

И. И. Леонович, К. Е. Абрамович, В. В. Жуков

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ВОЛНООБРАЗОВАНИЕ НА ДОРОГАХ С ГРАВИЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Наблюдения за состоянием проезжей части на опытных участках, заложенных на автомобильных дорогах с гравийным покрытием, показывают, что в процессе эксплуатации происходит значительное изменение поверхности дороги (1). Образуются как периодически чередующиеся неровности, так и обособленные группы неровностей, отстоящие одна от другой на сравнительно большом расстоянии. Наиболее характерными для автомобильных дорог с гравийным покрытием являются волнообразные неровности, периодически следующие одна за другой. В связи с этим возникает необходимость изучения причин образования и развития волнообразных неровностей и разработки мероприятий против их возникновения.

Воздействие транспортных систем на дорогу оказывает наряду с другими факторами решающее влияние на процесс образования и развития волнообразных неровностей. При этом характерно отметить, что, как показывают результаты измерений профиля неровностей на опытных участках дорог, воздействие транспортных систем при определенных условиях часто способствует не росту ранее образовавшихся волнообразных неровностей, а наоборот, уменьшению их высоты.

Исследование влияния воздействия транспортных систем на процесс волнообразования выполнялось теоретическим и экспериментальным путем.

Известно, что воздействие на дорогу складывается из статического давления веса транспортной системы P и динамического R_g .

$$R_k = P \pm R_g .$$

Давление от веса транспортной системы P постоянное и одинаково действует на выступы и на впадины.

Дополнительное динамическое давление R_g вызывается колебаниями подрессоренных и непрессоренных масс системы и способствует углублению впадин или сглаживанию выступов. Если при движении транспортной системы по образовавшимся начальным неровностям максимальное давление приходится на впадину, а минимальное на выступ, то дополнительное динамическое давление на впадине будет прибавляться к силе P и способствовать углублению неровностей, а на гребне — вычитаться из силы P и, следовательно, его воздействие на дорогу будет меньшим, чем от силы P . Поскольку давление от веса транспортной системы постоянное, оно не может углубить или сгладить возникшие волнообразные неровности. Однако наличие этой силы обуславливает проявление переменной динамической силы R_g .

Вертикальное давление при движении системы R_k будет создавать силу трения качения

$$R_{тр} = fP \pm fR_g .$$

Дополнительное динамическое давление R_g направлено по нормали, сила трения качения fR_g — по касательной к профилю неровностей. Элементарная работа этой силы на участке dx равна

$$dA_0 = fR_g dx .$$

Определим работу силы fR_g на длине полуволны при установившихся и неустановившихся колебаниях, считая, что профиль неровностей представляется в виде синусоидной функции

$$q = H \sin \omega t ,$$

где H — высота неровности; ω — частота возмущающей силы; t — время.

Пределами интегрирования будут: $t_1 = 0, t_2 = \frac{\pi}{\omega}$.

Тогда динамическая работа

$$A_1 = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} fR_g \sqrt{dt} . \quad (1)$$

Для определения дополнительного динамического давления рассматривалась одномассовая динамическая система, колебания непрессоренных масс не учитывались, жесткость рессор и

шин заменялась приведенной жесткостью C , подвеску считали линейной, амортизатор отсутствовал (2).

Подставив в формулу (1) уравнения R_0 при установившемся и неустановившемся колебательных процессах, получим выражения для определения динамической работы.

Для установившихся колебаний

$$A = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} f \left[(C - m_k \omega^2) H \sin \omega t - AC \sin(\omega t - \alpha) - k \cos(\omega t - \alpha) \right] \times (A + H \omega) v dt = f \frac{v}{\omega} \left[2H(C - m_k \omega^2) - 2AC \cos \alpha - 2k(A + \omega H) \sin \alpha \right]. \quad (2)$$

