

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21:624.012.35/042.8

*КАРТОПОЛЬЦЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук,  
профессор,*

*kaf\_most@mail.ru*

*КАРТОПОЛЬЦЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,*

*kaf\_most@mail.ru*

*КОЛМАКОВ БОРИС ДМИТРИЕВИЧ, аспирант,*

*boriskolmakov@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

## **ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ\***

В статье рассмотрены вопросы влияния тяжелых и сверхтяжелых типов автотранспорта на изменение динамических характеристик напряженно-деформированного состояния пролетных строений мостовых сооружений с учетом дефектов на проезжей части. Реализованы расчетная схема и математические модели для выявления и оценки эффекта автоматического регулирования динамических характеристик балок пролетных строений моста с учетом влияния дефектов проезжей части в виде выбоин. Оценено изменение эксплуатационных свойств мостовых сооружений за счет воздействия нестандартных, но сравнимых с традиционным видом транспортных средств, и выявлены особенности деформирования пролетных строений.

**Ключевые слова:** автоматическое регулирование; выбоина; подвижная нагрузка; пролетное строение; напряженно-деформированное состояние; колебания; сталежелезобетонное пролетное строение.

*VLADIMIR M. KARTOPOLTSEV, DSc, Professor,*

*kaf\_most@mail.ru*

*ANDREI V. KARTOPOLTSEV, PhD, A/Professor,*

*kaf\_most@mail.ru*

---

\* Материал статьи подготовлен при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-01-98006.

BORIS D. KOLMAKOV, Research Assistant,  
boriskolmakov@mail.ru  
Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

## EFFECT OF TRAFFICWAY DEFECTS ON DYNAMIC PROPERTIES OF BRIDGE SPANS

The paper presents the problem of load-bearing members of bridges exposed to loads produced by heavy and ultra heavy vehicles including trafficway defects. A structural design is implemented for the identification and estimation of automated control for dynamic properties of bridge span beams accounting for trafficway potholes. It is shown that servicing properties are changed due to non-standard vehicles. Deformation properties of bridge spans are obtained herein.

**Keywords:** automated control; pothole; moving load; span; stress-strain state; oscillations; composite reinforced concrete span.

В настоящее время происходит внедрение в практику эксплуатации новых тяжелых и сверхтяжелых типов автотранспорта. Их скорости, интенсивность движения вызывают в несущих элементах транспортных сооружений нерегулярные гармонические (квазигармонические) колебания. Особо отличается нестационарный режим нагружения элементов пролетных строений подвижными нагрузками (рис. 1) с учетом дефектов на проезжей части.

