

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 531.3:656.022.846:624.19

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>

Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа



Андрей БАТАЕВ



Ян ВАТУЛИН



Владимир КАВКАЗСКИЙ

Андрей Сергеевич Ватаев¹, Ян Семенович Ватулин², Владимир Николаевич Кавказский³

^{1, 2, 3} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия.

✉ ³ Kavkazskiy_yn@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается задача оценки степени влияния вибрационного воздействия высокоскоростного подвижного состава на несущие элементы заглубленного водопропускного сооружения тоннельного типа. В частности, рассмотрен процесс формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой под воздействием движущейся, динамической нагрузки, с наличием двукратного фазового перехода между слоями грунта с различными физико-механическими свойствами. Численное моделирование осуществлено в среде Comsol в нестационарной постановке с по-

строением систем дифференциальных уравнений движения и последующим решением с применением метода конечных элементов. Установлен волновой характер распределения деформаций и ускорений в толще грунта, с тенденцией резкого снижения интенсивности энергетических процессов в пределах глубин заложения 5–7 м. Для коллекторов значительной толщины обделки характерна работа конструкции коллектора преимущественно на изгиб, для конструкции с меньшей толщиной стенки и большим диаметром тоннеля характерны высокие продольные и вертикальные нагрузки.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, сооружения тоннельного типа, напряженно-деформированное состояние, динамическое исследование, распределение модальных (эффективных) долей массы конструкции.

Для цитирования: Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Кавказский В. Н. Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные сооружения тоннельного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-9>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе строительства и реконструкции высокоскоростных магистралей существенной проблемой является оценка эксплуатационной надежности сооружения на участках пересечения путей с заглубленными объектами тоннельного типа.

Совершенствование проектных решений требует системного подхода к анализу и обобщению данных об эксплуатационной надежности элементов сооружений с учетом как техногенных, так и природных факторов внешнего воздействия.

Непосредственный сбор данных о текущем состоянии инженерных сооружений крайне трудоемок и сопряжен с риском безопасности нахождения экспертов в тоннеле. Решением вопроса может быть применение численного эксперимента на основе математического моделирования.

Моделирование режимов нагружения тоннельных сооружений выполнено в рамках комплексного изучения инженерно-геологических условий и получения материалов, необходимых для разработки проектной документации реконструкции технологической площадки ст. «Обухово», г. Санкт-Петербург, на участках вблизи Фермского, Южного шоссе и Обводного канала.

В целом статья является представлением результатов исследования реконструируемых технологических площадок ряда станционных участков, расположенных на территории города Санкт-Петербург. Устройство земляного полотна, конструкции инфраструктурных элементов соответствуют реальному прототипу. В п. 4 Технического регламента Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011, с изменениями на 14 сентября 2021 года), а также в ГОСТ Р 55056–2012 «Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения» (статья 39) дается определение высокоскоростного подвижного состава, а именно: «высокоскоростной железнодорожный подвижной состав» – железнодорожный подвижной состав, состоящий из моторных и немоторных вагонов и предназначенный для перевозки пассажиров и (или) багажа, а также почтовых отправок со скоростью более 200 км/ч.». Авторы руководствовались указанным определением.

Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния несущих элементов заглубленных сооружений тоннельного типа под воздействием высокоскоростного подвижного состава (ВСПС) на основе методик моделирования методом конечного элемента.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Движение высокоскоростного транспорта является фактором техногенной сейсмичности, при котором формируется направленное периодическое механическое смещение подстилающей среды под верхним строением пути, при колебательном воздействии на него со стороны движущегося подвижного состава. В данном динамическом исследовании основное внимание уделяется усилиям, вызванным взаимосвязью между поступательными и крутильными колебаниями, возникающими за счет наличия эксцентриситета между центрами массы и жесткости сооружения.

Под исследуемым сооружением в настоящей статье понимается тоннельное сооружение – коллектор. Основное внимание в статье уделяется процессу динамического нагружения коллектора. При этом элементы верхнего строения пути редуцированы, – заменены эквивалентом.

В отношении коллектора следует обратить внимание на особенности конструктивного исполнения сечений, а также свойства материалов составных элементов, которые определяют соответствующий модуль Юнга и момент инерции текущего сечения. Формирующиеся характерные перемещения при косом изгибе определяют плоскость, расположенную перпендикулярно нейтральной линии сечения, по которой будет перемещаться центр тяжести сечения относительно (т.е. с эксцентриситетом) этой нейтральной линии¹ (см. далее в тексте рис. 2).

Функциональная математическая модель объекта представляет собой некоторый «эквивалент», состоящий из соотношений, связывающих между собой фазовые переменные, т.е. внутренние, внешние и выходные параметры системы. Практическая реализация модели выполнена на основе метода конечных

¹ Белорусско-российский университет. Учебные материалы. Сопротивление материалов. [Электронный ресурс]: http://cdo.bru.by/course/distan/PGS/sopromat_6sem_pgsdz/Fail/lekcher_11.pdf.



элементов, позволяющего формализовать в математической форме структуру объекта, геометрию компонентов, условия и законы их взаимодействия между собой и с окружающей средой. Данное определение используется в литературе, в частности в².

В настоящей работе рассмотрено численное моделирование в среде Comsol в нестационарной постановке: кинематическое и динамическое исследование с построением систем дифференциальных уравнений движения с последующим решением, а также анализ напряженно-деформированного состояния объекта с применением метода конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Любая обобщенная цифровая модель объекта исследования редуцирована (упрощена) в описательном смысле относительно реального прототипа. В данном случае объект, инициирующий силовое воздействие (подвижной состав), а также передаточный элемент (устройство верхнего строения пути) с целью снижения размерности задачи заменены эквивалентом в виде излучателя механического возбуждения, представленного как след (отпечаток) рельсошпальной решетки на дневной поверхности массива породы, к которому приложена динамическая поездная нагрузка³.

При прохождении фронта волны через слои массива породы с разной акустической жесткостью упругие волны меняют свое направление, возникают явления отражения и преломления волн³, в результате чего исследуемый объект – коллектор – подвергается механическому воздействию энергии упругой волны.

Данный факт подтверждает конфигурация эпюры векторного представления распространения фронта упругой волны (см. далее в тексте рис. 9).