Для неустановившихся колебаний

$$A = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \left\{ -H m_k \omega^2 \sin \omega t + AC e^{-ht} (-\sin \alpha \cos \sqrt{p^2 - h^2} t + \frac{\omega \cos \alpha - h \sin \alpha}{\sqrt{p^2 - h^2}} \sin \sqrt{p^2 - h^2} t) + AC \sin(\omega t - \alpha) - HC \sin \omega t - k A h L^{-ht} (-\sin \alpha \cos \sqrt{p^2 - h^2} t + \frac{\omega \cos \alpha - h \cos \alpha}{\sqrt{p^2 - h^2}} \sin \sqrt{p^2 - h^2} t) + A k \omega \cos(\omega t - \alpha) - A k L^{-ht} \left[\sin \alpha \sqrt{p^2 - h^2} \sin \sqrt{p^2 - h^2} t + k(\omega \cos \alpha - h \sin \alpha) \cos \sqrt{p^2 - h^2} t \right] - H k \cos \omega t \right\} v dt = f v \left\{ -2H \omega m_k - C \left[L^{-\frac{\pi}{\omega} h} \sin \frac{\pi}{\omega} \sqrt{p^2 - h^2} A \frac{(p^2 - 2h^2) \sin \alpha + h \omega \cos \alpha}{p^2 \sqrt{p^2 - h^2}} + L^{-\frac{\pi}{\omega} h} \cos \frac{\pi}{\omega} \sqrt{p^2 - h^2} A \frac{\omega \cos \alpha - 2h \sin \alpha}{p^2} + \frac{2(AC \cos \alpha - H)}{\omega} + A \frac{2h \sin \alpha - \omega \cos \alpha}{p^2} \right] + k \left[L^{-\frac{\pi}{\omega} h} \sin \frac{\pi}{\omega} \sqrt{p^2 - h^2} \times A \frac{\omega \cos \alpha - h \sin \alpha}{\sqrt{p^2 - h^2}} L^{-\frac{\pi}{\omega} h} \cos \frac{\pi}{\omega} \sqrt{p^2 - h^2} A \sin \alpha - A \sin \alpha \right] \right\}, \quad (3)$$

где m_k — неподрессоренная масса; A — амплитуда вынужденных колебаний;

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

k — коэффициент сопротивления подвески; α — разница фаз между вынужденными колебаниями и динамической силой,

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

На основании полученных уравнений (2,3) произведены вычисления динамической работы при установившихся и неустановившихся колебательных процессах для следующих параметров системы:

$$M = 12,7 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{см}}; \quad G = 12446 \text{ кг}; \quad k = 186 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}}; \quad C_{\text{ш}} = 6400 \frac{\text{кг}}{\text{см}};$$

$$h' = 1512 \frac{\text{см}}{\text{с}}; \quad p^2 = 503,9 \frac{1}{\text{с}}; \quad 2h = 14,6 \frac{1}{\text{с}}.$$

С учетом изложенных ранее допущений, без учета гибкости хлыстов и связи с тягачом (3), рассмотренная выше система может быть использована как динамическая модель прицепа-ропуска ТМЗ-803. Приведенные параметры системы соответствуют указанному прицепу-ропуску.

Расчеты показывают, что при скорости движения 21,5 км/ч (установившиеся колебания) и 23 км/ч (неустановившиеся колебания) численное значение динамической работы приближается к нулю, а при $V = 22$ км/ч (установившиеся колебания) $\frac{A}{F} = 0$. В интервале скоростей 16—19 км/ч наблюдается резкое увеличение динамической работы. Так, например при $V = 18$ км/ч, численное значение динамической работы возрастает в 1,8 раза в сравнении с $V = 10$ км/ч.

Динамическое воздействие систем, увеличивая силу трения между колесами и дорожным покрытием, приводит к выдергиванию частиц гравийного материала из покрытия. Увеличение давления колес на дорогу вызывает также повышенное всасывающее действие шин. При этом на поверхности дорожного покрытия образуется разрежение и в область с пониженным давлением увлекаются мелкие частицы гравийного материала.

С целью получения числовых данных по дополнительному динамическому давлению колес прицепа-ропуска ТМЗ-803 на дороге, а также характера распределения нагрузки по длине волнообразных неровностей, произведены вычисления R_g для различных скоростей движения при $H_M = 30$ мм, $L_{n8} = 93$ см.

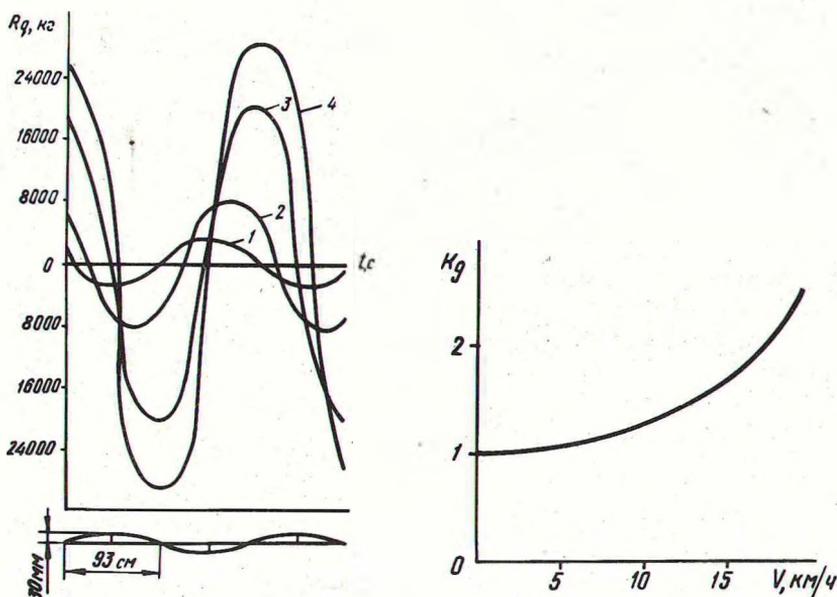


Рис. 1. Зависимость динамического давления транспортной системы от скорости движения: 1 — $v = 10$ км/ч; 2 — $v = 15$ км/ч; 3 — $v = 20$ км/ч; 4 — $v = 25$ км/ч.