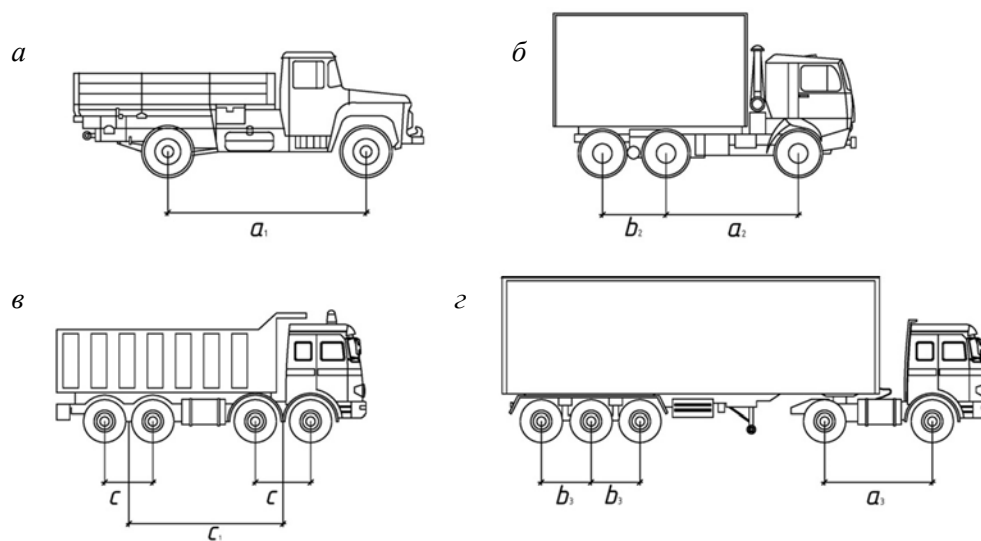


Рис. 1. Тяжелые и сверхтяжелые типы автотранспорта:  
а – двухосный автомобиль (ЗИЛ); б – трехосный автомобиль (КАМАЗ); в – четырехосный автомобиль (HOWO); з – тягач + полуприцеп

Изучение взаимодействия подвижной нагрузки с пролетным строением мостовых и других транспортных сооружений весьма сложно из-за достаточно большого спектра факторов, таких как: взаимодействие временной нагрузки с пролетным строением с учетом наличия дефектов, в частности, в виде выбоин на проезжей части; изменение динамических характеристик системы

«автомобиль + пролетное строение» от воздействия сверхнормативных временных нагрузок, вызывающее нестандартные квазистатические колебания.

Существующая в проектировании нормативно-техническая литература о влиянии колебательного процесса на пролетные строения мостов связана с дополнительным динамическим нагружением, обладающим силой инерции движущихся масс и представляющим динамический коэффициент  $(1 + \mu_g)$ , а также другие показатели  $f(P_{вр}; V; \omega; \gamma)$ , принимающие, в той или иной степени, участие в формировании предельных состояний, где  $P_{вр}$  – временная нагрузка;  $V$  – скорость движения автомобиля;  $\omega$  – частота собственных колебаний пролетного строения;  $\gamma$  – коэффициент затухания.

Как показывает опыт эксплуатации и технической диагностики мостовых сооружений, в доведении до предельного состояния конструкции от динамического воздействия особую роль отводят показателям  $M_g$ ,  $V_{кр}$ ,  $\zeta$ ,  $\bar{\omega}/\omega$ , где  $M_g$  – дополнительный динамический изгибающий момент от воздействия временной нагрузки с учетом сил инерции и диссипации в условиях взаимодействия колеса автомобиля с дефектом на проезжей части (в частности, выбоины);  $V_{кр}$  – критическая скорость, при которой эксплуатационная прочность сооружения в рамках управляемых пластических деформаций  $\xi_{пл} = 0,0016–0,0020$  приближается к предельной;  $\zeta$  – параметр диссипации;  $\bar{\omega}/\omega$  – отношение круговой (вынужденной) частоты к частоте собственных колебаний.

Анализ структурного содержания и критериев, заложенных в определении  $(1 + \mu_g)$ , показывает недостаточность компонент, оценивающих влияние подвижной нагрузки на пролетное строение в условиях квазистатических колебаний с учетом дефектов на проезжей части. Имеются также противоречия в оценке динамической добавки динамическим коэффициентом  $(1 + \mu_g)$ . Например, эксперимент показал, что для сталежелезобетонных мостов балочной системы с ровным покрытием проезжей части  $V_{кр} = 36$  км/ч и  $\omega = 16–18$  с<sup>-1</sup>, тогда как для неровной проезжей части  $V_{кр} = 10$  км/ч и  $\omega = 15–16$  с<sup>-1</sup>, что абсолютно несопоставимо с реальными условиями эксплуатации мостов. Это, в первую очередь, связано с тем, что критическая скорость  $V_{кр}$  математически определяется исходя из соображения, что  $\omega = \pi \cdot V_i / \ell$ , или по формуле В.В. Болотина:

$$V_{кр} = \frac{\omega \cdot L \cdot \ell_b}{\pi(2L + \ell_b)}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота собственных колебаний пролетного строения;  $L$  – длина пролета моста;  $\ell_b$  – расстояние между выбоинами на проезжей части.