Рассматриваемый объект водопропускного сооружения представляет собой двухкомпонентный тоннель, армированный железобетонной рубашкой, с железобетонным

лотком и торкретом свода, находящийся на глубине 11–7,46 м от дневной поверхности массива грунта.

Массив состоит из балластного слоя пути и грунта. На дневной поверхности массива находится рельсошпальная решетка, которая представлена двумя балками фасонного профиля (рельсами), опертыми на шпалы с эпюрой 1840 шт./км. Рельсошпальная решетка нагружена сосредоточенными силами, расположенными в точках контакта поверхности катания головки рельса и обода колес тележек движущегося подвижного состава.

К особенностям рассматриваемой задачи следует отнести факт формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой под воздействием движущейся, динамически изменяющейся во времени нагрузки, с наличием двукратного фазового перехода между слоями грунта с различными физико-механическими свойствами.

Для оценки нагруженности свода водопропускного сооружения необходимо установить механизм формирования условий взаимодействия между подшпальным основанием и верхним строением пути, с учетом динамической нагрузки от подвижного состава, условий передачи динамических нагрузок между балластным слоем и грунтом, и грунта с элементами тоннеля.

С этой целью необходимо реализовать следующий алгоритм:

1. Составить расчетную схему для определения изгиба кровли водопропускного тоннеля с помощью конечных элементов, используя подходы теории упругости. Сложность аналитического решения заключается в том, что объект представляет собой систему взаимодействующих между собой сред с различными упруго-пластическими свойствами, а также динамическим режимом нагружения.

2. Определить механизм формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемого рельсошпальной решеткой при воздействии динамической нагрузки, возникающей при движении высокоскоростного состава типа «Сапсан» (VelaroRus).

3. Установить механизм передачи направленного импульса механических колебаний в дискретной среде балластного слоя в подрельсовой зоне, грунте и кровле тоннельного сооружения.

² Шмитько Е. И. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий: Учеб. пособие: Т. 1 (вопросы теории). – Воронеж, Воронеж. гос. арх. – строит. ун-т., 2009. – 348 с. С. 50.

³ Основание – принцип Гюйгенса: каждая точка среды, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой волны излучения энергии колебаний в окружающую среду.

4. Построить векторную поверхность зависимости распределения давления во времени в поперечном сечении системы «балластный слой–грунт–тоннель».

5. Определить значения продольного изгиба кровли тоннельного сооружения.

Кинематическая модель подвижного состава (высокоскоростного пассажирского поезда VelaroRUS (ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан») и грузового электровоза (ЭС10) представляет собой сплотку редуцированных массогабаритных моделей ходовых тележек подвижного состава. В зависимости от типа локомотива и скорости движения среднее значение вертикальной нагрузки колеса на рельс принято согласно требованиям Правил расчета пути, ГОСТ Р 55513–2013 «Локомотивы».

Функциональная зависимость нагружающего усилия верхнего строения пути получена в результате кинематического моделирования колебательного процесса надрессорной части подвижного состава с учетом условий контактирования обода колеса с поверхностью катания головки рельса [1].

С целью адекватного описания характера опирания рельсо-шпальной решетки необходимо учитывать характеристики отпора постели шпал. Зависимость давления под постелью шпалы от параметров верхнего строения пути изучали М. Ф. Вериго [2], А. Н. Яшнов [3], М. А. Чернышев [4], Г. М. Шахуянец [5]. По рекомендациям [5] осадка за счет деформаций железобетонных шпал и креплений принимается 5–25 % от общей осадки рельса, осадка за счет деформаций балластного слоя 75–95 %. По известным значениям $E_{по}$ модуль упругости балластного слоя $E_{б}$ находится в интервале 50...400 МПа [3].

Распределение давления в балластном слое с учетом неравномерности его передачи через шпалы вдоль и поперек оси пути, определяется с помощью решения задачи Буссинеска. Для балласта возможно применение понятия «однородного грунта» (С. Н. Попов [6]). Угол передачи давления в щебне фракции 25–60 мм, что соответствует ГОСТ 7392-2014, составляет 45°–50°, что позволяет применять при расчете давления в балласте формулы механики сплошной среды и, как следствие, метод конечных элементов [4; 5; 7].

Рельс рассматривается как протяженная балка Тимошенко, испытывающая деформации сдвига. Жесткость связей в продольном

направлении оси пути 250 МН/м, в поперечном направлении оси пути – 140 МН/м. Жесткость связей на сжатие – 110 МН/м (Huan Feng [8]).

Моделирование контакта шпал с балластом и балласта с грунтом осуществлено с помощью упругих связей, позволяющих балласту «скользить» по поверхности земляного полотна, шпалы при этом имеют одностороннюю связь с поверхностью балласта. Уточненное моделирование балластного слоя осуществлено с помощью упругих связей (элемент типа «spring»), соединяющих шпалы и балласт.

Рельсы и шпалы объединены по смежным узлам в области подкладок упругими связями, жесткость которых позволяет смещаться рельсу относительно шпал. Продольная жесткость упругих связей «рельс–шпала» при железобетонных шпалах принята по данным экспериментальных исследований [9] креплений КБ как $S_x = 8900$ кН/мм при нормативном уровне закрутки болтов.

Деформативные характеристики объемных конечных элементов, используемых при моделировании балластного слоя, определены в работах С. В. Ефимова [10], А. Н. Яшнова [3], В. ДеКорте (W. DeCorte) и Ф. Ван Богэрта (Ph. Van Bogaert) [11].

