

УДК 624.21

## Методика определения динамических воздействий подвижного состава на мосты при высокоскоростном движении

В. Н. Смирнов, А. В. Ланг, Н. А. Лабутин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Смирнов В. Н., Ланг А. В., Лабутин Н. А. Методика определения динамических воздействий подвижного состава на мосты при высокоскоростном движении // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 90–96. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-90-96

### Аннотация

**Цель:** Учет динамического характера воздействий сил от подвижного состава на мост при учете неровностей проезда в условиях высокоскоростного движения в расчетной модели «Подвижные динамические силы на балке». **Методы:** Вывод системы дифференциальных уравнений предлагаемой системы аналитическим методом. **Результаты:** Уравнения для определения величины сил инерции  $X_1$  и  $X_2$  подрессоренной части экипажа. **Практическая значимость:** Получение уточненной картины динамической работы мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения путем замены расчетной модели «Подвижные силы на балке» моделью «Подвижные динамические силы на балке».

**Ключевые слова:** Мост, поезд, динамика, высокоскоростные магистрали.

Решение динамической задачи взаимодействия элементов системы «мост — поезд» в настоящее время осуществляется преимущественно в результате численного моделирования. При этом выбор расчетной модели зависит от поставленной задачи и вследствие этого необходимой детализации элементов системы «мост — поезд». Возможно использование различных динамических моделей (рис. 1, 2).

Модель 1. Тип «Подвижные силы на балке». Пролетное строение моделируется упругой балкой конечной массы с вязким затуханием, поезд — системой движущихся сил (рис. 1). Такая модель позволяет учесть «эффект скорости», получить значения критических скоростей и пиковые значения деформаций и ускорений пролетного строения.

Модель 2. Тип «Подвижные массы на балке». Пролетное строение моделируется аналогично расчетной модели I, а поезд — системой движущихся масс с упругими и вязкими связями в элементах системы «мост — поезд» (рис. 2). Данный подход позволяет оценить уровень комфорта пассажиров на основе анализа ускорений в кузовах вагонов, а также влияние дефектов пути и колес на величину сил динамического взаимодействия ходовых частей подвижного состава.

В настоящее время в динамических расчетах мостовых сооружений широко используется численное моделирование. При этом часто задача взаимодействия элементов системы «мост — поезд» [1] решается с применением модели «Подвижные силы на балке». В этом случае пролетное строение представляется упругой балкой, а поезд — системой движущихся сил [2]. Модель позволяет получить значения критических (резонансных) скоростей движения и максимальные значения прогибов и ускорений пролетного строения моста.

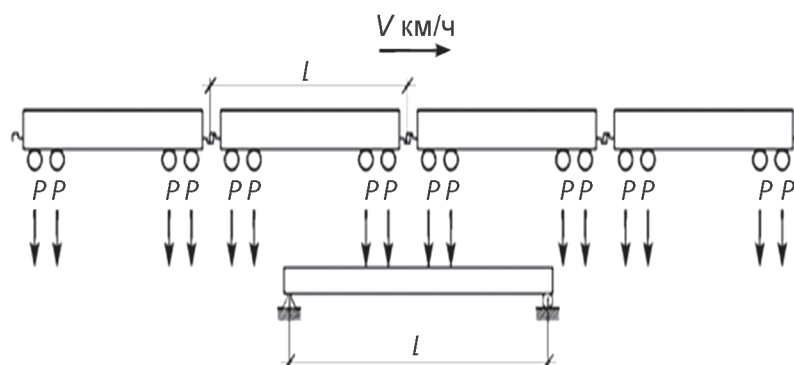


Рис. 1. Расчетная модель 1 «Подвижные силы на балке»