Тогда составляющая  $\mu_g$  динамического коэффициента  $(1 + \mu_g)$  будет равна

$$\mu_g = \frac{\pi^2 \cdot \alpha}{12(1-\alpha)}; \quad \alpha = (0,0038-0,0051)V_{кр}. \quad (2)$$

Анализ формулы (1) указывает на отсутствие в формуле динамической добавки в динамическом коэффициенте ускорений и диссипаций колебаний подрессорной части автомобиля и всей системы «автомобиль + пролетное строение».

Данное обстоятельство подтверждает необходимость рассмотрения изменений в определении динамических характеристик металла и железобетона, принятых при проектировании нормативно-техническим источником СП 35.133.30.2011 «Мосты и трубы», где в априорном виде представлены  $(1 + \mu_g)$  металлических и железобетонных мостов [1], которые в определенной степени подтверждают исследования Н.И. Новожиловой и В.А. Быстрова [2]. В связи с этим в условиях эксплуатации мостовых сооружений тяжелой и сверхтяжелой нагрузкой вопрос их динамического воздействия на пролетное строение, усугубляемого влиянием дефектов в виде выбоин на проезжей части, приобретает особую актуальность. Инерционные силы системы «автомобиль + пролетное строение» от воздействия дефектов в виде выбоин на проезжей части значительно изменяют напряженно-деформированное состояние несущих балок пролетных строений моста.

Дифференциальное уравнение вертикальных колебаний пролетных строений автодорожных мостов, рассматриваемое с учетом дефектов проезжей части, можно представить по аналогии с исследованиями, отраженными в работах [3, 4] в виде

$$\frac{m_0 \cdot d^2 y(x,t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + k_0 \frac{d}{dt}\right) \frac{d^4 y(x,t)}{dx^4} = \sum_1^n R_i \cdot f(V,t), \quad (3)$$

где  $y(x,t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \omega \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cdot \sin \omega(t_1 - t_2)$ ;  $C_1, C_2$  – параметры дефекта проезжей части;  $R_i$  – параметр динамического воздействия;  $m_0$  – погонная масса балки;  $EI_z$  – изгибная жесткость балки;  $k_0$  – коэффициент диссипации колебательного процесса;  $t$  – время движения временной нагрузки по пролетному строению;  $t_1, t_2$  – время въезда и выезда с выбоины;  $f(V,t)$  – функция скорости движения транспорта и временная функция. Представляя дефект проезжей части (например, в виде выбоины), параметр  $y(x,t)$  достаточно точно характеризуется выражением [4]

$$y(x,t) = \frac{h_b}{2} \left[ 1 - \cos \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\ell_b} \right] \text{ при } V = \text{const}, \quad (4)$$

где  $h_b$  – глубина выбоин;  $\ell_b$  – длина выбоин.

При часто расположенных по длине пролета выбоинах необходимо ввести коэффициент приведения для неровностей.

При  $P_i = P_0^i (1 + \mu_g)$ , где  $P_0^i$  – величина нормативной временной нагрузки, уравнение (3) приобретает вид

$$m_0 \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + k_0 \frac{d}{dt}\right) \frac{d^4 y(x,t)}{dx^4} = P_0^i (1 + \mu_g) C_1. \quad (5)$$

При  $V = \text{const}$  и  $C_1 = h + \frac{(1 + \mu_g) P_0^i \cdot \ell^3}{48EI_z}$  формула (5) имеет вид

$$m_0 \frac{d^2 y(x,t)}{dt^2} + EI_z \left(1 + k_0 \frac{d}{dt}\right) \frac{d^4 y(x,t)}{dx^4} = h + \frac{(1 + \mu_g) P_0^i \cdot \ell^3}{48EI_z}. \quad (6)$$

Уравнение (6) должно быть решено для определения  $k_0$  – коэффициента, характеризующего динамическую жесткость системы, и  $\mu_g$  – динамической составляющей влияния выбоин, являющейся функцией изгибающего момента  $M_g$  и напряжения  $\sigma_g$ .

Описываем неровность на проезжей части зависимостью

$$y(t) = \frac{h_b}{2} \left[ 1 - \cos \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\ell_b} \right].$$

При  $V = \text{const}$  имеем

$$y_{\max} = h_b + y_{\text{ст}} + y_g, \quad (7)$$

где  $y_g$  – величина дополнительного прогиба балки пролетного строения за счет увеличения динамического эффекта при прохождении через выбоину.