Постановка задачи

Модель участка поверхности представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами 60 x 60 или 30 x 30 метров и высотой 15 м. С целью исключения влияния краевых эффектов геометрические размеры расчетного массива грунта пятикратно превышают размеры поперечного сечения тоннельного сооружения. По оси параллелепипеда расположена модель насыпи в виде прямоугольника высотой 0,4 м. Железнодорожный путь представлен в виде упрощенной модели, в которой отсутствует детализированное отображение рельса и шпалы. Размеры подошвы шпалы 2,7 x 0,3 м. Высота рельса соответствует типу Р75. Расстояние между осями шпал (0,54 м) соответствует эпюре 1840 шт./км. Коллектор рассматривается в виде цилиндра с наружным диаметром 2094 мм и внутренним – 1500 мм. Поперечное сечение лотка определяется в соответствии с технической документацией заказчика. Глубина заложения тоннеля варьируется в соответствии с техническим заданием и лежит в диапазоне от 7,46 (участок вблизи



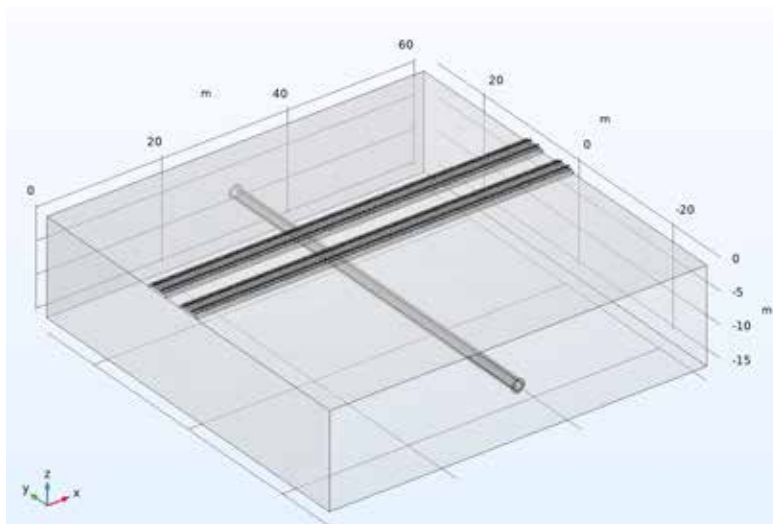


Рис. 1. Общий вид модели [разработана авторами].

Южного шоссе) до 11 метров (участок вблизи Фермского шоссе) от дневной поверхности. При моделировании колебательных процессов рассмотрены два пути. Первый путь проложен вдоль оси симметрии модели и параллелен оси X . Второй проходит параллельно первому. Расстояние между осями путей 6500 мм.

Рассматриваются случаи прохождения ВСПС по главному пути с нахождением на соседнем пути грузового поезда, а также при свободном пути.

На рис. 1 приведен общий вид расчетной модели пересечения путей и коллектора.

При моделировании приняты следующие упрощения и допущения:

1. Грунт, в котором расположен коллектор, представляет собой изотропную среду с неизменными параметрами. Слоистая структура не учитывается. Свойства грунта описываются с помощью модели Мора–Кулона со следующими параметрами: плотность грунта 1850 кг/м^3 , модуль Юнга 20 МПа , коэффициент Пуассона $0,27$, удельное сцепление 29 кПа , угол внутреннего трения 18° [12].

2. Балласт является изотропной средой, свойства которой описываются с помощью модели Мора–Кулона со следующими параметрами: плотность грунта 1850 кг/м^3 , модуль Юнга 18 МПа , коэффициент Пуассона $0,3$, удельное сцепление 1 кПа , угол внутреннего трения 15° [6].

3. Бетон коллектора и шпал рассматривается как эластичный линейный материал

с плотностью 2300 кг/м^3 и упругими свойствами, представленными в табл. 1.

4. Пустоты между поверхностью коллектора и грунтом, а также шпалами и балластом отсутствуют.

5. Форма поперечного сечения рельса и шпал оказывает пренебрежимо малое влияние на колебательные процессы и распределение напряжений в толще грунта и объеме коллектора.

6. Упругие свойства рельсового крепления моделируются с помощью тонкого упругого слоя, расположенного в зоне контакта поверхности шпалы и рельса. Жесткость рельсового крепления соответствует свойствам крепления типа APC-4 [4; 10; 13], а именно: по осям X и Y (горизонтальное перемещение) $346 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, по оси Z (вертикальное перемещение) $37 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$. Данный тип крепления был выбран по причине его применения на высокоскоростных и высоконагруженных участках.

Статический расчет напряженно-деформированного состояния коллектора

В качестве предварительной оценки несущей способности элементов конструкции определены максимальные значения напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z (см. табл. 1) от воздействия статической нагрузки.

Анализ результатов показывает, что максимальные значения напряжения характерны для участка коллектора, расположенного вблизи Южного шоссе, что объясняется ма-

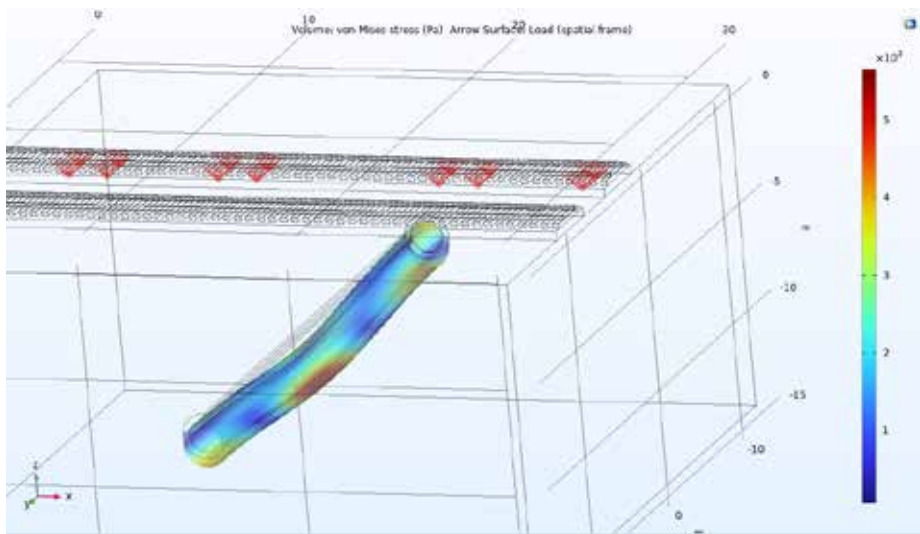


Рис. 2. Результат расчета деформаций коллектора на участке вблизи Южного шоссе под действием статической поездной нагрузки. Масштаб деформаций увеличен для наглядности [выполнено авторами].

лой глубиной заложения коллектора (7,46 м). Результат расчета деформаций коллектора для указанного участка представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что максимальные напряжения соответствуют растяжению нижней поверхности коллектора.

Полученные значения напряжений и деформаций коллектора от поездных нагрузок в статическом режиме незначительны для всех участков и не оказывают значительного влияния на состояние конструкции.

Динамический расчет напряженно-деформированного состояния коллектора

Понятие динамического расчета является общеизвестным: «Расчет сооружения с учетом сил инерции и возникающих при этом колебаний называется динамическим расчетом»⁴.

