

Обратите внимание!

Статья отозвана (ретрагирована)

Статья

Баракат, А. Конечно-элементный анализ динамики пролетных конструкций при воздействии подвижной нагрузки / А. Баракат // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS223.pdf>. — DOI: 10.15862/07SATS223.

**отозвана (ретрагирована) редакцией журнала
в соответствии с правилами отзыва (ретракции)
Интернет-журнала «Транспортные сооружения»
<https://t-s.today/retraction.html>**

**В ходе дополнительной проверки выяснилось,
что значительную часть представленного материала составляют
некорректные заимствования из следующей публикации:**

Lou, P. Finite element analysis for train–track–bridge interaction system / P. Lou. — DOI <https://doi.org/10.1007/s00419-007-0122-4> // Archive of Applied Mechanics. — 2007. — Т 77. — № 10. — С. 707–728. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00419-007-0122-4>.

Редакция приносит извинения читателям за доставленные неудобства

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 2 / 2023, Vol. 10, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS223.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS223 (<https://doi.org/10.15862/07SATS223>)

Конечно-элементный анализ динамики пролетных конструкций при воздействии подвижной нагрузки

Баракат А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Баракат Ахмад, e-mail: ahmadbarakat9992@gmail.com

Аннотация. Введение: Обеспечение стойкости пролетных конструкций при динамических воздействиях — одна из основных задач при их проектировании и возведении. Эта задача выполняется в основном по изучению динамического поведения железнодорожных мостов при движении поезда. Данная работа посвящена изучению построения конечно-элементной модели пролетных конструкций при динамических воздействиях, вызываемых подвижной нагрузкой на главную балку железнодорожных мостовых переходов.

Методы: Элементы конструкции моделируются методом конечных элементов в программном комплексе Midas civil с использованием стержневых конечных элементов. Динамический расчет проводится прямым динамическим методом в линейной постановке. Постоянные нагрузки на конструкцию переносятся в массу для обеспечения требований динамического расчета. Рельс моделируется как линейная упругая балка Бернулли-Эйлера конечной длины, а мост моделируется как серия многопролетных неразрезных балок Бернулли-Эйлера. Взаимодействия системы (поезд — путь — мост) моделируется упругими элементами.

Результаты: Создан алгоритм расчёта пролётных конструкций при динамических воздействиях и построен динамический ответ конструкции. В результате всего вышеперечисленного получены зависимости наибольшего вертикального динамического перемещения и динамического ускорения от времени для разной скорости движения.

Обсуждение: Данная работа позволила понять принцип создания линейной математической модели динамического взаимодействия системы (мост — поезд — железнодорожный путь) методом конечных элементов и представлен алгоритм расчёта пролётных конструкций при динамических воздействиях. Статья показала влияние скорости поезда на динамическое поведение пролетных конструкций, так что необходимо учитывать это влияние на параметры напряженно-деформированного состояния (вертикальные перемещения).

Ключевые слова: пролетные конструкции; динамические воздействия; метод конечных элементов; подвижная нагрузка; динамический анализ; математическая модель; вертикальное перемещение; вертикальное ускорение

Finite element analysis of the span structures dynamics under a moving load influence

Ahmad Barakat

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

Corresponding author: Ahmad Barakat, e-mail: ahmadbarakat9992@gmail.com

Abstract. Introduction: Providing the span structure durability under dynamic influences is one of the main tasks in their design and construction. This task is accomplished mainly by studying the dynamic behavior of railway bridges when a train is moving. The paper considers the study of building a span structure finite element model under dynamic influences caused by a moving load on the main beam of railway bridge crossings.

Methods: Construction members are designed by the finite element method in the Midas civil software package using rod finite elements. The dynamical analysis is carried out by the direct dynamic method in a linear setting. Fixed loads on the structure are transferred to the mass to meet the requirements of dynamic analysis. The rail is designed as a linear elastic Bernoulli-Euler beam of finite length, and the bridge is designed as a series of multi-span continuous Bernoulli-Euler beam. The interaction of the system (train — track — bridge) is designed by elastic elements.

Results: An algorithm for calculating span structures under dynamic influences was created and a dynamic response of the structure was built. As a result of all the above, the dependences of the greatest vertical dynamic displacement and dynamic acceleration on time for different speeds were obtained.

Discussion: This work made it possible to understand the principle of creating a linear mathematical model of the dynamic interaction of the system (bridge — train — railway) by the finite element method and presented an algorithm for calculating span structures under dynamic influences. The article showed the influence of train speed on the dynamic behavior of span structures, so it is necessary to take into account this influence on the parameters of the stress-strain state (vertical displacements).

Keywords: span structures; dynamic loading; finite element method; moving load; dynamic analysis; mathematical model; vertical displacement; vertical acceleration

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Обеспечение стойкости пролетных конструкций при динамических воздействиях — одна из основных задач при их проектировании и возведении, поэтому исследование воздействия поездов на железнодорожный мост всегда является актуальной темой для безопасности эксплуатации пролетных конструкций.

Данная задача выполняется в основном по изучению динамического поведения железнодорожных мостов при движении поезда.

Для этого, построение наиболее реальной математической модели является главным для более понятного моделирования поведения пролетных конструкций при динамических воздействиях.

В работе Дьяченко Л. и Смирнов В. [1] представлена методология математического моделирования, и приведены основные дифференциальные уравнения движения элементов системы (мост — поезд).

В их работе, Olmos J.M., Astiz M.A. проводили анализ бокового динамического ответа виадуков с высокими опорами под действием высокоскоростного поезда с рассмотрением трехмерного составного поезда и конечно-элементной системы (мост — путь) [2].

В целом, формирование и построение расчетной модели взаимодействия моста с поездом проводится на основе метода конечных элементов, который позволяет решать задачи динамики пролетных конструкций, находящихся под воздействием подвижных нагрузок [3].

Данная тема в последние годы вызывает большой интерес в научном сообществе с целью изучения и оценки динамического ответа пролетных конструкций для обеспечения безопасности пути и комфорта пассажиров [4–8].

Математически, взаимодействие транспортного средства с мостом (vehicle-bridge interaction) (далее VBI) можно представить как систему двух набор уравнений движения для подсистем поезда и моста [9–12].

Изучение вопроса VBI позволяет понять не только поведение пролетных конструкций при динамических нагрузках из-за транспортных средств, а также дает хорошее понимание их ответа под воздействием других нагрузок как ветровой нагрузки [13] или сейсмического воздействия [14–16].

Методы

Methods

Модели поезда, пути и моста

Train, track and bridge designs

На рисунке 1 показан поезд, состоящий из ряда идентичных четырехколесных транспортных средств, движущихся по путевой конструкции, опирающейся на ряд многопролетных неразрезных балок для моделирования железнодорожных мостов и двух подъездных насыпей. Поезд состоит из N_v одинаковых вагонов с номерами 1, 2, ..., N_v слева направо и движется со скоростью v и ускорением a в момент времени t в продольном направлении. Согласно рисунку 2, тело вагона моделируется как твердое тело с массой m_c и моментом инерции J_c относительно поперечной горизонтальной оси, проходящей через его центр тяжести. Аналогично, каждая рама тележки рассматривается как твердое тело, имеющее массу m_t и момент инерции J_t относительно поперечной горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести. Каждая колесная пара имеет массу m_w . Пружина и амортизатор в первичной подвеске для каждой колесной пары характеризуются жесткостью пружины k_p и коэффициентом демпфирования c_p соответственно. Также вторичная подвеска между кузовом вагона и каждой рамой тележки характеризуется жесткостью пружины k_s и коэффициентом демпфирования c_s . Поскольку кузов вагона предполагается жестким, движение j -го транспортного средства может быть описано вертикальным перемещением u_{cj} и вращением θ_{cj} в его центре тяжести, где индекс j обозначает номер вагона.