Пренебрегая величиной демпфирования амортизаторов движущегося автомобиля на поверхности проезжей части с выбоинами, коэффициент  $k_0$  характеризует динамическую жесткость системы «автомобиль + пролетное строение» и равен  $k_0 = 85 \frac{EI_z}{\ell^3}$ .

$$\text{Тогда} \quad y_{\text{ст}} = f = \frac{\sum P \cdot \ell^3}{48EI_z}. \quad (8)$$

При  $k_0 = 85 \frac{EI_z}{\ell^3}$  период колебаний такой системы равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{P}{g} \cdot 85 \frac{EI_z}{\ell^3}} = 18,7 \sqrt{\frac{P \cdot EI_z}{\ell^3}}. \quad (9)$$

$$\text{При} \quad \frac{E}{G} = 2(1 + \mu); \quad y_{\text{ст}} = f = \frac{P \cdot \ell^3 (1 + (2 + \mu))^2}{48Eh^3 \ell^2}, \quad (10)$$

что сопоставимо с исследованиями, приведенными в работе [5].

В данной формуле  $\mu = 0,35-0,47$  – коэффициент Пуассона при работе конструкции в упругой области;  $\mu = 0,47-0,5$  – при работе материала несущих балок мостов за пределом упругости при  $\xi_{\text{пл}} \approx 0,0006-0,0016$  [6].

Ускорение в поперечном направлении нагружаемой силы  $P_{\text{НК}}$  обеспечивает инерционное ускорение за счет амортизаторов, и тогда временная нагрузка на 1 пог. м балки  $dx$  равна [7]

$$P_{\text{НК}} \cdot dx = \frac{-\rho \cdot h \cdot dx \cdot d^2 \cdot \omega}{dt^2}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – удельная плотность материала балок;  $h \cdot dx$  – объем элемента длиной 1 пог. м;  $\rho \cdot h \cdot dx$  – масса элемента длиной 1 пог. м.

Знак (–) указывает на псевдосопротивление ускорению, поскольку прогиб ( $f$ ) совпадает с направлением ускорения перемещения и обратно по знаку направления силы инерции.

Работа, совершаемая  $P_{\text{НК}}$  при  $f_i = f_{\text{max}} = [f]$ , может быть представлена в виде  $P_p = \frac{m^2 \cdot \pi^2 \cdot EI}{l^2}$ ;  $m = 1$ ;  $m$  – номер формы колебаний.

$$\text{Тогда} \quad f_{\text{max}} = \frac{(P_n + P_{\text{НК}}) \ell^3}{48EI_z} \left( \frac{1 + 2,85h^2}{\ell^2} \right), \quad (12)$$

где  $P_n$  – величина постоянной нагрузки;  $P_{\text{НК}}$  – величина временной нагрузки.

Максимальному прогибу балки соответствует частота собственных колебаний системы

$$\omega = \frac{m^2 \cdot \pi \cdot k_0}{2\ell^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \beta, \quad (13)$$

где  $m = 1$ ;  $\beta = 0,82$  с;  $k_0^2 \approx h/12$ .

При въезде в выбоину одного из колес автомобиля происходит его инерционный удар, колебательный процесс которого одинаково распространяется в поперечном и продольном направлениях. Одновременно в работах А.Г. Барченкова, А.И. Ананьина, А.Н. Котукова, В.С. Сафронова доказано, что происходит эффект процесса затухания давления оси автомобиля на проезжую часть в выбоине за счет срабатывания рессорной части [8]. Коэффициент затухания является функцией скорости и времени в рамках определенной гармонике колебаний. Например, при скорости  $V \approx 40$  км/ч и первой гармонике колебания коэффициент затухания колебаний  $\gamma \approx 0,34$ . Таким образом, существует возможность реальной оценки влияния одиночных неровностей (выбоин) на проезжей части мостов на колебания от движущегося транспорта и за счет этого проведение автоматического регулирования динамических характеристик и колебаний мостов.