⁴ Динамика транспортных сооружений: метод. указания / составители С. А. Галанский, Г. Р. Маеров. – Самара: СамГУПС, 2016. – 48 с.

Моделирование выполнено в среде программного обеспечения Comsol⁵ в нестационарной постановке. Параметры геометрической модели, сетки, а также граничные условия оставлены неизменными (соответствующими статическому расчету). Рассмотрен временной диапазон от нуля до двух секунд, что соответствует времени прохода трех вагонов поезда над коллектором [14]. Поезд движется над коллектором со скоростью 55 м/с. На пути 1 находится неподвижный грузовой электровоз. В качестве начальных условий при выполнении динамического расчета приняты результаты расчета статических деформаций [12; 15].

На рис. 3 приведен результат расчета деформаций балласта, коллектора и рельсового пути в момент времени 1,8 с. Рассмотренный

⁵ COMSOL Multiphysics v 6.0 Reference manual. ComsolInc, 2021, 1742 p. [Электронный ресурс]: https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf. Доступ 14.03.2023.

Таблица 1

Компоненты главного тензора максимальных напряжений при наличии поезда над коллектором, Па [выполнено авторами]

Участок	Ось X		Ось Y		Ось Z	
	работа на растяжение	работа на сжатие	работа на растяжение	работа на сжатие	работа на растяжение	работа на сжатие
Фермское шоссе	752	-890	2535	-2488	525	-1126
Южное шоссе	904	-1303	5489	-5499	1347	-1708
Обводный канал	3212	-3702	3398	-3358	2840	-3989



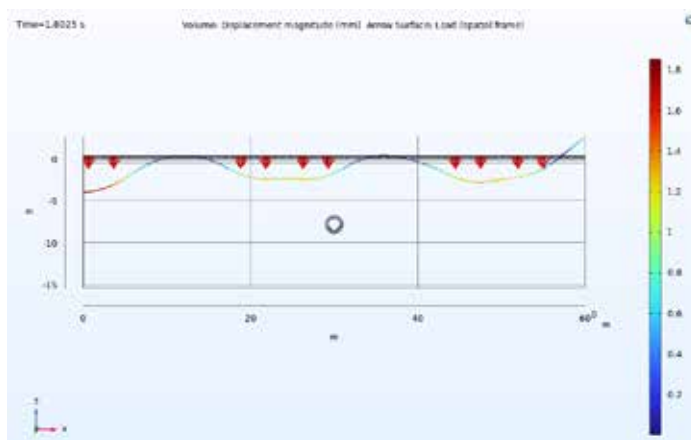


Рис. 3. Результат расчета деформаций балласта, коллектора и рельсового пути. Значения деформаций рельсов значительно увеличены по сравнению с реальными в целях наглядности [16] [выполнено авторами].

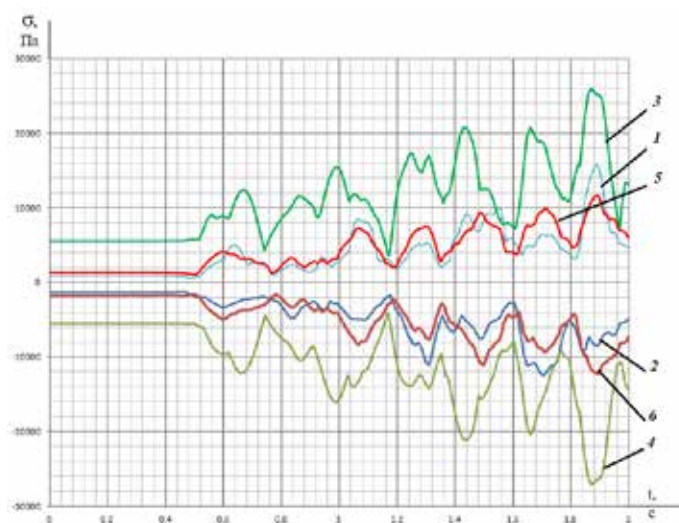


Рис. 4. Результаты расчета максимальных значений напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z при движении поезда по боковому пути со скоростью 55 м/с: 1 – работа на расширение вдоль оси X ; 2 – то же, но работа на сжатие; 3 – работа на расширение вдоль оси Y ; 4 – то же, но работа на сжатие; 5 – работа на расширение вдоль оси Z ; 6 – то же, но работа на сжатие [выполнено авторами].

момент времени соответствует максимальному значению деформации коллектора.

По аналогии выполнен расчет максимальных значений напряжений в бетоне коллектора по осям X , Y и Z для трех рассматриваемых участков коллектора, отличающихся формой поперечного сечения, диаметром и глубиной заложения. В качестве примера представлены результаты расчета для участка вблизи Южного шоссе (рис. 4).

Анализ полученных результатов выявил максимальные значения напряжения в бетонной обделке коллектора, амплитуда которых не превышает 45 кПа. Динамические нагруз-

ки на коллектор, обусловленные действием проходящих поездов, имеют явно выраженные гармонические составляющие с частотой порядка 2,5 Гц. Отметим, что для участков коллектора, имеющих значительную толщину, характерны более высокие значения (по сравнению с остальными компонентами) тензора напряжений по оси Y . Это указывает на то, что конструкция коллектора здесь работает на изгиб. При уменьшении толщины стенки и увеличении диаметра тоннеля, происходит снижение момента сопротивления изгибу, а значит возрастают продольные и вертикальные нагрузки (компоненты тензора по осям X и Z).

