

УДК 625.7

**И. И. Леонович**, доктор технических наук, профессор (БНТУ);**А. П. Лащенко**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)**ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
НА ПОКРЫТИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

В статье авторами предлагается решение задачи по определению динамического воздействия подвижного состава на автомобильную дорогу и колебаний подвижного состава. Внешними возмущающими силами на покрытия приняты различные неровности. Они аппроксимированы в виде выступов на стыках цементобетонных плит, неровностями синусоидального характера и впадинами в форме параболической зависимости.

In the article, the authors propose a solution to the problem on determining the dynamic impact of a rolling stock on a highway and the fluctuations of the rolling stock. External disturb the forces on the cover taken various irregularities. They approximated as projections on the joints of cement-concrete slabs, sinusoidal irregularities nature and depressions in the form of a parabolic dependence.

**Введение.** В настоящее время при расчете дорожных одежд величина динамического коэффициента принимается 1,2–1,3, что недостаточно обоснованно. Не установлена также зависимость коэффициента динамичности от типа подвижного состава, скорости его движения и дорожных неровностей. Это обстоятельство в известной мере отрицательно сказывается на выборе рациональных конструкций дорожных одежд. При теоретическом решении вопроса динамического воздействия подвижного состава на дорогу и определении сил, действующих на нее, в первую очередь необходимо рассмотреть колебания подвижного состава как источник динамического воздействия.

**Основная часть.** В основу динамики дорожного покрытия, как и других инженерных сооружений, кладется теория колебаний, которая является важнейшей и решающей задачей общей динамики. Поэтому теоретические исследования поставленного вопроса необходимо начать с исследования законов, характера и величины колебаний подвижного состава при взаимодействии с дорожным покрытием. Колебания подвижного состава возникают вследствие действия на него разнообразных по величине и направлению усилий, вызванных неровностями покрытия, стыками цементного покрытия, неравноупругостью оснований, неуравновешенными массами и другими факторами. Под действием этих факторов подрессоренные массы подвижного состава приходят в колебательное состояние. Вместе с тем усилия, возникающие в контакте колес подвижного состава с дорогой, вызывают колебания покрытия. Последнее, в свою очередь, передает колебание конструктивным слоям дорожной одежды и упругому грунтовому основанию. Кроме того, возбудителем колебаний покрытия являются также собственные колебания подвижного состава. Характер колебаний подвиж-

ного состава при движении по дороге в значительной степени определяется отношением частот собственных колебаний подвижного состава к частоте возмущающей силы. Поэтому собственные колебания автомобиля являются весьма важной динамической характеристикой.

Кроме того, в данной статье как в первом приближении решения задачи динамики дорожной одежды вопросы собственных колебаний дорожной конструкции и грунтового основания, на котором она уложена, рассматриваться не будут. При расчете дорожной одежды действие динамической подвижной нагрузки отождествляется с условной статической, увеличенной по сравнению с действительной статической на так называемую динамическую добавку. Таким образом, действие динамической нагрузки на покрытие от колес подвижного состава будет представлено как статическая нагрузка, умноженная на динамический коэффициент.

При определении динамического коэффициента от подвижной нагрузки в виде пневматических колес автомобиля необходимо знать расчетную колебательную схему и закон вынужденных колебаний.

На автомобильных дорогах в настоящее время курсируют грузовые автомобили с колесами-пневматиками. Колебания подрессоренных масс автомобиля происходит благодаря упругости пневматиков и рессорного подвешивания. Между передней и задней осями автомобиля существует жесткая связь, а между автомобилем и прицепом – шарнирная.

Связь между колебаниями осей имеет двоякое влияние на общую картину колебаний. Во-первых, при переезде неровностей колесами одной оси возникают основные колебания, которые будут складываться с дополнительными колебаниями, возникающими на данной оси при переезде неровностей колесами других

осей автомобильного поезда. Во-вторых, связь может оказать влияние на величину основных колебаний. Обе стороны влияния играют неодинаковую роль в колебаниях автомобильного поезда. При довольно широких пределах изменения коэффициента распределения масс колебания при наличии связи остаются практически такими же, как и при отсутствии связи. Учитывая это, при определении динамического воздействия автомобильного поезда на покрытие с достаточной для практических целей точностью можно пренебречь связями между осями и рассматривать колебания одной наиболее нагруженной.

Однако для более полного исследования вопросов колебаний подвижного состава на покрытии рассмотрим свободные колебания автомобильного поезда с учетом связей между осями и возможными колебаниями перевозимых длинномерных грузов.

При составлении уравнений колебания подвижного состава воспользуемся известными методами динамики твердого тела. Как отмечалось выше, внешними возмущающими силами на покрытиях являются различные неровности. Среди них основными детерминированными можно считать выступы на стыках цементобетонных покрытий, неровности синусоидального характера, впадины в форме параболической зависимости. В целом же на дорожных покрытиях неровности имеют случайный характер.

Не уменьшая роль и значения существующих методов определения ровности дорожного покрытия в современной диагностике автомобильных дорог, мы в то же время считаем, что учет динамического воздействия подвижного состава на покрытие, имеющее детерминированные неровности, является задачей весьма актуальной.

При составлении уравнений колебания подвижного состава использовали известные методы динамики твердого тела [1]. Анализ работы покрытий и проведенные исследования дают возможность аппроксимировать неровности покрытий следующими законами.