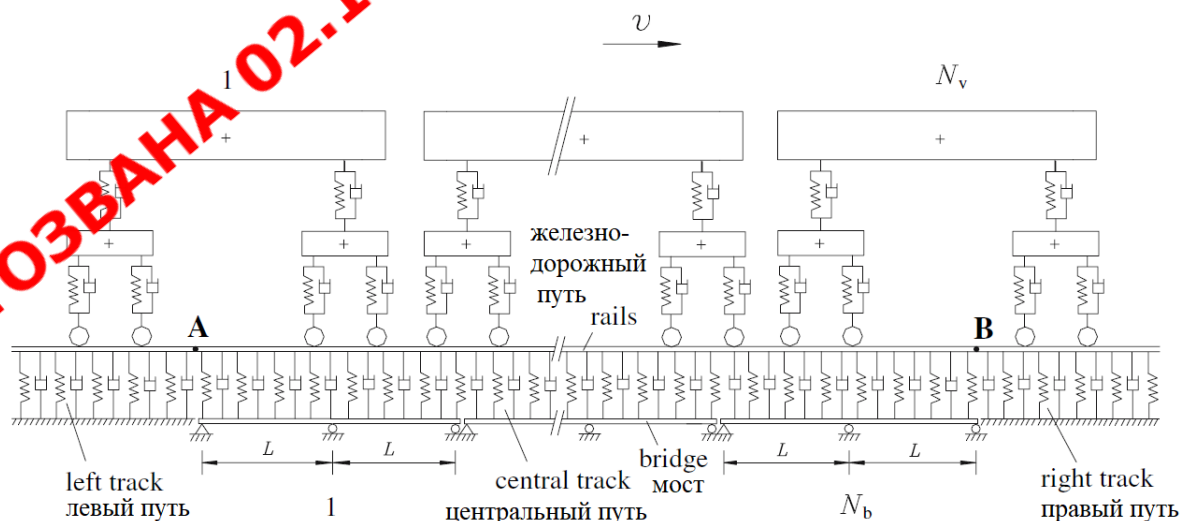


Рисунок 1. Типичная система взаимодействия поезд — путь — мост [17]

Figure 1. A typical train — track — bridge interaction system [17]

Аналогично движения задней рамы тележки j -го транспортного средства можно описать вертикальным перемещением y_{t1j} и вращением θ_{t1j} в ее центре тяжести; движения передней рамы тележки j -го транспортного средства можно описать вертикальным перемещением y_{t2j} и вращением θ_{t2j} в ее центре тяжести. Движение четырех колесных пар слева направо j -го транспортного средства может быть описано вертикальными перемещениями y_{w1j} , y_{w2j} , y_{w3j} и y_{w4j} соответственно. Следовательно, общее количество степеней свободы для каждого вагона равно 10.

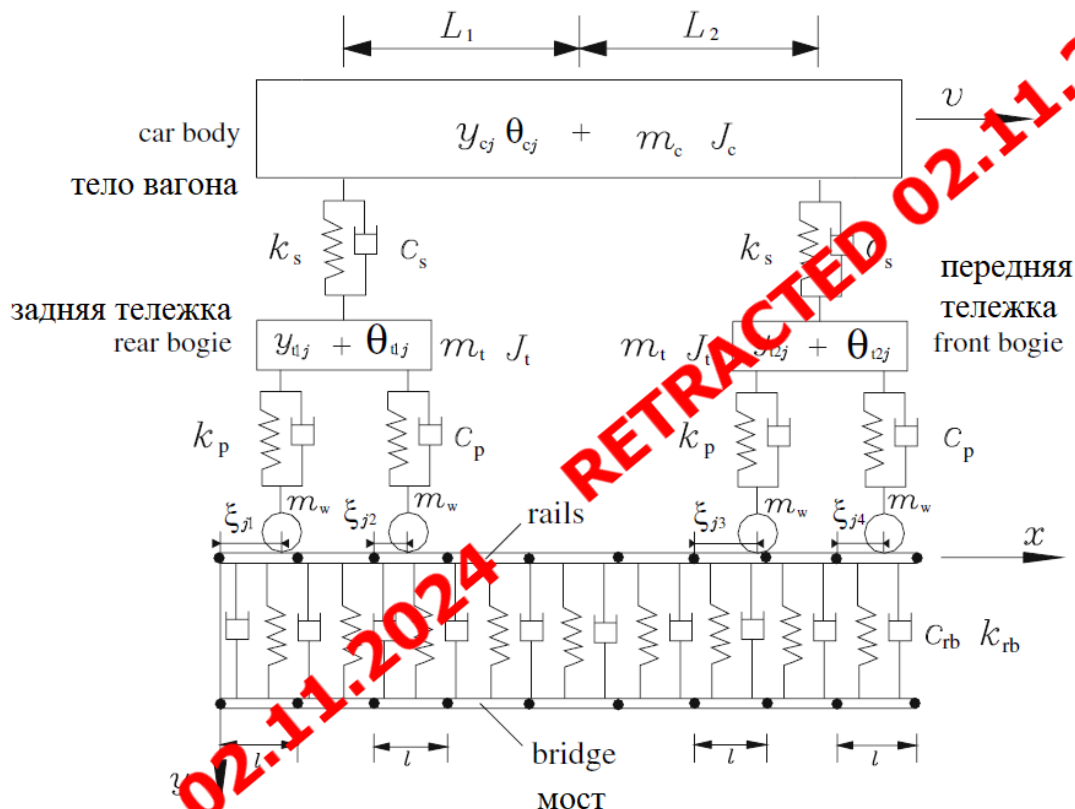


Рисунок 2. Система взаимодействия

«вагон — путь — мост» с j -м транспортным средством [17]

Figure 2. An interaction system «carriage-track-bridge» with the j -m vehicle [17]

Рельс моделируется как линейная упругая балка Бернулли-Эйлера конечной длины, а мост моделируются как серия многопролетных неразрезных балок Бернулли-Эйлера. Упругие и демпфирующие свойства рельсового полотна представлены сплошными пружинами с жесткостью k_{rb} и демпферами с коэффициентом демпфирования c_{rb} . На основе метода конечных элементов рельс разбивается на ряд балочных элементов равной длины l , а мосты также делятся на ряд балочных элементов равной длины l .

Уравнение движения системы взаимодействия поезд — путь — мост

The train — track — bridge interaction system motion equation

Уравнение движения системы взаимодействия поезд — путь — мост можно записать:

$$\begin{bmatrix} M_{vv} & 0 & 0 \\ 0 & M_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_v \\ \ddot{X}_r \\ \ddot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{vv} & C_{vr} & 0 \\ C_{rv} & C_{rr} & C_{rb} \\ 0 & C_{br} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_v \\ \dot{X}_r \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vv} & K_{vr} & 0 \\ K_{rv} & K_{rr} & K_{rb} \\ 0 & K_{br} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v \\ X_r \\ X_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_v \\ F_r \\ F_b \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где нижние индексы «v», «r» и «b» обозначают транспортные средства, рельсы и мосты соответственно. На следующих пунктах предоставлено краткое описание векторов перемещений, матрицы масс, жесткости и демпфирования, а также векторов нагрузки транспортных средств, рельсов и мостов.

1. Векторы смещения.

Предполагается, что количество транспортных средств на соответствующем пути равно N_v . Вектор смещения транспортных средств X_v порядка $(6 \times N_v) \times 1$ можно записать:

$$X_v = [X_{v1} \ X_{v2} \ \dots \ X_{vN_v}]^T. \quad (2)$$

Вектор смещения рельса X_r порядка $N_r \times 1$ можно записать:

$$X_r = [q_{r1} \ q_{r2} \ \dots \ q_{rN_r}]^T, \quad (3)$$

где N_r обозначает общее количество степеней свободы рельса.