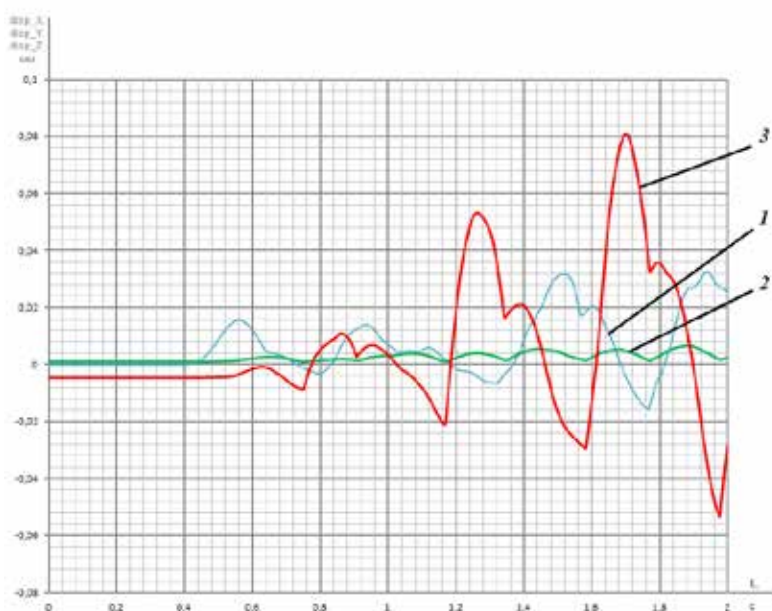


Рис. 5. Результат расчёта деформаций коллектора (перемещение вдоль оси X), рассчитанных на наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе [выполнено авторами].

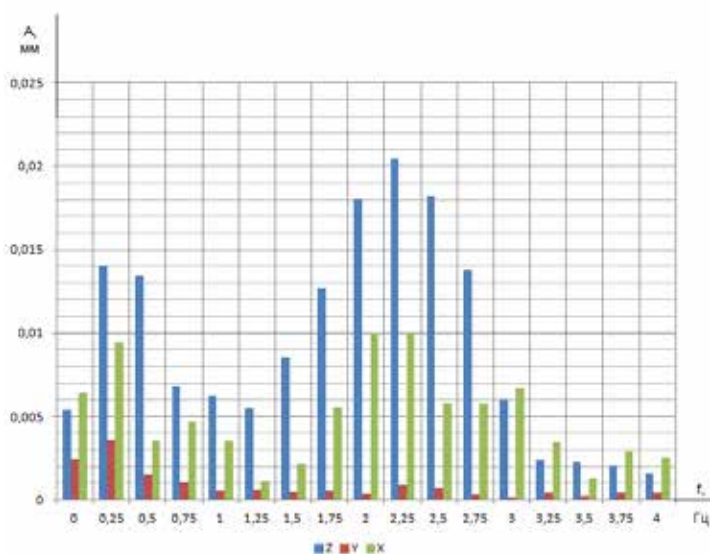


Рис. 6. Результаты спектрального анализа временных зависимостей деформации наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе по осям X, Y и Z [выполнено авторами].

Коллектор находится под воздействием возмущений от проходящего поезда и совершает колебания сложной формы, амплитуда которых не превышает 0,13 мм. В качестве примера на рис. 5 приведен результат расчета деформаций коллектора вдоль оси X, рассчитанных на наружной поверхности коллектора на участке вблизи Южного шоссе.

Колебания имеют сложную форму, причем в основном преобладают вертикальные коле-

бания (вдоль оси Z). Нарастание колебаний может свидетельствовать в том числе и о наличии резонансных явлений. Это обстоятельство требует выполнения частотного анализа и определения собственных частот конструкции.

Спектральный анализ временных зависимостей деформации наружной поверхности коллектора выполнен вдоль осей X, Y и Z (рис. 6).



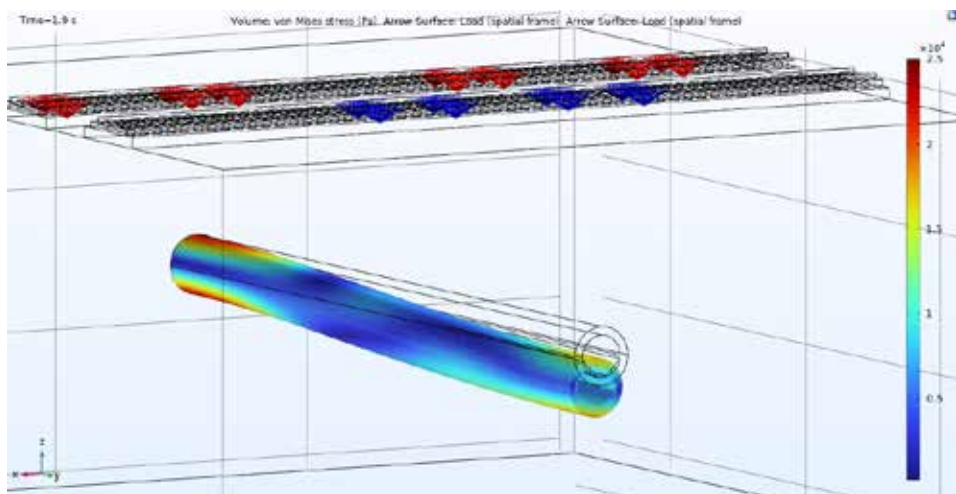


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние (по Мизесу) коллектора на участке вблизи Южного шоссе в момент времени (1,9 с), соответствующий максимальной деформации. Масштаб деформации значительно увеличен с целью наглядности. Нагрузка от неподвижного поезда показана красными стрелками, движущегося – синими [выполнено авторами].