Затухающий процесс от съезда в выбоину на проезжей части и выезда с нее характеризуется уравнением вида

$$y(t) = \frac{1}{\omega'} e^{-\gamma t} \cdot \sin \omega' \cdot t, \quad (14)$$

где  $\omega'$  – частота колебаний;  $t$  – время колебаний.

При попадании колеса автомобиля в выбоину (рис. 2) справедливо равенство

$$\sigma_g = \mu_g \cdot \sigma_{\text{ст}}, \quad (15)$$

где  $\mu_g$  – динамическая добавка.

В свою очередь, 
$$\mu_g = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h_{\max}^b}{f_g}}, \quad (16)$$

где  $h_{\max}^b$  – глубина выбоины на проезжей части;  $f_g$  – дополнительный прогиб балки от динамического воздействия колеса автомобиля от попадания в выбоину определяется в соответствии с рекомендациями Н.Н. Стрелецкого:

$$f_g = \frac{(P + 0,5Q_6)l^3}{48EI_z}, \quad (17)$$

где  $Q_6$  – вес балки пролетного строения;  $P = P_{\Pi}^{\text{II}} + P_{\text{вп}}$ ;  $P_{\Pi}^{\text{II}}$  – постоянная нагрузка второй стадии работы;  $P_{\text{вп}}$  – нормативная временная нагрузка.

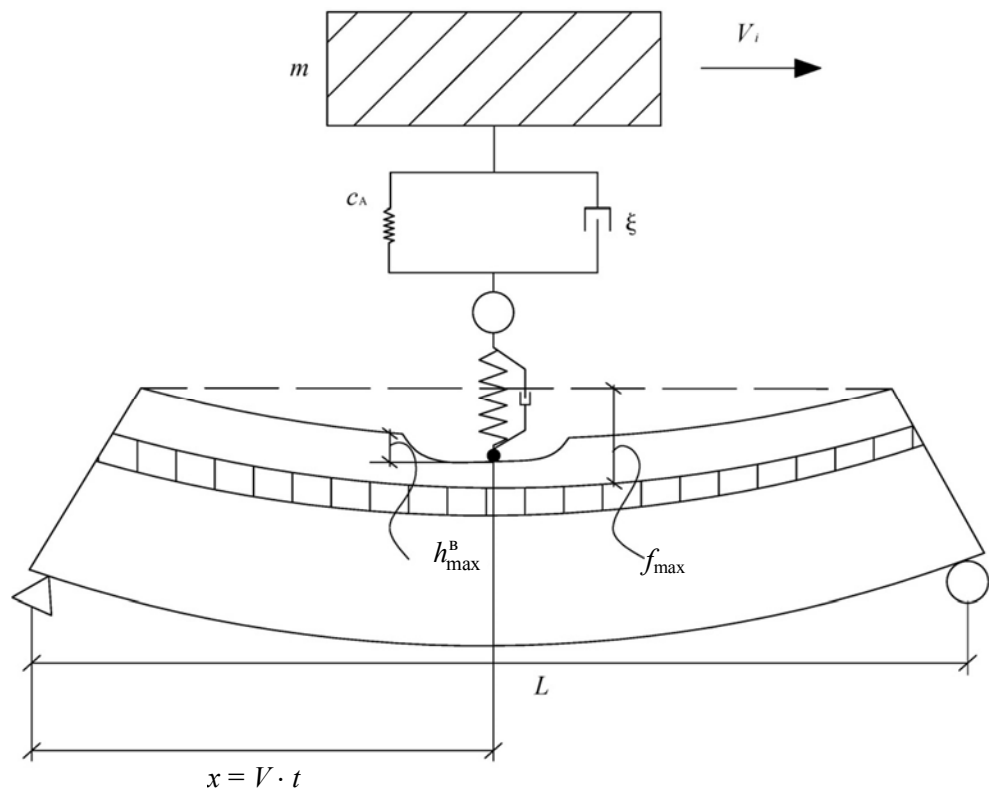


Рис. 2. Схема взаимодействия колеса с выбоиной на проезжей части

В конечном итоге 
$$h_{\max}^b = \left[ (\mu_g - 1)^2 - 1 \right] \frac{f_{\max}}{2}. \quad (18)$$

Для выявления и оценки эффекта автоматического регулирования динамических характеристик балок пролетных строений моста (на примере автодорожного моста через р. Томь в г. Новокузнецке) с учетом влияния дефектов проезжей части в виде выбоин реализуется расчетная схема (рис. 3).