Рис. 2. Зависимость коэффициента динамичности транспортной системы ТМЗ-803 от скорости движения.

На рис. 1 приведены кривые изменения динамического воздействия системы на дорогу для установившихся колебаний. Анализируя график, видим, что максимальные размахи колебаний динамической нагрузки находятся в пределах $0-2,35$ статических нагрузок. Характер распределения нагрузки по длине волнообразной неровности является общим для принятых в расчетах скоростей движения. С увеличением скорости наблюдается сдвиг максимальной нагрузки в направлении движения системы.

Характер изменения коэффициента динамичности в зависимости от скорости движения для вышеприведенных параметров системы показан на рис. 2. Из графика видно, что кривая изменения коэффициента динамичности при малых скоростях движения плавно возрастает. Наиболее интенсивное увеличение k_d наблюдается в диапазоне скоростей $15-20$ км/ч.

Наблюдениями установлено, что волнообразные неровности возникают на участках, где происходит легкое подтормаживание, интенсивное торможение и резкое трогание с места, а именно: на крутых уклонах, перед остановочными пунктами, на участках за остановками.

Для выявления торможения на возникновение волнообразных неровностей были заложены два опытных участка, на которых движение осуществлялось без торможения № 1 и № 2, и два участка, на которых транспортные системы проходили с обязательным торможением, № 3 — на крутом спуске и № 4 — на участке перед остановочным пунктом. Спустя четыре месяца после очередного профилирования на участках № 3 и № 4 образовались волнообразные неровности, в то время как на участках № 1 и № 2 признаков волнообразования не было обнаружено. Это свидетельствует о том, что торможение способствует возникновению волнообразных неровностей.

Для наглядного представления распределения силы давления (ускорений подрессоренных масс) транспортной системы по длине участка торможения производилась запись процесса торможения на ленту осциллографа Н-700. При испытаниях было совершено по три экстренных торможения со скорости 30, 40 и 50 км/ч. Торможение с указанных скоростей производилось на относительно ровном горизонтальном участке дороги с гравийным покрытием в сухом состоянии. Процесс торможения регистрировался с момента нажатия на педаль до остановки автопоезда МАЗ = 504+5205. Образец записи процесса торможения приведен на рис. 3, а.

При анализе полученных осциллограмм обращает на себя внимание почти периодическое возрастание и затухание амплитуд ускорений. Примерно аналогичные по форме колебания регистрируются и при резком трогании с места (рис. 3, б). Ускорения образуют периодически чередующиеся усиленные и ослабленные воздействия на дорогу. По-видимому, это в значительной мере объясняет появление волнообразных неровностей на участках, где транспортные средства движутся с различными режимами (торможением или резким троганием с места).

Проанализируем характер изменения динамического давления при переезде колеса через единичную неровность. На рис. 3, в приведен пример записи силового взаимодействия колеса с неровностью синусоидальной формы $H_n = 50$ мм, $L_n = 130$ см при движении автостенда с малой скоростью движения, когда работа подвески почти исключена. Здесь наглядно просматривается