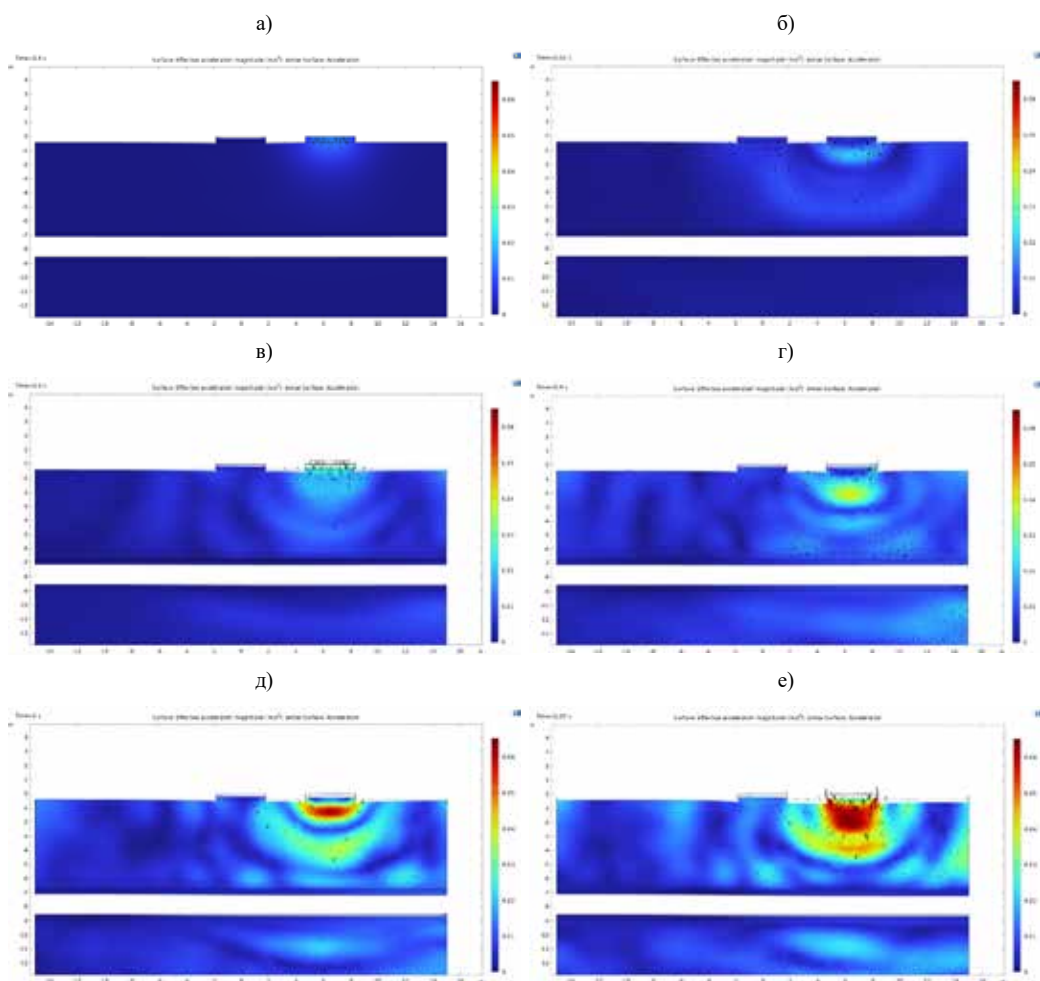


Рис. 8. Фазы поля распределения ускорений в толще грунта: а – в момент времени 0,4 с; б – в момент времени 0,51 с; в – в момент времени 0,6 с; г – в момент времени 0,9 с; д – в момент времени 1 с; е – в момент времени 1,07 с. Для наглядности масштаб деформации грунта увеличен в 2000 раз [выполнено авторами].

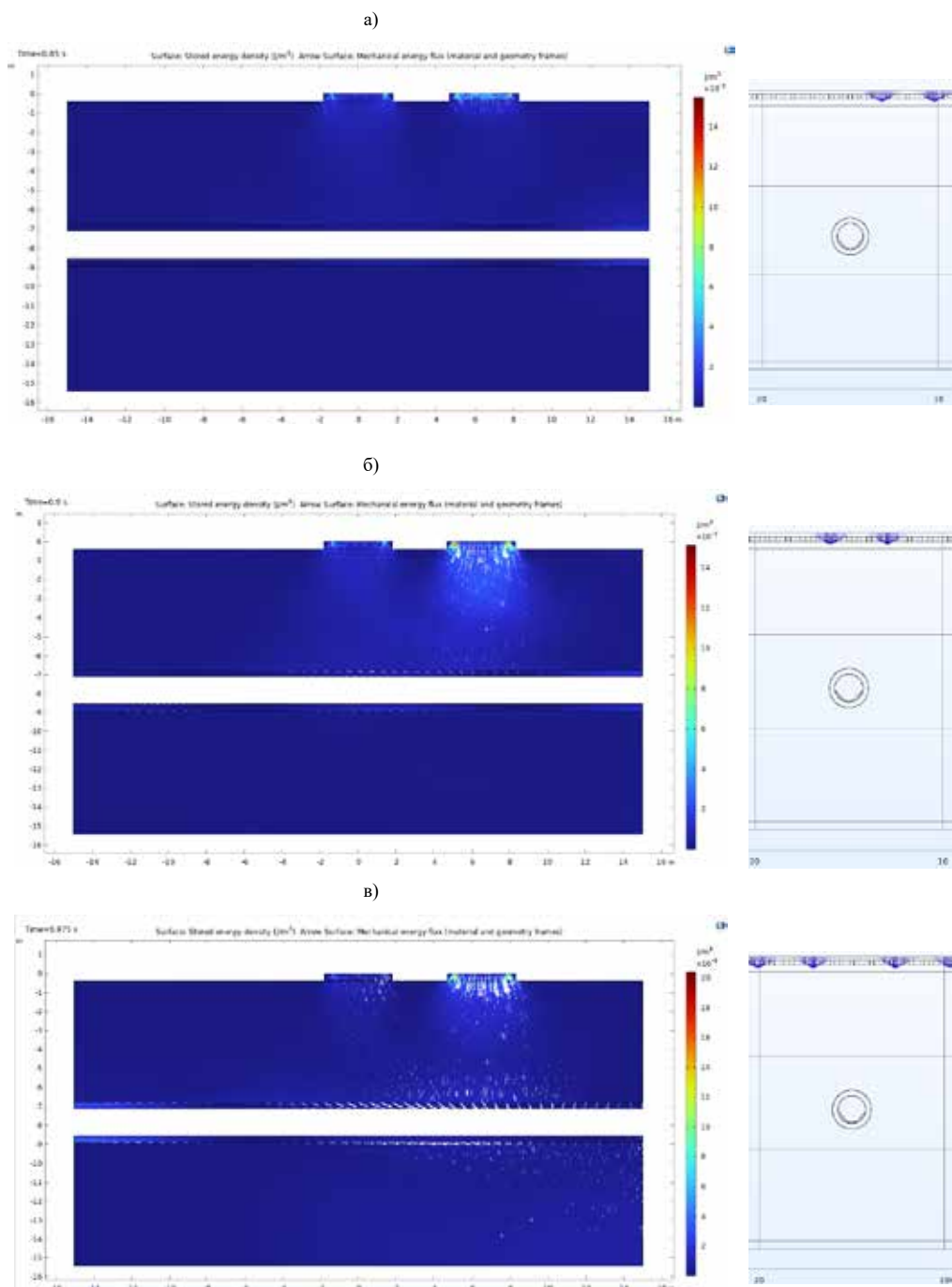


Рис. 9. Фазы поля распределения плотности энергии в толще грунта при проходе второй тележки головного вагона: а – в момент времени 0,85 с; б – в момент времени 0,9 с; в – в момент времени 0,975 с. Белыми стрелками показано направление потоков энергии [выполнено авторами].