Движущийся автотранспорт имеет вес  $P = 80$  тс. Жесткость его амортизаторов (рессор) характеризуется статическим прогибом пролетных строений  $y_{ст} = 0,11$  м, при этом дополнительная инерционная добавочная нагрузка на пролетное строение составляет 27 тс. Представляя предельное деформирование пролетного строения моста по синусоиде длиной 84,19 м и амплитудой колебаний 0,12 м, определяем критическую скорость движения транспорта из возможной максимальной амплитуды вертикальных колебаний, не превышающих  $\frac{1}{400} \ell$ , по формуле

$$V_{кр}^{теор} = V_0 \left[ \frac{1 + (2 \cdot \gamma \cdot \beta)^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \gamma \cdot \beta)^2} \right]^{1/2}, \quad (19)$$

где  $V_0 = 50$  км/ч – разрешенная скорость движения по мосту;  $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} = 0,82$  с;  $\gamma$  – коэффициент диссипации (затухания). При определении экспериментальным путем  $\gamma = 0,12$ ; резонансным методом  $\gamma = 0,12-0,15$  и  $\gamma = 0,27$  для случая, когда в процессе саморегулирования частоты колебаний в системе имеет место сдвиг по фазе синусоидального процесса на  $90^\circ$  от воздействия внешней нагрузки. Теоретическое же значение коэффициента  $\gamma_{теор}$  для сталежелезобетонного пролетного строения определяется из формулы

$$\gamma_{теор} = 0,016 \sqrt{\frac{C_p}{m}}, \quad (20)$$

где  $m = 1$ ,  $C_p = 0,04$  м;  $\gamma_{теор} = 0,032$ .

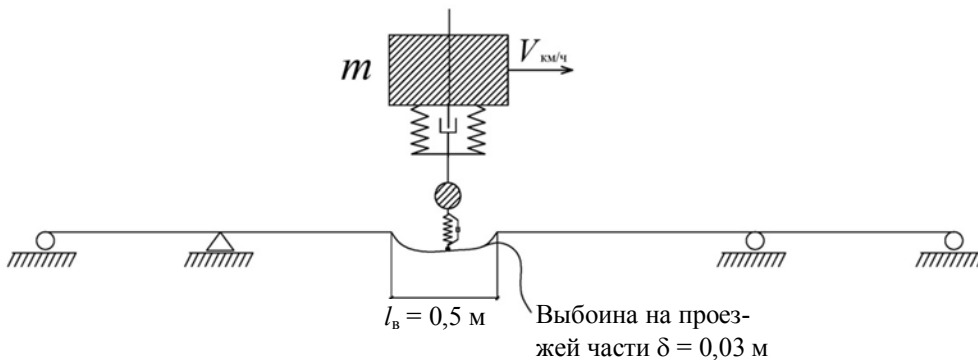


Рис. 3. Расчетная схема взаимодействия колеса с выбоиной на проезжей части

$$\text{Тогда } V_{кр}^{теор} = 50 \text{ км/ч} \left[ \frac{1 + (2 \cdot 0,27 \cdot 0,82)^2}{(1 - 0,82^2)^2 + (2 \cdot 0,27 \cdot 0,82)^2} \right]^{1/2} = 100 \text{ км/ч.}$$