Вектор смещения X_b порядка $\bar{N}_b \times 1$ для серии многопролетных неразрезных балок для моделирования мостов можно записать:

$$X_b = [X_{b1} \ X_{b2} \ \dots \ X_{bN_b}]^T, \quad (4)$$

N_b — общее количество многопролетных мостов, как показано на рисунке 1.

2. Матрицы для транспортных средств.

Матрицу масс M_{vv} транспортных средств порядка $(6 \times N_v) \times (6 \times N_v)$ можно записать:

$$M_{vv} = \text{diag}[M_{v1} \ M_{v2} \ \dots \ M_{vN_v}], \quad (5)$$

где M_{vj} порядка 6×6 обозначает матрицу масс j -го транспортного средства.

Матрицу жесткости K_{vv} транспортных средств порядка $(6 \times N_v) \times (6 \times N_v)$ можно записать:

$$K_{vv} = \text{diag}[K_{v1} \ K_{v2} \ \dots \ K_{vN_v}]. \quad (6)$$

3. Матрицы для рельса.

Массовая матрица M_{rr} рельса с порядком $N_r \times N_r$ может быть записана:

$$M_{rr} = M_{rr1} + M_{rr2}, \quad (7)$$

$$\text{где } M_{rr2} = \sum_{j=1}^{N_v} \sum_{h=1}^4 m_w N_{jh}^T N_{jh},$$

$$N_{jh} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]_{\xi=\xi_{jn}},$$

$$N_1 = 1 - 3(\xi/l)^2 + 2(\xi/l)^3, \ N_2 = \xi[1 - 2(\xi/l) + (\xi/l)^2],$$

$$N_3 = 3(\xi/l)^2 - 2(\xi/l)^3, \ N_4 = \xi[(\xi/l)^2 - (\xi/l)],$$

где M_{rr1} с порядком $N_r \times N_r$ представляет общую матрицу масс самого рельса, полученную путем сборки матрицы масс всех его элементов. Матрица жесткости рельса K_{rr} порядка $N_r \times N_r$ может быть выражена как:

$$K_{rr} = K_{rr1} + K_{rr2} + K_{rr3}, \quad (8)$$

$$\text{где } K_{rr2} = \sum_{j=1}^{N_v} \sum_{h=1}^4 [k_p N_{jh}^T N_{jh} + (c_p v + m_w \omega^2) N_{jh}^T \cdot N'_{jh} + m_w v^2 \cdot N_{jh}^T \cdot N''_{jh}],$$

где K_{rr1} с порядком $N_r \times N_r$ представляет общую матрицу жесткости самого рельса, полученную путем сборки матрицы жесткости всех его; K_{rr3} с порядком $N_r \times N_r$ представляет общую матрицу жесткости, индуцированную жесткостью рельсового полотна, полученную путем сборки матрицы жесткости всех элементов.

Так же матрица демпфирования рельса с порядком $N_r \times N_r$ может быть записана:

$$C_{rr} = C_{rr1} + C_{rr2}, \quad (9)$$

где C_{rr1} с порядком $N_r \times N_r$ представляет общую матрицу демпфирования, вызванную всеми транспортными средствами; C_{rr2} с порядком $N_r \times N_r$ представляет общую матрицу демпфирования, вызванную демпфированием рельсового полотна, полученную путем сборки всех элементов матрицы демпфирования.

4. Матрицы моста.

Матрица масс перемычек M_{bb} порядка $\bar{N}_b \times \bar{N}_b$ может быть записана:

$$M_{bb} = \text{diag}[M_{b1} \ M_{b2} \ \dots \ M_{bNb}], \quad (10)$$

где M_{bi} ($i = 1, 2, \dots, N_b$) обозначает матрицу масс i -го многопролетного моста.

Матрица жесткости мостов K_{bb} порядка $\bar{N}_b \times \bar{N}_b$ может быть записана:

$$K_{bb} = \text{diag}[K_{b1} K_{b2} \dots K_{bNb}], \quad (11)$$

где K_{bi} ($i = 1, 2, \dots, N_b$) обозначает матрицу жесткости i -го многопролетного моста.

Аналогично можно записать матрицу демпфирования перемычек C_{bb} порядка $\bar{N}_b \times \bar{N}_b$:

$$C_{bb} = \text{diag}[C_{b1} C_{b2} \dots C_{bNb}]. \quad (12)$$

5. Матрицы взаимодействия вагонов с рельсами.

Матрицы жесткости K_{vr} порядка $(6 \times N_v) \times N_r$ и K_{rv} порядка $N_r \times (6 \times N_v)$, матрицы демпфирования C_{vr} порядка $(6 \times N_v) \times N_r$ и C_{rv} порядка $N_r \times (6 \times N_v)$, индуцированные взаимодействием вагонов и рельса можно записать в виде:

$$K_{vr} = \sum_{j=1}^{N_v} K_{vjr1} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{vjr2} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{vjr3} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{vjr4}. \quad (13)$$

$$K_{rv} = \sum_{j=1}^{N_v} K_{r1vj} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{r2vj} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{r3vj} + \sum_{j=1}^{N_v} K_{r4vj}. \quad (14)$$

$$C_{vr} = \sum_{j=1}^{N_v} C_{vjr1} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{vjr2} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{vjr3} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{vjr4}. \quad (15)$$

$$C_{rv} = \sum_{j=1}^{N_v} C_{r1vj} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{r2vj} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{r3vj} + \sum_{j=1}^{N_v} C_{r4vj}. \quad (16)$$

6. Матрицы взаимодействия рельс-мост.

Матрица жесткости K_{br} порядка $\bar{N}_b \times N_r$, индуцированная непрерывными пружинами между рельсом и мостами, может быть записана как:

$$K_{br} = [K_{brL} K_{brC} K_{brR}], \quad (17)$$

где K_{brL} — матрица жесткости, индуцированная неразрезными пружинами между мостами и рельсом на левом участке пути; K_{brR} обозначает матрицу жесткости, индуцированную неразрезными пружинами между мостами и рельсом на правом участке пути; K_{brC} обозначает матрицу жесткости, индуцированную непрерывными пружинами между мостами и рельсом на центральном участке пути.

Матрицы демпфирования C_{br} порядка $\bar{N}_b \times N_r$ и C_{rb} порядка $\bar{N}_b \times N_r$, индуцированные непрерывными демпферами между рельсом и мостами, можно получить, просто заменив k в соответствующих матрицах жесткости K_{br} и K_{rb} на c соответственно.

7. Векторы нагрузки транспортных средств, рельсов и мостов.

Вектор нагрузки F_v транспортных средств порядка $(6 \times N_v) \times 1$ можно записать:

$$F_v = [F_{v1} \ F_{v1} \ \dots \ F_{vN_v}]^T. \quad (18)$$

Вектор нагрузки F_r с порядком $N_r \times 1$ рельса может быть записан как:

$$F_r = \sum_{j=1}^{N_v} F_{r_{j1}} + \sum_{j=1}^{N_v} F_{r_{j2}} + \sum_{j=1}^{N_v} F_{r_{j3}} + \sum_{j=1}^{N_v} F_{r_{j4}}, \quad (19)$$

где $F_{r_{j1}}$, $F_{r_{j2}}$, $F_{r_{j3}}$ и $F_{r_{j4}}$ представляют собой векторы нагрузки от задней колесной пары задней тележки. Все элементы в векторе нагрузки мостов F_b порядка $\bar{N}_b \times 1$ равны нулю.

Численное исследование

Numerical study

Предполагаем мост, состоящий из 8 предварительно-напряженных железобетонных пролетов и одного стального арочного пролета. У всех железобетонной пролетов одна длина, равная 33,6 м. Длина стального арочного пролета равна 130 м с высотой 25,88 м.