Полученный спектр содержит два резонансных пика на частотах порядка 0,25 и 2,25 Гц по отведениям Y и Z, а по отведению X помимо указанных, выявлены два дополнительных пика на частотах 3 и 3,75 Гц.

Деформированное состояние коллектора, соответствующее моменту времени достижения максимальной деформации (1,9 с), представлено на рис. 7.

В целом результаты расчета показывают, что полученные значения деформаций участка кол-



Таблица 2

Сводная таблица значений массовых долей, участвующих в колебательном процессе на резонансных частотах, соответствующих амплитудных значений перемещений (мкм), и составляющих напряжений растяжение/сжатие на поверхности тоннеля, (МПа) [выполнено авторами]

Локализация	Параметр	X	Y	Z
<u>Вблизи Обводного канала</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,9493 Гц	8,59E-10	0,000566	0,79543
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,2184 Гц	0,556368	3,2E-10	1,08E-10
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,3156 Гц	3,79E-10	0,507095	8,24E-05
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,644884	0,618909	0,81044
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	46,7	46,7	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,042/–0,037	0,024/–0,024	0,037/–0,047
<u>Вблизи Южного шоссе</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,937 Гц	1,46E-10	0,000765	0,794426
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,213 Гц	0,551516	7,7E-11	5,57E-11
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,30 Гц	1,78E-10	0,504217	9,24E-05
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,6474	0,6241	0,8103
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	45,3	46,7	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,017/–0,009	0,027/–0,027	0,012/–0,011
<u>Вблизи Фермского шоссе</u>	Коэффициент массового участия, $m_{f,x}$, о. е. на частоте 1,9314 Гц	4,52E-10	0,000356	0,800222
	Коэффициент массового участия, $m_{f,y}$, о. е. на частоте 2,2158 Гц	0,551564	5,38E-10	5,64E-11
	Коэффициент массового участия, $m_{f,z}$, о. е. на частоте 2,3651 Гц	7,46E-10	0,460332	0,0001
	Суммарное значение массового участия, $\sum m_f$	0,650512	0,611397	0,812321
	Амплитудные значения перемещений при резонансных частотах (мкм)	45,3	48,3	45,3
	Значения составляющих напряжений растяжение/ сжатие на поверхности тоннеля, (МПа)	0,011/–0,017	0,016/ –0,011	0,009/–0,013

лектора, обусловленные действием поездных нагрузок незначительны, и не могут оказать существенного влияния на состояние конструкции.

Начальная стадия колебательного процесса грунта под воздействием смещений верхнего строения пути, соответствующая прохождению первой тележки над коллектором, отображена на рис. 8.

Установлен волновой характер распределения ускорений в толще грунта. Значение

ускорения значительно затухает по мере удаления от железнодорожного полотна. Максимальные значения ускорений в толще грунта обнаружены вблизи полотна в моменты времени, соответствующие проходу колеса над осью симметрии коллектора.

Результат расчета распределения удельной энергии системы представлен на рис. 9, здесь рассмотрен процесс, сопровождающий проход колеса над осью симметрии коллек-

тора. Справа показано положение нагрузки на рельс относительно оси коллектора.

Рассмотрены следующие моменты времени: 0,85 с – подход колесной пары второй тележки головного вагона; 0,9 с – ось симметрии второй тележки расположена над осью симметрии коллектора; 0,975 с – подход тележки второго вагона; 1,015 с – ось колесной пары первой тележки второго вагона находится над осью симметрии коллектора; 1,04 с – ось симметрии первой тележки второго вагона расположена над осью симметрии коллектора; 1,1 с – удаление первой тележки второго вагона от оси симметрии коллектора.

По результатам исследования распределения удельной энергии системы можно сделать вывод о тенденции резкого снижения интенсивности энергетических процессов для уровня глубин в пределах 5–7 м. Таким образом, влияние динамических поездных нагрузок и вибрации верхнего строения пути на рассматриваемый объект незначительно.

Расчет собственных частот колебательных процессов участков коллектора

Для оценки надежности сооружения, информационно-достаточную картину представляет собой распределение модальных (эффективных) долей массы конструкции, участвующих в колебательном процессе на резонансных частотах. Расчет производится в программе Comsol с помощью инструмента Eigenfrequency. В результате расчета определены массы, вовлеченные в колебательный процесс по отведениям X , Y и Z , $m_{\rho x}$, $m_{\rho y}$, $m_{\rho z}$ соответственно. Полученные значения были соотнесены с полной массой рассматриваемой колебательной системы.

Суммарные значения составляющих коэффициента массового участия элементов конструкции сооружения по отведениям базисного вектора (X , Y , Z) показывают достижение резонансных частот в пределах седьмой итерации (задействовано в колебательном процессе более 50–60 % массового участия конструкции [7]), что позволяет считать достигнутыми резонансные частоты, а результаты динамического исследования достоверными.

Относительные значения долей масс, участвующих в колебательном процессе для

соответствующих значений значения модальных частот представлены в сводной табл. 2.

ВЫВОДЫ

Моделирование напряженно-деформированного состояния коллектора под действием статических и динамических нагрузок от поездной нагрузки (с осевой нагрузкой 25 т) позволило установить волновой характер распределения деформаций и ускорений в толще грунта с выраженными гармоническими составляющими. Частотный спектр колебательного процесса в целом идентичен для всех участков коллектора и содержит два резонансных пика на частотах порядка 0,25 и 2,25 Гц по отведениям Y и Z , а по отведению X (по оси тоннеля) помимо указанных, выявлены два дополнительных пика на частотах 3 и 3,75 Гц. Частота возмущающих сил близка к резонансной, однако ввиду малости амплитуд колебаний, данное явление не представляет опасности.

Для участков коллектора, имеющих значительную толщину обделки, характерны более высокие значения компонентов тензора напряжений по оси Y (в пределах 45 кПа), что подтверждает факт работы конструкции коллектора преимущественно на изгиб. Для конструкции с меньшей толщиной стенки и большим диаметром тоннеля (соответственно, меньшим моментом сопротивления изгибу) характерны относительно высокие продольные и вертикальные нагрузки (компоненты по осям X и Z).

