{к}}$ для каждого рассматриваемого случая также колеблется в широких пределах. В некоторых случаях наблюдается отрыв колес от поверхности покрытия ($R_{\text{к}}=0$).

Установлено, что при расчете $R_{\text{к}}=f(t)$ необходимым является учет переходных режимов, так как в начале движения по неровностям возможно значительное изменение амплитуд давлений, а также принципиально важных изменений характера самого процесса.

Анализ данных исследований позволил установить, что существенное влияние на $R_{\text{к}}=f(t)$ оказывают скорость движения, длина и высота дорожных неровностей.

Изменение характера процесса динамического воздействия системы на дорогу существенно влияет на образование и развитие волнообразных неровностей на автомобильных дорогах. С этой точки зрения очень важным является учет переходных процессов, так как наблюдается существенное изменение амплитуд и частоты динамического процесса в начальный период движения.

Установлено, что максимальное динамическое давление находится в зоне перехода впадины неровности в выступ. Величина этой зоны может изменяться в зависимости от скорости движения транспортных систем, их параметров и размеров начальных неровностей.

Литература

1. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля. М., 1972.
2. Силаев А. А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин. М., 1972.
3. Пархиловский И. Г. Автомобильная промышленность, № 10, 1961.
4. Леонович И. И. Автомобильные лесовозные дороги. Минск, 1965.
5. Жуков А. В. Лесной журнал, № 6, 1971.
6. Жуков А. В., Леонович И. И. Колебания лесотранспортных машин. Минск, 1973.

Белорусский технологический институт

Поступило в редакцию
8.1 1973