Главная балка моста опираются на поперечные балки с длиной 20 м, которые в свою очередь передают нагрузку на колонны с длиной 8 м в местах железобетонной части и 15 м в местах соединения между железобетонной частью и стальной частью (рис. 3).

Эти колонны представляют опоры конструкции с жесткой связью с фундаментом для упрощения процесса расчета. Материал железобетонных несущих элементов моста — бетон В40.

Главные несущие элементы арка являются двумя стальными балками с материалом Fe490. Эти балки связаны друг с другом распорками с материалом — сталь А36. Материал вертикальных элементов и ребра арка является сталью А572-50. Геометрические свойства элементов конструкции показаны в таблице 1.

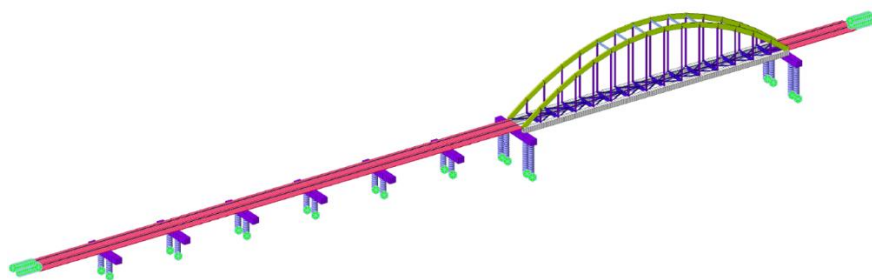


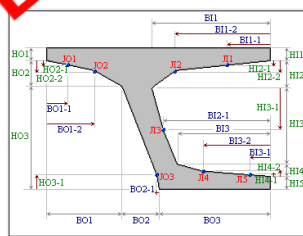
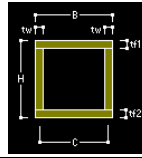
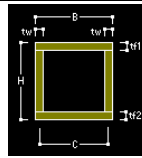
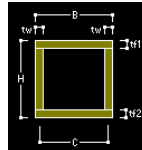
Рисунок 3. Общий вид несущих конструкций моста (разработано автором)

Figure 3. General drawing of the bridge bearing structures (developed by the author)

Таблица 1 / Table 1

Геометрические свойства элементов конструкции

Geometric properties of structural elements

Элемент Element	Свойства (м) Properties (m)	Общий вид General drawing																																																																																																
Главная ж.б. балка Main reinforced concrete beam	Outer <table><tr><td>HO1</td><td>0.2</td><td>m</td><td>BO1</td><td>2</td><td>m</td></tr><tr><td>HO2</td><td>0.338</td><td>m</td><td>BO1-1</td><td>1.05</td><td>m</td></tr><tr><td>HO2-1</td><td>0.016</td><td>m</td><td>BO1-2</td><td>1.714</td><td>m</td></tr><tr><td>HO2-2</td><td>0.178</td><td>m</td><td>BO2</td><td>1.238</td><td>m</td></tr><tr><td>HO3</td><td>1.562</td><td>m</td><td>BO2-1</td><td>0</td><td>m</td></tr><tr><td>HO3-1</td><td>0</td><td>m</td><td>BO3</td><td>2</td><td>m</td></tr></table> Inner <table><tr><td>HI1</td><td>0.2</td><td>m</td><td>BI1</td><td>2.208</td><td>m</td></tr><tr><td>HI2</td><td>0.135</td><td>m</td><td>BI2</td><td>1.714</td><td>m</td></tr><tr><td>HI2-1</td><td>0</td><td>m</td><td>BI2-1</td><td>1.714</td><td>m</td></tr><tr><td>HI2-2</td><td>0.028</td><td>m</td><td>BI3-1</td><td>1.625</td><td>m</td></tr><tr><td>HI3</td><td>1.175</td><td>m</td><td>BI3-2</td><td>0</td><td>m</td></tr><tr><td>HI3-1</td><td>0</td><td>m</td><td>BI3-3</td><td>0</td><td>m</td></tr><tr><td>HI4</td><td>0.3</td><td>m</td><td>BI3-4</td><td>0.735</td><td>m</td></tr><tr><td>HI4-1</td><td>0</td><td>m</td><td>BI4</td><td>0</td><td>m</td></tr><tr><td>HI4-2</td><td>0</td><td>m</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>HI5</td><td>0.2</td><td>m</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	HO1	0.2	m	BO1	2	m	HO2	0.338	m	BO1-1	1.05	m	HO2-1	0.016	m	BO1-2	1.714	m	HO2-2	0.178	m	BO2	1.238	m	HO3	1.562	m	BO2-1	0	m	HO3-1	0	m	BO3	2	m	HI1	0.2	m	BI1	2.208	m	HI2	0.135	m	BI2	1.714	m	HI2-1	0	m	BI2-1	1.714	m	HI2-2	0.028	m	BI3-1	1.625	m	HI3	1.175	m	BI3-2	0	m	HI3-1	0	m	BI3-3	0	m	HI4	0.3	m	BI3-4	0.735	m	HI4-1	0	m	BI4	0	m	HI4-2	0	m				HI5	0.2	m				
HO1	0.2	m	BO1	2	m																																																																																													
HO2	0.338	m	BO1-1	1.05	m																																																																																													
HO2-1	0.016	m	BO1-2	1.714	m																																																																																													
HO2-2	0.178	m	BO2	1.238	m																																																																																													
HO3	1.562	m	BO2-1	0	m																																																																																													
HO3-1	0	m	BO3	2	m																																																																																													
HI1	0.2	m	BI1	2.208	m																																																																																													
HI2	0.135	m	BI2	1.714	m																																																																																													
HI2-1	0	m	BI2-1	1.714	m																																																																																													
HI2-2	0.028	m	BI3-1	1.625	m																																																																																													
HI3	1.175	m	BI3-2	0	m																																																																																													
HI3-1	0	m	BI3-3	0	m																																																																																													
HI4	0.3	m	BI3-4	0.735	m																																																																																													
HI4-1	0	m	BI4	0	m																																																																																													
HI4-2	0	m																																																																																																
HI5	0.2	m																																																																																																
Главная стальная балка Main steel beam	$H = 2,15 \text{ м}, B = 2 \text{ м},$ $t_w = t_{f1} = t_{f2} = 0,01 \text{ м}$																																																																																																	
Поперечные ж.б. балки Transversal reinforced concrete beams	$H = 2,5 \text{ м}, B = 3 \text{ м}$	прямоугольник rectangle																																																																																																
Ж.б. колонны Reinforced concrete columns	$D = 2,5 \text{ м}$	сплошное круглое сечение solid circular cross-section																																																																																																
Соединяющие стальные балки Connecting steel beams	$H = 1,54 \text{ м}, B = 0,5 \text{ м},$ $t_w = 0,014 \text{ м}, t_f = 0,027 \text{ м}$	двутавровое сечение l-shaped cross-section																																																																																																
Рёбра арка Arch rib	$H = 2,1 \text{ м}, B = 0,6 \text{ м},$ $t_w = 0,016 \text{ м}, t_{f1} = t_{f2} = 0,014 \text{ м}$																																																																																																	
Вертикальные элементы арка Vertical arch elements	$H = 0,6 \text{ м}, B = 0,4 \text{ м},$ $t_w = 0,012 \text{ м}, t_f = 0,016 \text{ м}$	двутавровое сечение l-shaped cross-section																																																																																																
Стальные распорки арка Steel binding beam arch	$H = 0,43 \text{ м}, B = 0,26 \text{ м},$ $t_w = 0,015 \text{ м}, t_f = 0,025 \text{ м}$	двутавровое сечение l-shaped cross-section																																																																																																
Соединяющие стальные элементы верхней части арка Connecting steel elements of the upper part of the arch	$H = 0,6 \text{ м}, B = 0,5 \text{ м},$ $t_w = 0,01 \text{ м}, t_{f1} = t_{f2} = 0,014 \text{ м}$																																																																																																	

Разработано автором / Developed by the author

Расположены на главной балки моста два железнодорожные пути, сечение которых UIC60. Поезд входит слева направо и исследование проводилось с предположением прохождения поезда по одному пути.