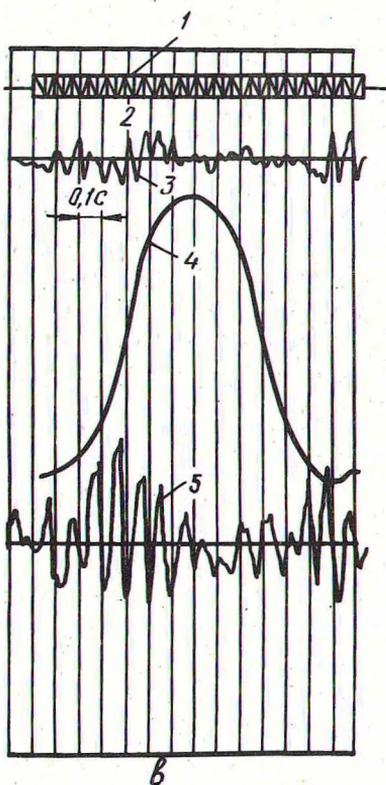
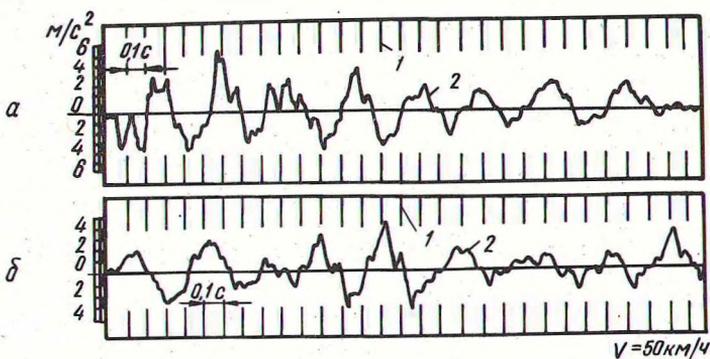
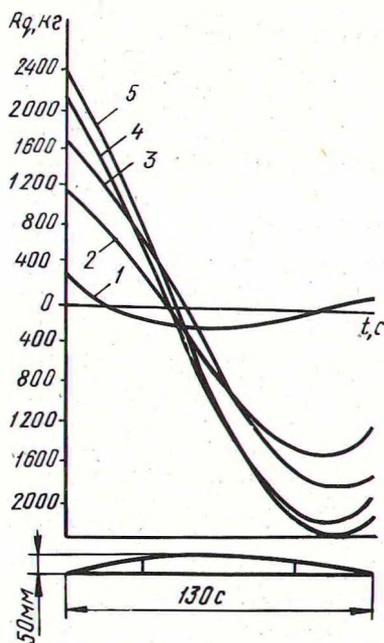


Рис.3. Образцы рабочих осциллограмм: а — процесс торможения (1 — отметки времени, 2 — ускорение поддрессоренных масс); б — резкое трогание с места; в — взаимодействие колес автостенда с неровностью синусоидальной формы ($H_H = 50$ мм; $L_H = 130$ см); 1 — отметки пути, 2 — отметки времени, 3 — ускорение поддрессоренных масс, 4 — траектория движения оси колеса, 5 — ускорение неподдрессоренных масс.

изменение амплитуд ускорений по длине неровности. По мере въезда колеса на неровность величина вертикальных ускорений возрастает, затем при движении на вершину резко уменьшается (в

отдельных случаях падает до нуля). Движение по вершине неровности определяет максимальную высоту подъема оси колеса. Процесс съезда с неровности сопровождается повышенным силовым воздействием на дорогу. Максимальная величина ускорений при малых скоростях движения находится в пределах неровности. При повышенных скоростях возможен отрыв колеса от неровности. В этом случае наибольшая высота подъема оси колеса находится не на вершине неровности, а на участке отрыва колеса от неровности.

Рис. 4. Изменение динамической нагрузки в зависимости от скорости движения автостенда:
 1 — $v = 10$ км/ч; 2 — $v = 15$ км/ч;
 3 — $v = 20$ км/ч; 4 — $v = 25$ км/ч;
 5 — $v = 30$ км/ч.



Характер изменения динамического давления в зависимости от скорости движения системы можно проследить из рассмотрения теоретических кривых (рис. 4). В расчет ² принимались следующие параметры автостенда: $M = 2,41 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{см}}$; $m_k = 0,76 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{см}}$; $C_{ш} = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{см}}$. Из рисунка видно, что при $v = 10$ км/ч максимальная динамическая нагрузка $R_{g_{\max}} = 357$ кг, с увеличением скорости до 15 км/ч $R_{g_{\max}}$ увеличивается до 1195 кг, при $v \approx 25$ км/ч $R_{g_{\max}} = 2194$ кг. Максимальная

величина динамической нагрузки при съезде с неровности находится за ее пределами.

В ы в о д ы

1. Определение динамической работы при известных характеристиках воздействия и динамических характеристиках колебательной системы позволяет осуществлять выбор оптимальной скорости движения, при которой равномерно сглаживаются выступы и углубляются впадины.

2. Установлен характер распределения и количественные значения изменения динамической нагрузки при взаимодействии транспортной системы с неровностями синусоидальной формы.

3. Получен характер протекания кривой коэффициента динамичности для случая движения системы по синусоидальным неровностям.

4. Рассмотренные режимы движения позволили получить общую картину о распределении ускорений автопоезда при торможении и резком трогании с места. Наблюдаются периодически чередующиеся усиленные и ослабленные воздействия транспортных систем на дорогу.

Л и т е р а т у р а

1. Абрамович К.Б. Исследование волнообразных неровностей на автомобильных дорогах с гравийным покрытием. Проектирование, строительство и эксплуатация лесовозных дорог.—Мат. всесоюзной научной конференции. Мн., 1972. 2. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. М., 1972. 3. Хлуд В.Я. Исследование и совершенствование лесовозного подвижного состава на лесоразработках в горных условиях.—Автореф. канд. дис. Воронеж, 1971.