Таким образом, в процессе автоматического регулирования динамических характеристик пролетных строений мостов удастся установить реальную картину эксплуатационных свойств, удовлетворяющих требованиям критериев предельных состояний.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кириллов, В.С.* Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах / В.С. Кириллов. – М. : Транспорт, 1971. – 196 с.
2. *Новожилова, Н.И.* Прогнозирование надежности конструкций стальных и сталежелезобетонных мостов / Н.И. Новожилова, В.А. Быстров, В.Л. Шайкевич. – Л. : ЛИСИ, 1988. – 96 с.
3. *Будковой, А.Н.* Нестационарные колебания балочных систем при переходных режимах воздействия подвижной нагрузки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2014. – 20 с.
4. *Ефимов, П.П.* К вопросу о динамических возмущениях, вызванных движением автомобиля по неровному покрытию проезжей части мостов / П.П. Ефимов // Теоретические и экспериментальные исследования мостов и строительных конструкций. – Омск : СибАДИ., 1970. – С. 65–73.
5. *Доннелл, Л.Г.* Балки, пластины и оболочки / Л.Г. Доннелл. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 317 с.
6. *Картопольцев, В.М.* Металлические мосты с бистальными балками / В.М. Картопольцев. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1992. – 248 с.
7. *Киселев, В.А.* Динамические линии влияния перемещений и внутренних сил в балках, рамах и плитах, простых и на упругом основании, от груза, движущегося с равномерной скоростью / В.А. Киселев // Труды МАДИ. Вып. 18. – М., 1956. – С. 139–171.
8. *Барченков, А.Г.* Применение корреляционной теории для динамических расчетов мостов / А.Г. Барченков, А.Н. Котуков, В.С. Сафронов // Строительная механика и расчет сооружений. –1970. – № 4. – С. 43–48.

## REFERENCES

1. *Kirillov V.S.* Eksploatatsiya i rekonstruktsiya mostov i trub na avtomobil'nykh dorogakh [Servicing and reconstruction of motorway bridges and ducts]. Moscow : Transport Publ., 1971, Pp 196. (rus)
2. *Novozhilova N.I., Bystrov V.A., Shaikevich V.L.* Prognozirovaniye nadezhnosti konstruktssii stal'nykh i stalezhelezobetonnykh mostov Uchebnoe posobie s elementami UIRS [Robustness of steel and reinforced concrete steel bridges. Teaching aid]. Leningrad : LISI Publ., 1988. 96 p. (rus)
3. *Budkovoï A.N.* Nestatsionarnyye kolebaniya balochnykh sistem pri perekhodnykh rezhimakh vozdeystviya podvizhnoi nagruzki: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Unsteady oscillations of beams under movable load. PhD abstract]. Voronezh, 2014. 20 p. (rus)
4. *Efimov P.P.* K voprosu o dinamicheskikh vozmushcheniyakh, vyzvannykh dvizheniem avtomobilya po nerovnomu pokrytiyu proezzhei chasti mostov [Dynamic loads induced by vehicle movement on poor road surface]. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya mostov i stroitel'nykh konstruktssii. Omsk : SibADI Publ., 1970. Pp. 65–73. (rus)
5. *Donnell L.G.* Balki, plastiny i obolochki [Beams, plates and shells]. Moscow : Nauka Publ., 1982. 317 p. (rus)
6. *Kartopol'tsev V.M.* Metallicheskie mosty s bital'nymi balkami [Metal bridges with hybrid girders]. Tomsk : TSU Publ., 1992. 248 p. (rus)
7. *Kiselev V.A.* Dinamicheskie linii vliyaniya peremeshchenii i vnutrennikh sil v balkakh, ramakh i plitakh, prostykh i na uprugom osnovanii, ot gruzha, dvizhushchegosya s ravnomernoï skorost'yu [Dynamic effect from displacement and internal loads in both simple elastically supported girders, frames and plates depending on moving mass]. *Coll. Papers MADI*. 1956. No. 18. Pp. 139–171. (rus)
8. *Barchenkov A.G., Kotukov A.N., Safronov V.S.* Primeneniye korrelyatsionnoi teorii dlya dinamicheskikh raschetov mostov [Correlation theory applied to bridge dynamic analysis]. *Stroit. mekh. i raschet sooruzhenii*. 1970. No 4. Pp. 43–48. (rus)