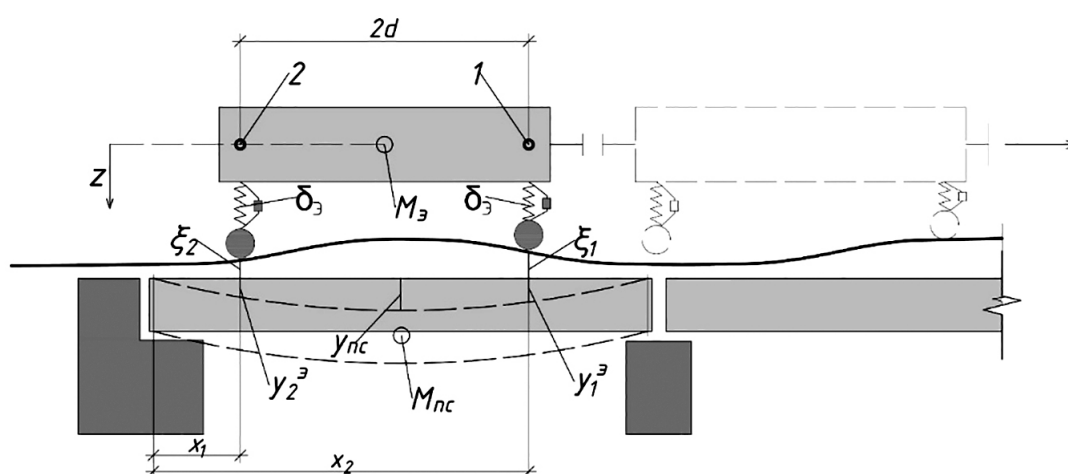


Рис. 2. Расчетная динамическая модель 2 «Взаимодействие элементов системы «мост — поезд» в условиях высокоскоростного движения подвижного состава»

При этом учитывается скорость движения поезда, длины пролетов, массы элементов сооружения, собственные частоты конструкций, параметры экипажей (в частности, длина, число осей экипажа, осевые нагрузки и интервалы между ними).

Данная модель позволяет исследовать работу пролетных строений во время прохода по мосту высокоскоростной нагрузки, но характер воздействия на мост в данном случае статичен, поскольку не учитываются силы инерции от колебаний подрессоренных экипажей. Данный фактор делает расчеты пролетных строений для условий высокоскоростного движения достаточно приближенными.

В статье предлагается использование динамической модели системы «мост — поезд» типа «Подвижные силы на балке» (рис. 1), но с учетом динамического характера воздействий данных сил на мост [3–5].

На рис. 2 представлена схема воздействия экипажа высокоскоростного поезда на мост при расчетной модели «Подвижные массы на балке».

На рис. 3 приведена предлагаемая расчетная модель «Подвижные динамические силы на балке».

Ниже приводится метод определения подвижных динамических сил (см. рис. 3), действующих на мост при проходе высокоскоростной подвижной нагрузки.

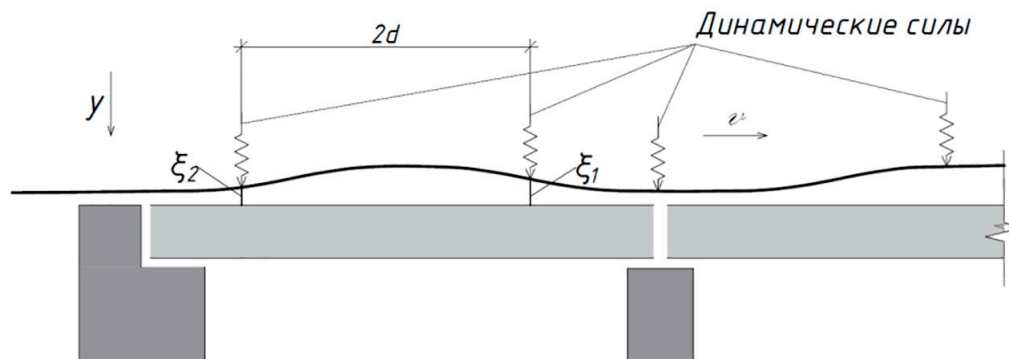


Рис. 3. Предлагаемая расчетная модель воздействия экипажей на мост

Дифференциальные уравнения движения поддрессоренного экипажа на мосту можно представить в виде [6–8]:

$$\begin{aligned} (X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1) \delta_3 + z_1 + \xi_1 &= y_{13}; \\ (X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2) \delta_3 + z_2 + \xi_2 &= y_{23}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $z_1, z_2$  — абсолютные перемещения поддрессоренного экипажа в точках 1, 2 (рис. 2);

$\Delta_1, \Delta_2$  — деформации рессор первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