В результате исследования процесса распределения удельной энергии системы по массиву выявлена тенденция резкого снижения интенсивности энергетических процессов в пределах глубин 5–7 м.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чemezov Д. А. Гармонический анализ статически неопределимой рамы // Молодой ученый. – 2014. – № 12 (71). – С. 122–127. [Электронный ресурс]: <https://moluch.ru/archive/71/12203>. Доступ 14.03.2023.
2. Веригo М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / Под ред. М. Ф. Веригo. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с. [Электронный ресурс]: <https://lokomotiv.ru/zheleznodorozhnyy-puti/vzaimodeystvie-puti-i-sostava.html>. Доступ 14.03.2023.
3. Власов Г. М., Широков Ю. М., Яшнов А. Н. Методика и некоторые результаты экспериментальных исследований работы плиты балластного корыта железобетонных пролетных строений // Повышение надежности и эффективности работы ж. д. транспорта. Тезисы докладов. – Новосибирск: Новосибирский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1988. – С. 5–11.



4. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. – М.: Транспорт, 1967. – 235 с. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_4792595/. Доступ 14.03.2023.
5. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с. [Электронный ресурс]: <https://vtome.ru/knigi/tehnika/453305-zheleznodorozhnyj-put-1987.html>. Доступ 14.03.2023.
6. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1965. – 183 с. [Электронный ресурс]: <https://www.fractr.one/file/1469391/>. Доступ 14.03.2023.
7. Лайрд Д. Конечно-элементный анализ для всех. – Часть 2. [Электронный ресурс]: <http://sapr.ru/article/21944>. Доступ 14.03.2023.
8. Feng, H. 3D models of Railway Track for Dynamic Analysis. Master Degree Project. Stockholm, 2011. [Электронный ресурс]: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:467217/FULLTEXT01.pdf>. Доступ 14.03.2023.
9. Даренский А. Н., Витольберг В. Г. Сопротивление промежуточных скреплений КБ и КПП-5 перемещения рельсов в продольной плоскости // Сб. научных трудов ДонИЖТ. – 2008. – № 14. – С. 142–152. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/soprotivlenie-promezhutochnyh-skrepleniy-kb-i-kpp-5-peremescheniyam-relsov-v-prodolnoy-ploskosti/viewer>. Доступ 14.03.2023..
10. Ефимов С. В. Лабораторные исследования работы продольных бортов плиты балластного корыта железобетонных пролетных строений с ездой на балласте на действие горизонтальной нагрузки // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2016). – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2016. – С. 44–48. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28342638>. Доступ 14.03.2023.
11. De Corte, W., Van Bogaert, Ph. The use of continuous high-frequency strain gauge measurements for the assessment of the role of ballast in stress reduction on steel railway bridge decks. Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, Vol. 48, No. 6, pp. 352–356. DOI: 10.1784/insi.2006.48.6.352.
12. Suiker, A. S. J. The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks. Delft University Press, 2002, 236 p. ISBN 90-407-2307-9.
13. Омаров А. Д., Нусупбеков С. И. Оценка надежности рельсовых скреплений // Вестник Национальной инженерной академии РК. – 2008. – № 2 (28). С. 93–97. [Электронный ресурс]: http://www.elibrary.kz/download/zhurnal_st/st2049.pdf. Доступ 14.03.2023.
14. Bonifacio, C., Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R. Dynamic Behaviour of a Short Span Filler-Beam Railway Bridge under High Speed Traffic. In: J. Pombo, (Editor), Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 79, 2014. DOI: 10.4203/ccp.104.79.
15. Shih, Jou-Yi, Thompson, D., Zervos, A. Assessment of track-ground coupled vibration induced by high-speed trains. In: The 21st International Congress on Sound and Vibration, 13–17 July 2014, Beijing, China. [Электронный ресурс]: <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/29165>. Доступ 14.03.2023. ●

Информация об авторах:

Ватаев Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и теплотехники Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, avataev@yandex.ru.

Ватулин Ян Семенович – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, yaп-roos@yandex.ru.

Кавказский Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тоннелей и метрополитенов Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия, Kavkazskiy_vn@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 22.02.2023, одобрена после рецензирования 27.12.2023, принята к публикации 27.12.2023.

От редакции. Данная статья, представляющая, по мнению авторов, новый подход к постановке и решению заявленной проблемы, вызвала у рецензентов целый комплекс вопросов, часть из которых авторы уточнили, а по некоторым представили свои контраргументы. Редакция, понимая весьма дискуссионный характер содержания статьи, новизну и сложный характер поставленной в рамках заявленной темы проблемы, сочла тем не менее возможным представить ее на суд читателей в порядке открытия широкой дискуссии.

Отмечая практический и научный интерес, который представляют выводы авторов о волновом характере распределения деформаций и ускорений в толще грунта с выраженными гармоническими составляющими, рецензенты указали на возникающий при этом логический разрыв между формулировками задачи как оценки степени влияния вибрационного воздействия высокоскоростного подвижного состава на несущие элементы заглубленного водопропускного сооружения тоннельного типа, проблемой как оценкой эксплуатационной надежности сооружения и целью как анализом напряженно-деформированного состояния несущих элементов заглубленных сооружений и выводами. Редакция также отмечает определенное несоответствие между заявленной целью и вполне обоснованным частным выводом.

Авторы также отмечают отсутствие отмеченного рецензентами противоречия между заявленным анализом динамического воздействия и используемым в статье статическим анализом. Авторам известно, что при увеличении скорости движения увеличиваются динамические воздействия на путь и элементы инфраструктуры. Именно с этой целью выполнен статический расчет тоннельного сооружения, а также динамический расчет при движении скоростного поезда. По мнению авторов, результаты, приведенные в настоящей статье, как раз показывают характер изменения напряжений и деформаций в тоннельном сооружении в динамическом режиме, о чем свидетельствуют временные зависимости изменения компонентов тензора напряжений и максимальные значения величин деформаций; для сравнения приведены компоненты тензора напряжений в статическом режиме; четко выявлено, что в динамическом режиме нагрузки выше, чем в статическом.

В любом случае, по мнению редакции, только последующая дискуссия поможет сблизить возникшие при работе над статьей противоречивые мнения.