Балки конструкции моделируются методом конечных элементов с использованием стержневых конечных элементов. Динамический расчет проводится прямым динамическим методом в линейной постановке с периодом 15 с и с шагом 0,01 с. Коэффициент демпфирования принимается 1 % для всех форм собственных колебаний. Взаимодействие (рельс — мост) моделируется согласно вышеупомянутой теоретической части. Общий вид модели конечных элементов конструкции и принцип моделирования взаимодействия пролетных конструкций с железнодорожным путем показаны на рисунке 4. На главную балку действуют следующие нагрузки:

1. Собственный вес элементов конструкции.
2. Равномерно-распределенная постоянная нагрузка равна 15 кН/м представляет вес всех элементов, расположенных на мосте. Предыдущие нагрузки перевелись в массу для обеспечения требований динамического расчета.
3. Подвижные нагрузки с разными значениями скорости поезда (240, 280, 320, 360, 400) км/ч.

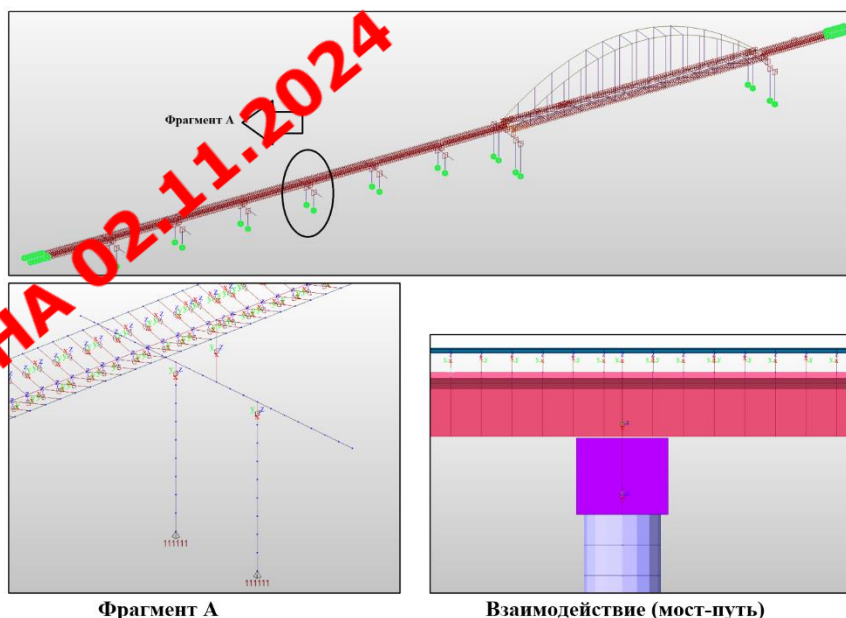


Рисунок 4. Общий вид модели конечных элементов конструкции (разработано автором)

Figure 4. General model drawing of structure finite elements (developed by the author)

Алгоритм расчёта пролётных конструкций при динамических воздействиях согласно данной статье показан на рисунке 5.



Рисунок 5. Алгоритм расчёта пролётных конструкций при динамических воздействиях (разработано автором)

Figure 5. Calculating algorithm for span structures under dynamic loads (developed by the author)

Результат исследования

Research result

На рисунках (6–9) получены зависимости наибольшего вертикального динамического перемещения и динамического ускорения от времени.

Анализируя рисунок 6, можно отметить, что соотношение между скоростью поезда и вертикальным динамическим перемещением меняется со временем прохождения поезда по мосту. В целом можно отметить, что наибольшие значения вертикального перемещения соответствуют со скоростью 280 км/ч, и также затухание динамического перемещения для больших значений скоростей $320 \leq v \leq 400$ (км/ч) происходит больше чем для маленьких значений скоростей.

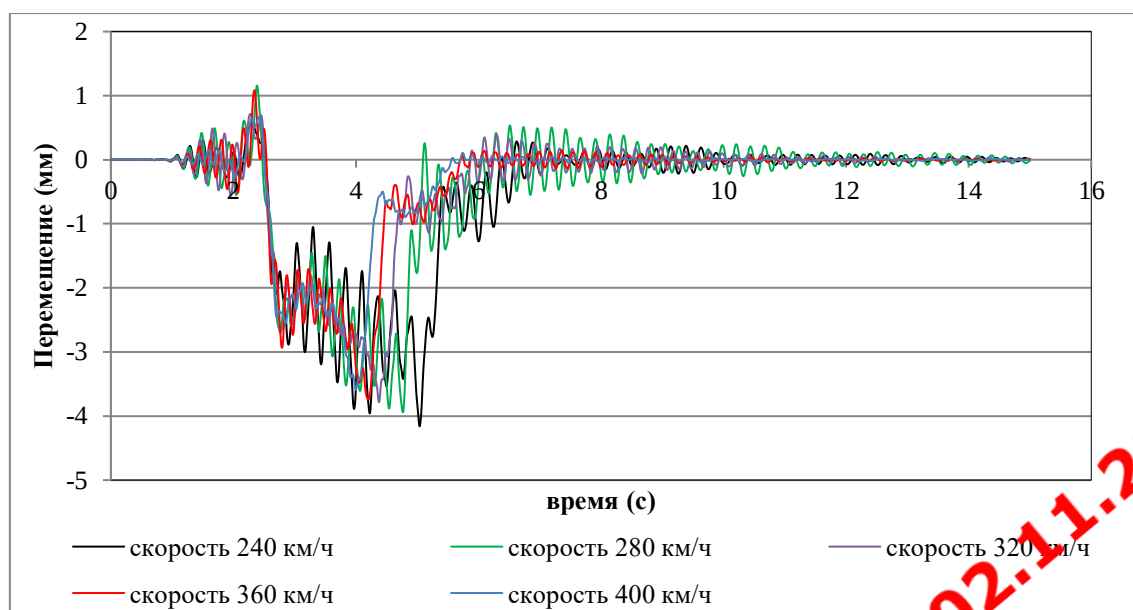


Рисунок 6. Зависимость наибольшего вертикального динамического перемещения от времени при движении поезда с 10 вагонами по предварительно-напряженной железобетонной главной балке моста с длиной 33,6 м (разработано автором)

Figure 6. Dependence of the greatest vertical dynamic displacement on time when a train with 10 carriages moves along a prestressed reinforced concrete main beam of a bridge with a length of 33,6 m (developed by the author)