$y_{13}, y_{23}$  — упругие прогибы пролетного строения под осями первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

$\xi_1, \xi_2$  — ординаты неровностей и пути катания под осями первой и второй по ходу движения тележек экипажа;

$\delta_3$  — податливость рессорного подвешивания тележек экипажа;

$\beta_3$  — коэффициент сопротивления колебаниям тележек экипажа;

$X_1, X_2$  — силы инерции поддрессоренной части экипажа, возникающие в точках 1, 2 экипажа и определяемые решением системы уравнений равновесия:

$$X_1 + X_2 = \frac{M}{2} \ddot{z}_1 + \frac{M}{2} \ddot{z}_2;$$

$$2d(X_1 - X_2) = \frac{J\ddot{z}_1 - J\ddot{z}_2}{2d}. \quad (2)$$

Откуда:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{M}{4}(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) + \frac{J}{8d}(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2); \\ X_2 &= \frac{M}{4}(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) - \frac{J}{8d}(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2). \end{aligned} \quad (3)$$

здесь  $M$  — масса поддрессоренной части экипажа;

$2d$  — база экипажа;

$J$  — момент инерции поддрессоренной части экипажа относительно центральной главной оси инерции, определяемой по формуле:

$$J = Mr^2, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус инерции.

Из (1) следует:

$$\begin{aligned} z_1 &= y_{13} - \delta_3(X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1) - \xi_1; \\ z_2 &= y_{23} - \delta_3(X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2) - \xi_2. \end{aligned} \quad (5)$$

С другой стороны (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} z_1 &= \Delta_1 + y_{13} - \xi_1; \\ z_2 &= \Delta_2 + y_{23} - \xi_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Приравнявая значения  $z_1, z_2$  в (5) и (6), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta_1}{\delta_3} + X_1 + \beta_3 \dot{\Delta}_1 &= 0; \\ \frac{\Delta_2}{\delta_3} + X_2 + \beta_3 \dot{\Delta}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя выражения для  $z_1, z_2$  из (6) в (3), получим выражения для  $X_1$  и  $X_2$ :

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{M}{4} \left[ (\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{1\text{э}} - \ddot{\xi}_1) + (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{2\text{э}} - \ddot{\xi}_2) \right] + \\ &+ \frac{J}{8d} \left[ (\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{1\text{э}} - \ddot{\xi}_1) - (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{2\text{э}} - \ddot{\xi}_2) \right]; \\ X_2 &= \frac{M}{4} \left[ (\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{1\text{э}} - \ddot{\xi}_1) + (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{2\text{э}} - \ddot{\xi}_2) \right] - \\ &- \frac{J}{8d} \left[ (\ddot{\Delta}_1 + \ddot{y}_{1\text{э}} - \ddot{\xi}_1) - (\ddot{\Delta}_2 + \ddot{y}_{2\text{э}} - \ddot{\xi}_2) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Значения упругих прогибов пролетного строения под осями первой и второй тележек экипажа определяются с учетом скорости движения экипажей в предположении изгиба балки под нагрузкой по синусоиде [9, 10]:

$$\begin{aligned} y_{1\text{э}} &= y_{\text{пс}} \sin \pi u_1 + y_{\text{оп}}^{\text{лев}} (1 - u_1)^2 + y_{\text{оп}}^{\text{прав}} u_1^2; \\ y_{2\text{э}} &= y_{\text{пс}} \sin \pi u_2 + y_{\text{оп}}^{\text{лев}} (1 - u_1)^2 + y_{\text{оп}}^{\text{прав}} u_2^2, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $y_{\text{пс}}$  — вертикальное перемещение середины пролетного строения относительно линии, проходящей через точки его опирания;

$y_{\text{оп}}^{\text{лев}}$  — вертикальное перемещение левого конца балки пролетного строения;

$y_{\text{оп}}^{\text{прав}}$  — вертикальное перемещение правого конца балки пролетного строения.

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{x_1}{l} = \frac{v t_1}{l}; \\ u_2 &= \frac{x_2}{l} = \frac{v t_2}{l}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $l$  — длина пролета, м;

$v$  — скорость движения подвижной нагрузки;

$t_1, t_2$  — время.