1. Основным видом неровностей покрытий являются пороги, образуемые стыками бетонных покрытий автомобильных дорог. Колеса подвижного состава, проходя пороговые неровности, испытывают местные и кратковременные воздействия. Для теоретического исследования это воздействие может быть представлено в виде импульса силы. Уравнение вынужденных колебаний с возмущающей силой в виде импульса будет иметь вид

$$(M + m) \frac{d^2 z}{dt^2} + cz = \int_0^T f(t) dt, \quad (1)$$

где  $M$  – подрессоренная масса подвижного состава данной оси;  $m$  – масса полезного груза, приходящегося на ось;  $c$  – приведенная жесткость шин и рессор,  $c = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$ ;

$c_1$  – жесткость рессор;  $c_2$  – жесткость шин;

$z$  – текущие координаты;  $\int_0^T f(t) dt$  – импульс,

внешняя возмущающая сила, которая изменяется от нуля и обратно за очень короткий промежуток времени  $T$ ;  $t$  – параметр времени.

Тогда при начальных условиях  $t = 0$  и  $z = 0$  в общем виде решение уравнения (1) будет представлено в виде

$$z(t) = \frac{M_0 v \operatorname{tg}(\alpha)}{M \omega} \sin(\omega t), \quad (2)$$

где  $M_0$  – значение неподрессоренных масс;  $v$  – скорость движения автомобиля;  $\alpha$  – угол, образованный радиусом колеса в точке касания с опорной плоскостью и вертикалью;  $\omega$  – частота собственных колебаний, равная

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{M + m}}.$$

При определении динамического воздействия на стыках в выражение (2) вместо  $M_0$  можно подставлять значение неподрессоренных масс, так как подрессоренные массы в силу большой инертности и упругости рессор не успевают выйти из равновесия при мгновенном приложении внешнего импульса.

Динамические силы на стыке можно определить, зная величину ускорения. Значение его найдем, дважды дифференцируя выражение (2). Тогда сила будет равна

$$F = M_0 \omega v \operatorname{tg}(\alpha) \sin(\omega t). \quad (3)$$

Максимальное значение динамической силы будет при  $\sin(\omega t) = 1$ , т. е.

$$F_{\max} = M_0 \omega v \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4)$$

или, заменяя  $\operatorname{tg}(\alpha)$  через радиус колеса и высоту пороговой неровности, получим:

$$F_{\max} = M_0 \omega v \sqrt{\frac{R^2 - (R_k - h)^2}{(R_k - h)^2}}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус недеформированного колеса;  $R_k$  – радиус качения колеса;  $h$  – высота пороговой неровности. Полученная динамическая сила (добавка) дает возможность определить динамический коэффициент.

2. Единичные просадки выражены в виде параболической зависимости.

Для случая параболической возмущающей силы уравнение колебаний будет иметь вид

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \omega^2 z = h \omega^2 \left( 1 - \frac{v^2 t^2}{S^2} \right), \quad (6)$$

где  $S$  – длина неровностей.

Тогда в общем виде решение уравнения (6) будет представлено как

$$z(t) = z_0 \cos(\omega t) + \frac{z_0'}{\omega} \sin(\omega t) + h_0 \left( 1 - v^2 t^2 \right) + \frac{2h_0 v^2}{\omega^2}, \quad (7)$$

где  $v = v/S$ .

Максимальное динамическое воздействие на дорожное покрытие в этом случае будет равно следующей величине:

$$F_{\max} = M h_0 (\omega^2 + 4v^2). \quad (8)$$

3. Систематически повторяющиеся относительные прогибы колесопроводов между стыками представлены в виде синусоиды.

При синусоидальном законе возмущающей силы уравнение колебаний будет иметь вид

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} + cz = h_0 c \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi vt}{S} \right) \right), \quad (9)$$

где  $h_0$  – амплитуда синусоиды.

В общем виде решение уравнения (9) имеет вид

$$z(t) = z_0 \cos(\omega t) + \frac{z_0'}{\omega} \sin(\omega t) + h_0 \left( 1 + \frac{\omega^2}{v^2 - \omega^2} \cos(vt) \right). \quad (10)$$

Динамическое воздействие, вызванное дорожными неровностями синусоидального характера, на основании второго закона механики и с учетом направления действия силы будет равно следующей величине:

$$F = M \left[ \omega^2 z_0 \cos(\omega t) + z_0' \omega \sin(\omega t) + \frac{h_0 \omega^2 v^2}{v^2 - \omega^2} \cos(vt) \right]. \quad (11)$$

Отсюда коэффициент динамичности можно выразить формулой:

$$K_d = \frac{P_{st} + F_{\max}}{P_{st}}, \quad (12)$$

где  $P_{st}$  – величина статической нагрузки;  $F_{\max}$  – абсолютная величина динамической добавки.

Нами получены численные решения вышепредставленных зависимостей. С использованием системы MathCad [2] аналитические решения представлены в графическом виде, в зависимости от расчетных параметров.

В заключение отметим, что проведенные теоретические исследования и полученные результаты расчетов по формулам позволяют сравнительно просто в период проектирования дороги определять величину динамического коэффициента воздействия на покрытия с учетом основных видов дорожных неровностей, типа подвижного состава, расчетной скорости движения его и величины рейсовой нагрузки.

**Заключение.** 1. При расчете покрытий автомобильных дорог коэффициент динамичности необходимо выбирать дифференцировано с учетом типа подвижного состава, величины рейсовой нагрузки, конструкции покрытия и расчетной скорости движения.

2. При определении коэффициента динамичности, с достаточной для практических целей точностью, можно рассматривать только колебание оси, имеющей наибольшую величину подрессоренных масс.

3. Основная возмущающая сила на покрытиях возникает от неровностей на стыках, которая может быть представлена в виде импульса.

#### Литература

1. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 341 с.
2. Кирьянов Д. В. Самоучитель Mathcad 2001. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 544 с.

Поступила 27.02.2014