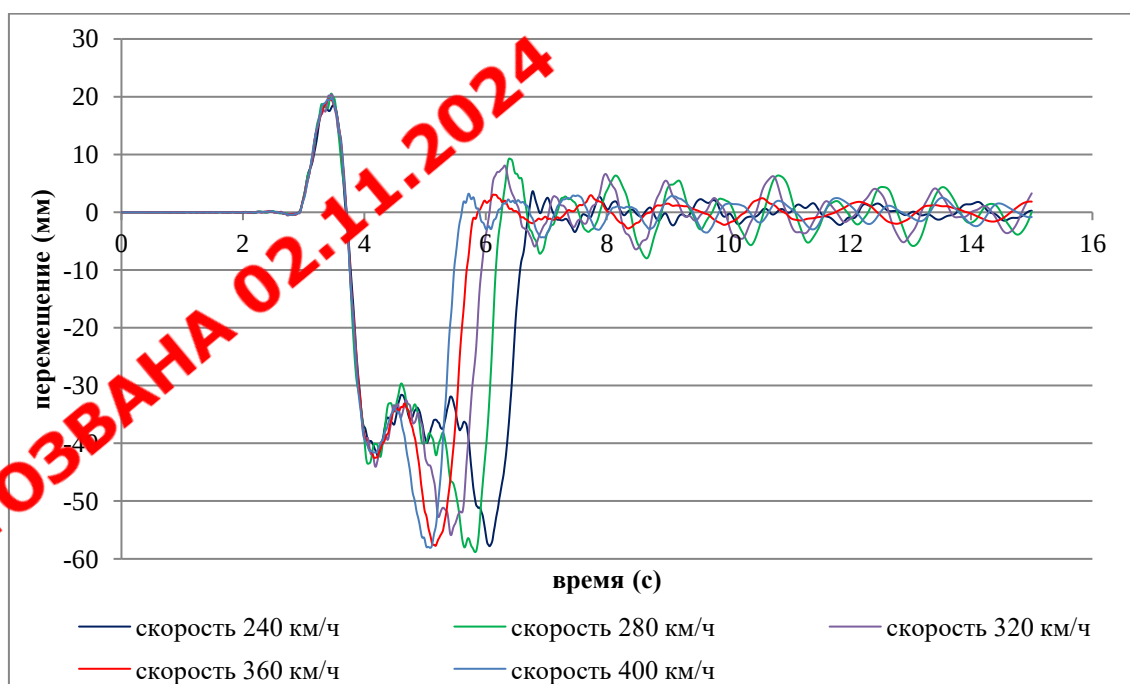


Рисунок 7. Зависимость наибольшего вертикального динамического перемещения от времени при движении поезда с 10 вагонами по стальной главной балке моста с длиной 130 м (разработано автором)

Figure 7. The dependence of the greatest vertical dynamic displacement on time when a train with 10 carriages moves along the steel main beam of a bridge with a length of 130 m (developed by the author)

Анализируя рисунок 7, можно отметить, что до достижения точки наибольшего значения вертикального перемещения, значения вертикального перемещения практически одинаковые и также наибольшие значения в стальной части моста практически одинаковые с разницей во времени дойти до пика графика. В дополнение к вышеперечисленному можно отметить, что затухание динамического перемещения происходит в диапазонах скоростей $v \leq 240$ (км/ч) и $360 \leq v \leq 400$ (км/ч). Так же, как и в железобетонной части, наибольшие значения вертикального перемещения происходят при скорости 280 км/ч.

Анализируя рисунок 8 можно отметить, что значения вертикального ускорения сильно меняются при изменении скорости поезда и наибольшие значения вертикального ускорения происходят при скорости 320 км/ч. Рисунок 8 показывает большое влияние скорости поезда на динамическое поведение главной балки моста, так что при $240 \leq v \leq 320$ (км/ч) можно отметить прямую пропорцию между скоростью поезда и вертикальным ускорением и обратную пропорцию при $360 \leq v \leq 400$ (км/ч).

Рисунок 9 показывает влияние материала несущих элементов пролетных конструкций на их волновые процессы и их динамическое поведение, так что разница в значениях вертикального ускорения стала маленькой в стальной части моста. Наибольшие значения вертикального ускорения в стальной части моста происходят при скорости $280 \leq v \leq 320$ (км/ч).

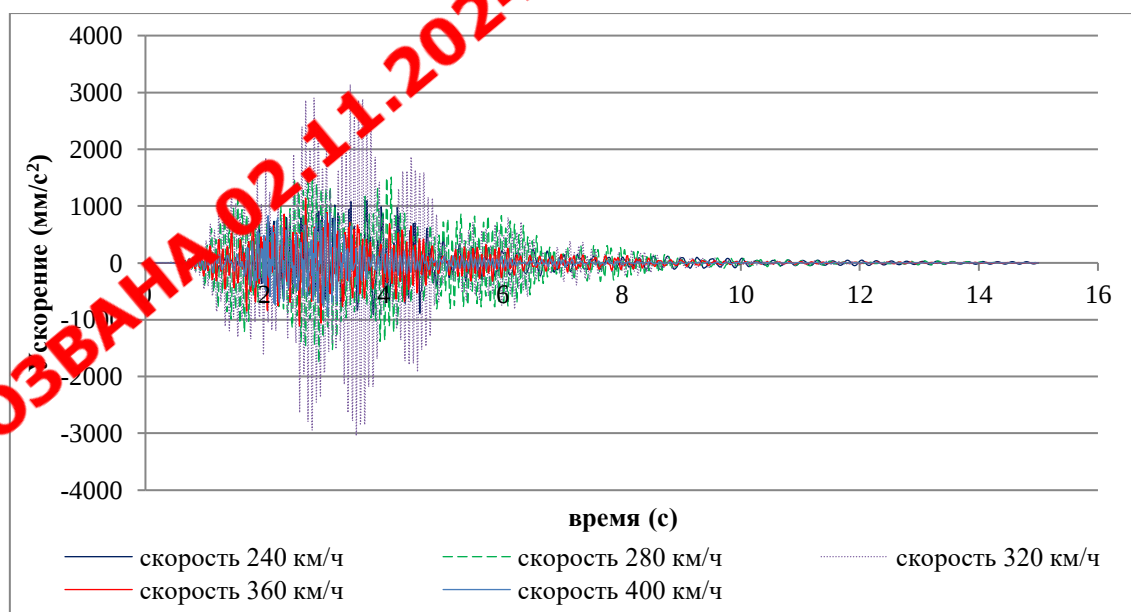


Рисунок 8. Зависимость наибольшего вертикального динамического ускорения от времени при движении поезда с 10 вагонами по предварительно-напряженной железобетонной главной балке моста (разработано автором)

Figure 8. Dependence of the greatest vertical dynamic acceleration on time when a train with 10 carriages moves along a prestressed reinforced concrete main beam of the bridge (developed by the author)

Для оценки результатов предлагаемой модели, проводилось сравнение графики зависимости наибольшего вертикального динамического перемещения от времени предварительно-напряженной железобетонной главной балки моста (рис. 6) с типовым графиком, содержащимся в авторитетной книге «Dynamic interaction of train-bridge systems in high-speed railways» (пункт 5.7.8) [18]. Сравнение показало, что форма графика, полученного текущей моделью, намного соответствует форме графика, полученного этой книгой с небольшой разницей из-за особенностей параметров каждого моста (разница в длине и нагрузке, которые приводят к разнице в значениях перемещения) (рис. 10). Исходя из предыдущего, можно отметить возможность применения данной математической модели и алгоритма расчета, которые в данной работе, для формирования динамического ответа пролетных конструкций при воздействии подвижной нагрузки по построению динамической функции, соответствующей параметрам транспортного средства (значениям сил и скорости).