## Заключение

Найденные с использованием уравнений (8) величины сил инерции  $X_1$  и  $X_2$  подрессоренной части экипажа, учитывающие неровности проезда, и упругость рессорного подвешивания, используются при загрузке пролетного строения моста временной подвижной нагрузкой, следующей по мосту с критической (резонансной) скоростью. Это позволяет получить более точную картину динамической работы мостового сооружения в условиях высокоскоростного движения, чем при использовании расчетной модели 1 [11–13]. Эффект достигается путем замены модели «Подвижные силы на балке» моделью «Подвижные динамические силы на балке».

## Библиографический список

1. Dyachenko L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways / L. Dyachenko, A. Benin // MATEC Web of Conferences. — Т. 107. — № 2017107000014. — DOI: 10.1051/mateconf/2017.
2. Смирнов В. Н. Мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях / В. Н. Смирнов, А. А. Барановский, Г. И. Богданов и др. — СПб.: ПГУПС, 2015. — 274 с.
3. Специальные технические условия «Сооружения искусственные участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань — Екатеринбург». Технические нормы и требования к проектированию и строительству». — СПб.: ПГУПС, 2014. — 76 с.
4. Дьяченко Л. К. Оценка уровня вибраций с точки зрения их воздействия на пассажиров поездов при движении по мостовым сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях / Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, Е. П. Дудкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2017. — Т. 14. — Вып. 1 — С. 33–42.
5. Смирнов В. Н. Взаимодействие бесстыкового пути с мостовым сооружением на высокоскоростных магистралях / В. Н. Смирнов // М.: Учебно-методический

центр по образованию на железнодорожном транспорте. — 2015. — 96 с.

6. Бенин А. В. Особенности проектирования и строительства мостов высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва — Казань» / А. В. Бенин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов // СПб.: Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — Вып. 4(45) — С. 15–20.

7. Смирнов В. Н. Факторы, влияющие на усилия в рельсах бесстыкового пути на мостах высокоскоростных железнодорожных магистралей / В. Н. Смирнов, В. А. Бешлиу // Промышленное и гражданское строительство — 2001. — № 5 — С. 32–34.

8. Смирнов В. Н. Динамическое взаимодействие высокоскоростного подвижного состава и пролетных строений мостов / В. Н. Смирнов, Л. К. Дьяченко // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — № 11. — С. 16–21.

9. Смирнов В. Н. Технология сооружения железобетонных пролетных строений мостов на высокоскоростной магистрали Москва — Санкт-Петербург / В. Н. Смирнов, Е. В. Непряхин // Дорожная держава. — СПб., 2021. — С. 78–83.

10. Смирнов В. Н. Исследования работы мостов с бесстыковым путем / В. Н. Смирнов // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — С. 15–17.

11. СП 13.13330. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*. — М., 2011.

12. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др.; под ред. Н. Г. Бондаря. — М.: Транспорт, 1984. — 272 с.

13. Чижов С. В. Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности / С. В. Чижов, Э. Т. Якшиев, Л. К. Дьяченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2016. — № 2(47). — С. 247–254.

Дата поступления: 15.01.2022

Решение о публикации: 02.03.2022

#### **Контактная информация:**

СМИРНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор; [svn193921@rambler.ru](mailto:svn193921@rambler.ru)

ЛАНГ Андрей Владимирович — инженер; [langandrew@yandex.ru](mailto:langandrew@yandex.ru)

ЛАБУТИН Никита Андреевич — инженер; [n\\_labutin@outlook.com](mailto:n_labutin@outlook.com)

## Determination of Dynamic Effects of a Rolling Stock on Bridges During High-Speed Traffic

V. N. Smirnov, A. V. Lang, N. A. Labutin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Smirnov V. N., Lang A. V., Labutin N. A. Determination of Dynamic Effects of a Rolling Stock on Bridges During High-Speed Traffic // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 90–96. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-90-96

### Summary

**Purpose:** Accounting for dynamic nature of the effects of forces from a rolling stock on a bridge taking into account passway roughness in high-speed traffic conditions in the calculation model “Moving Dynamic Forces on the Beam”. **Methods:** Derivation of the differential equations of the proposed system by analytical method. **Results:** Equations for determining the magnitude of the inertia forces  $X_1$  и  $X_2$  of a rolling stock sprung part. **Practical importance:** Obtaining the updated picture of bridge structure dynamic operation in high-speed traffic conditions by the way of change of “Moving Forces on the Beam” calculation model to “Moving Dynamic Forces on the Beam” model.