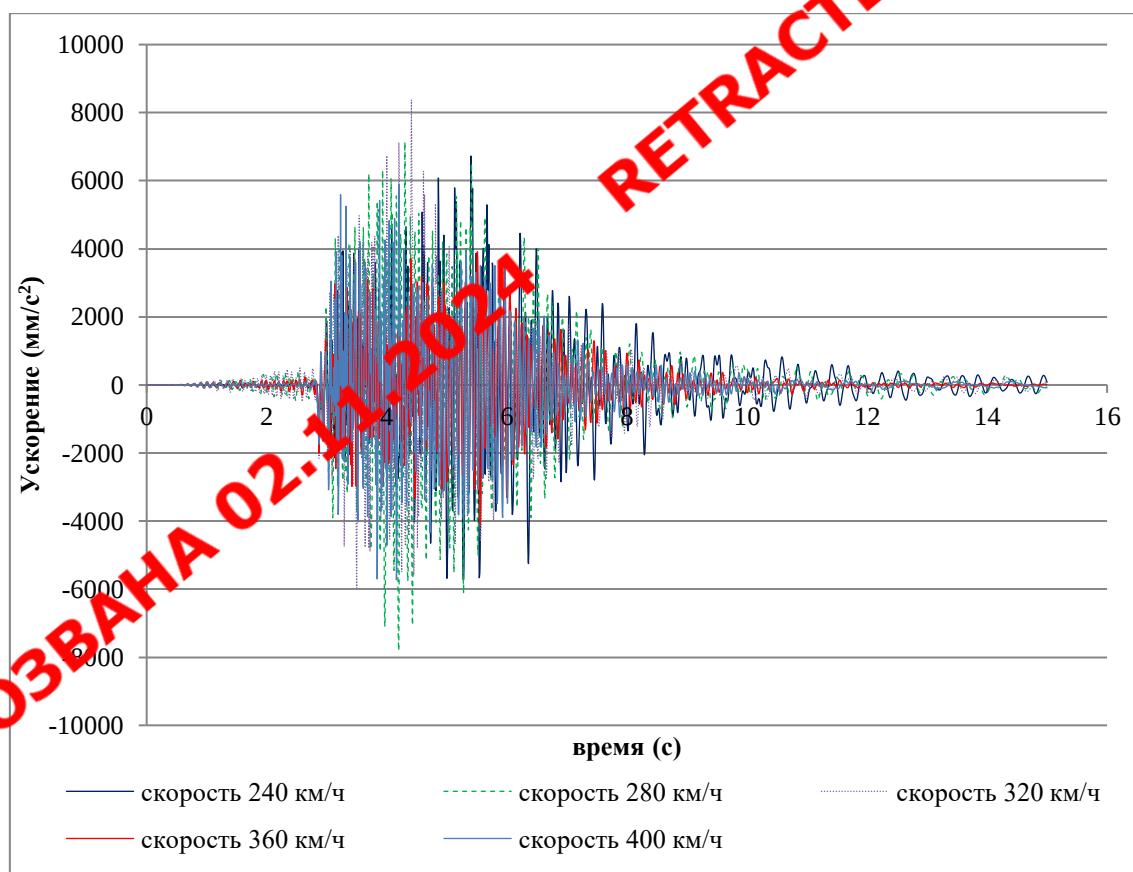


Рисунок 9. Зависимость наибольшего вертикального динамического ускорения от времени при движении поезда с 10 вагонами по стальной главной балке моста (разработано автором)

Figure 9. The dependence of the greatest vertical dynamic acceleration on time when a train with 10 carriages moves along the steel main beam of the bridge (developed by the author)

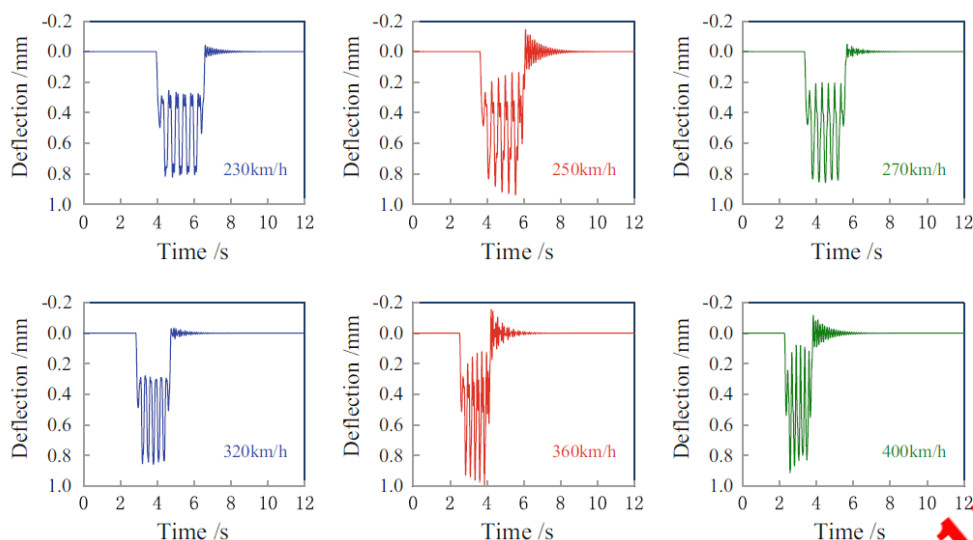


Рисунок 10. Зависимость наибольшего вертикального динамического перемещения от времени при разных скоростях поезда по книге «Dynamic interaction of train-bridge systems in high-speed railways» [18]

Figure 10. Dependence of the greatest vertical dynamic displacement on time at different train speeds according to the book «Dynamic interaction of train-bridge systems in high-speed railways» [18]

Обсуждение

Discussion

В целом можно отметить, что проведенное исследование позволило хорошо понять динамическое поведение главной балки моста при динамических воздействиях по изучению параметров напряженно-деформационного состояния НДС (вертикальные перемещения) при движении поезда с разной скоростью поезда. Результат исследования показал влияние скорости поезда на динамическое поведение пролетных конструкций, так что необходимо учитывать это влияние на параметры НДС (вертикальные перемещения) и также на вертикальные ускорения. Исследование показывает также влияние материала несущих элементов на динамическое поведение пролетных конструкций, так что график зависимости перемещения от времени намного отличается в стальной части моста по сравнению с железобетонной части, в которой процесс затухания колебаний происходит в большем темпе.

Данная статья представляет принцип создания линейной математической модели взаимодействия системы (мост — поезд — железнодорожный путь) по формированию параметров транспортного средства (значений сил и скорости) в виде динамической функции совместно с моделированием элементов конструкции стержневыми конечными элементами и взаимодействия системы (поезд — путь — мост) упругими элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Diachenko, L.** Dynamic Interaction of the “Bridge-Train” System on High-Speed Railways / L. Diachenko, V. Smirnov. — DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706015> // E3S Web Conf. — 2020. — Т 157. — С. 6015. — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/17/e3sconf_ktti2020_06015/e3sconf_ktti2020_06015.html. (дата обращения: 20.03.2023).
2. **Olmos, J.M.** Analysis of the lateral dynamic response of high pier viaducts under high-speed train travel / J.M. Olmos, M.A. Astiz. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.012> // Engineering Structures. — 2013. — Т 56. — С. 1384–1401. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029613003362>. (дата обращения: 20.03.2023).
3. **Кадисов, Г.М.** Конечно-элементное моделирование динамики мостов при воздействии подвижной нагрузки / Г.М. Кадисов, В.В. Чернышов. — DOI <https://doi.org/10.5862/MCE.44.7> // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 9. — С. 56–63. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21212530>. — EDN RWFAVJ. (дата обращения: 20.03.2023).
4. **Yang, H.** Dynamic Response of Spatial Train-Track-Bridge Interaction System Due to Unsupported Track Using Virtual Work Principle / H. Yang, N. Wu, W. Zhang [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.3390/app12126156> // Applied Sciences. — 2022. — Т 12. — № 12. — С. 6156. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/12/6156>. (дата обращения: 20.03.2023).
5. **Yu, H.** A two-step framework for stochastic dynamic analysis of uncertain vehicle-bridge system subjected to random track irregularity / H. Yu, B. Wang, Y. Li, Z. Gao. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106583> // Computers & Structures. — 2021. — Т 253. — С. 106583. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004579492100105X>. (дата обращения: 20.03.2023).
6. **Stollwitzer, A.** The longitudinal track-bridge interaction of ballasted track in railway bridges: Experimental determination of dynamic stiffness and damping characteristics / A. Stollwitzer, L. Bettinelli, J. Fink. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115115> // Engineering Structures. — 2023. — Т 274. — С. 115115. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622011919>. (дата обращения: 20.03.2023).
7. **Fedorova, M.** An algorithm for dynamic vehicle-track-structure interaction analysis for high-speed trains / M. Fedorova, M.V. Sivaselvan. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.065> // Engineering Structures. — 2017. — Т 148. — С. 857–877. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029617303140>. (дата обращения: 20.03.2023).
8. **Lonetti, P.** Dynamic Behavior of Tied-Arch Bridges under the Action of Moving Loads / P. Lonetti, A. Pascuzzo, A. D’Amico. — DOI <https://doi.org/10.1155/2016/2749720> // Mathematical Problems in Engineering. — 2016. — Т 2016. — С. 2749720. — URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2016/2749720/>. (дата обращения: 02.04.2023).
9. **Bettinelli, L.** Comparison of different approaches for considering vehicle-bridge-interaction in dynamic calculations of high-speed railway bridges / L. Bettinelli, B. von der Thannen, A. Stollwitzer, J. Fink. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114897> // Engineering Structures. — 2022. — Т 270. — С. 114897. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622009750>. (дата обращения: 02.04.2023).
10. **König, P.** An efficient model for the dynamic vehicle-track-bridge-soil interaction system / P. König, P. Salcher, C. Adam. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113769> // Engineering Structures. — 2022. — Т 253. — С. 113769. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621018460>. (дата обращения: 02.04.2023).
11. **Xu, L.** A three-dimensional model for train-track-bridge dynamic interactions with hypothesis of wheel-rail rigid contact / L. Xu, W. Zhai. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.025> // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2019. — Т 132. — С. 471–489. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327019302626>. (дата обращения: 02.04.2023).
12. **Wang, S.-M.** Modelling dynamic interaction of maglev train-controller-rail-bridge system by vector mechanics / S.-M. Wang, Y.-Q. Ni, Y.-G. Sun, Y. Lu, Y.-F. Duan. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117023> // Journal of Sound and Vibration. — 2022. — Т 533. — С. 117023. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X22002425>. (дата обращения: 02.04.2023).