**Keywords:** Bridge, train, dynamics, high-speed mainline railways, roughness, acceleration.

### References

1. Dyachenko L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways / L. Dyachenko, A. Benin // MATEC Web of Conferences. T. 107. № 2017107000014. DOI: 10.1051/mateconf/2017.
2. Smirnov V. N. *Mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh* [Bridges on high-speed railway lines]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2015. 274 p. (in Russian)
3. *Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya "Sooruzheniya iskusstvennye uchastka Moskva — Kazan' vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali "Moskva — Kazan' — Ekaterinburg". Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniyu i stroitel'stvu* [Special technical conditions “Artificial structures of the Moscow-Kazan section of the Moscow-Kazan-Yekaterinburg high-speed railway line”. Technical norms and requirements for design and construction]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2014. 76 p. (in Russian)
4. D'yachenko L. K. Otsenka urovnya vibratsiy s tochki zreniya ikh vozdeystviya na passazhirov poezdov pri dvizhenii po mostovym sooruzheniyam na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Evaluation of the level of vibrations from the point of view of their impact on train passengers when moving along bridge structures on high-speed railway lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University. ways of communication]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2017, V. 14, I. 1, pp. 33–42. (in Russian)
5. Smirnov V. N. *Vzaimodeystvie besstykovogo puti s mostovym sooruzheniem na vysokoskorostnykh magistralyakh* [Interaction of a seamless path with a bridge structure on high-speed highways]. Moscow: Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ. 2015. 96 p. (in Russian)
6. Benin A. V. *Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva mostov vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy magistrali "Moskva — Kazan'.* [Features of the design and construction of bridges of the Moscow-Kazan high-speed railway line].

St. Petersburg: Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya Publ. 2015, I. 4(45), pp. 15–20. (in Russian)

7. Smirnov V. N. Faktory, vliyayushchie na usiliya v rel'sakh besstykovogo puti na mostakh vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralej [Factors influencing the efforts in the rails of a seamless track on bridges of high-speed railway lines]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2001, I. 5, pp. 32–34. (in Russian)

8. Smirnov V. N. Dinamicheskoe vzaimodeystvie vysokoskorostnogo podvizhnogo sostava i proletnykh stroeniy mostov [Dynamic interaction of high-speed rolling stock and spans of bridges]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2018, I. 11, pp. 16–21. (in Russian)

9. Smirnov V. N. Tekhnologiya sooruzheniya zhelezo-betonnykh proletnykh stroeniy mostov na vysokoskorostnoy magistrali Moskva — Sankt-Peterburg [Technology for the construction of reinforced concrete span structures of bridges on the high-speed highway Moscow — St. Petersburg]. *Dorozhnaya derzhava* [Road power]. St. Petersburg, 2021, pp. 78–83. (in Russian)

10. Smirnov V. N. Issledovaniya raboty mostov s besstykovym putem [Research work of bridges with jointless way]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track economy]. 2018, pp. 15–17. (in Russian)

11. SP 13.13330. *Mosty i truby. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.03-84\** [SP 13.13330. Bridges and pipes. Updated edition of SNIp 2.05.03-84\*]. Moscow, 2011. (in Russian)

12. Bondar' N. G. *Vzaimodeystvie zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom* [Interaction of railway bridges with rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984. 272 p. (in Russian)

13. Chizhov S. V. Otsenka bezopasnosti mostov s uchetom dinamicheskogo faktora nadezhnosti [Safety assessment of bridges taking into account the dynamic factor of reliability]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2016, I. 2(47), pp. 247–254. (in Russian)

Received: January 15, 2022

Accepted: March 2, 2022

**Author's information:**

Vladimir N. SMIRNOV — D. Sci. in Engineering, Professor; svn193921@rambler.ru

Andrey V. LANG — Engineer; langandrew@yandex.ru

Nikita A. LABUTIN — Engineer; n\_labutin@outlook.com