13. **Montenegro, P.A.** Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds — Part I: Running safety / P.A. Montenegro, H. Carvalho, M. Ortega [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104974> // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2022. — Т 224. — С. 104974. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610522000794>. (дата обращения: 02.04.2023).
14. **Borjigin, S.** Nonlinear dynamic response analysis of vehicle-bridge interactive system under strong earthquakes / S. Borjigin, C. W. Kim, K. C. Chang, K. Sugiura. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.014> // Engineering Structures. — 2018. — Т 176. — С. 500–521. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029618304760>. (дата обращения: 12.04.2023).
15. **Hu, Y.** Seismic response of high-speed railway bridge-track system considering unequal-height pier configurations / Y. Hu, W. Guo. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106250> // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2020. — Т 137. — С. 106250. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726120302815>. (дата обращения: 12.04.2023).
16. **Локтев, А.А.** Сейсмическое поведение главной балки моста с вязкоупругими демпферами / А.А. Локтев, А. Баракат, Д. Кбейли. — DOI <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.7.809-818> // Вестник МГСУ. — 2021. — Т 16. — № 7. — С. 809–818. — URL: <http://vestnikmgisu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2021/7/809-818>. (дата обращения: 12.04.2023).
17. **Lou, P.** Finite element analysis for train-track-bridge interaction system / P. Lou. — DOI <https://doi.org/10.1007/s00419-007-0122-4> // Archive of Applied Mechanics. — 2007. — Т 77. — № 10. — С. 707–728. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00419-007-0122-4>. (дата обращения: 12.04.2023).
18. **Xia, H.** Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways / H. Xia, N. Zhang, W. Guo. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54871-4>. — Гейтльберг Springer Berlin, 2017. — 580 с. — URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-54871-4>. (дата обращения: 12.04.2023).

Сведения об авторах:

Баракат Ахмад — аспирант кафедры «Строительной и теоретической механики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия, e-mail: ahmadbarakat9933@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-024X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1103455

Статья получена: 27.05.2023. Принята к публикации: 11.09.2023. Опубликовано онлайн: 18.09.2023.

REFERENCES

1. Didenko L., Smirnov V. Dynamic Interaction of the “Bridge-Train” System on High-Speed Railways. *E3S Web Conf.* 2020;157: 6015. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706015>.
2. Olmos J.M., Astiz M.A. Analysis of the lateral dynamic response of high pier viaducts under high-speed train travel. *Engineering Structures.* 2013;56: 1384–1401. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.012>.
3. Kadisov G.M., Chernyshov V.V. Finite-Element (Fe) Modelling of Bridge Dynamics from Exposure to Moving Load. *Magazine of Civil Engineering.* 2013; (9): 56–63. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.44.7>.
4. Yang H., Wu N., Zhang W. et al. Dynamic Response of Spatial Train-Track-Bridge Interaction System Due to Unsupported Track Using Virtual Work Principle. *Applied Sciences.* 2022; 12(12): 6156. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app12126156>.
5. Yu H., Wang B., Li Y., Gao Z. A two-step framework for stochastic dynamic analysis of uncertain vehicle-bridge system subjected to random track irregularity. *Computers & Structures.* 2021; 253: 106583. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2021.106583>.

6. Stollwitzer A., Bettinelli L., Fink J. The longitudinal track-bridge interaction of ballasted track in railway bridges: Experimental determination of dynamic stiffness and damping characteristics. *Engineering Structures*. 2023; 274: 115115. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115115>.
7. Fedorova M., Sivaselvan M.V. An algorithm for dynamic vehicle-track-structure interaction analysis for high-speed trains. *Engineering Structures*. 2017; 148: 857–877. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.065>.
8. Lonetti P., Pascuzzo A., Davanzo A. Dynamic Behavior of Tied-Arch Bridges under the Action of Moving Loads. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016; 2016: 2749720. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/2749720>.
9. Bettinelli L., von der Thannen B., Stollwitzer A., Fink J. Comparison of different approaches for considering vehicle-bridge-interaction in dynamic calculations of high-speed railway bridges. *Engineering Structures*. 2022; 270: 114897. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114897>.
10. König P., Salcher P., Adam C. An efficient model for the dynamic vehicle-track-bridge-soil interaction system. *Engineering Structures*. 2022; 253: 113769. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113769>.
11. Xu L., Zhai W. A three-dimensional model for train-track-bridge dynamic interaction with hypothesis of wheel-rail rigid contact. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019; 132: 471–489. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.025>.
12. Wang S.-M., Ni Y.-Q., Sun Y.-G., Lu Y., Duan Y.-F. Modelling dynamic interaction of maglev train-controller-rail-bridge system by vector mechanics. *Journal of Sound and Vibration*. 2022; 533: 117023. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117023>.
13. Montenegro P.A., Carvalho H., Ortega M. et al. Impact of the train-track-bridge system characteristics in the runnability of high-speed trains against crosswinds — Part I: Running safety. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022; 224: 104974. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104974>.
14. Borjigin S., Kim C.W., Chang K.C., Sugiura K. Nonlinear dynamic response analysis of vehicle-bridge interactive system under strong earthquakes. *Engineering Structures*. 2018; 176: 500–521. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.014>.
15. Hu Y., Guo W. Seismic response of high-speed railway bridge-track system considering unequal-height pier configurations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020; 137: 106250. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106250>.
16. Loktev A.A., Barakat A., Qatibi J. Seismic Behavior of The Main Girder of a Bridge with Viscoelastic Dampers. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(7): 809–818. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.7.809-818>.
17. Lou P. Finite element analysis for train-track-bridge interaction system. *Archive of Applied Mechanics*. 2007; 77(10): 707–728. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00419-007-0122-4>.
18. Xia H., Chang N., Guo W. Dynamic Interaction of Train-Bridge Systems in High-Speed Railways. Heidelberg: Springer Berlin; 2017. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-54871-4> (accessed 12th April 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54871-4>.

Information about the authors:

Ahmad Barakat — Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, e-mail: ahmadbarakat9992@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1239-824X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1103455

Submitted: 27th May 2023. Revised: 11th September 2023. Published online: 18th September 2023.