

# Оценка динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на эстакадные и мостовые сооружения на грунтах с пониженной несущей способностью



**А. А. Воробьев,**  
д-р техн. наук,  
заведующий кафедрой  
«Наземные транспортно-  
технологические ком-  
плексы» Петербургского  
государственного универ-  
ситета путей сообщения  
Императора Александра I  
(ПГУПС),



**Я. С. Ватулин,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
«Электротехника  
и теплоэнергетика»  
ПГУПС,



**А. С. Ватаев,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
«Наземные транспортно-  
технологические  
комплексы» ПГУПС



**Э. Ю. Чистяков,**  
старший преподаватель  
кафедры «Строительные  
материалы и технологии»  
ПГУПС

Обеспечение высокой провозной способности требует повышения скорости движения пассажирских поездов и внедрения высокоскоростного транспорта. Установление предельного значения волновой нагрузки при движении поезда по искусственным сооружениям, мостовым конструкциям и эстакадам является важной и одновременно очень сложной научно-технической задачей.

Движение высокоскоростного поезда является фактором техногенной сейсмичности, при котором из-за колебательных воздействий со стороны движущегося подвижного состава формируется направленное периодическое механическое смещение мостовой конструкции, ее опор и верхнего строения пути. Дополнительным фактором сейсмичности может выступать ударное воздействие на опоры, а также ветровая нагрузка на мостовую конструкцию и движущийся поезд. Сочетание данных воздействий, осложняющееся пониженной несущей способностью грунтов вследствие интенсивного обводнения, может существенно изменить характер колебаний надрессорного строения подвижного состава, распределение нагрузок на оси и в итоге привести к аварийной ситуации.

Таким образом, задача анализа воздействия вибрационных и волновых нагрузок от движущегося высокоскоростного подвижного состава на эстакады и мостовые конструкции, построенные на слабых грунтах, является актуальной. Ее решение возможно с помощью математического моделирования. Современные программные вычислительные комплексы способны выполнять расчеты на базе метода конечных элементов в стационарной и нестационарной постановке. В работе выполняется расчет напряженно-

деформированного состояния эстакады при наличии возмущающих воздействий от движущегося поезда<sup>1</sup>.

Ударное воздействие моделируется в виде усилий на поверхности опор как функции времени. Величина сил определяется на основе решения задачи гидроаэродинамики, решение которой выходит за рамки настоящей статьи.

К особенностям рассматриваемой задачи следует также отнести факт формирования направленного импульса механических колебаний, излучаемых со стороны железнодорожных путей, а также опор под воздействием движущейся, динамически изменяющейся во времени нагрузки со стороны поезда и набегающих волн, а также наличия фазового перехода между опорами и грунтом.

Для оценки особенностей нагружения эстакады необходимо установить механизмы формирования условий взаимодействия и передачи динамических нагрузок между верхним строением пути, подверженным действию динамических нагрузок от подвижного состава, опорами, подверженных действию ударных нагрузок, грунтом и телом эстакады. С этой целью необходимо реализовать следующий алгоритм:

<sup>1</sup> Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

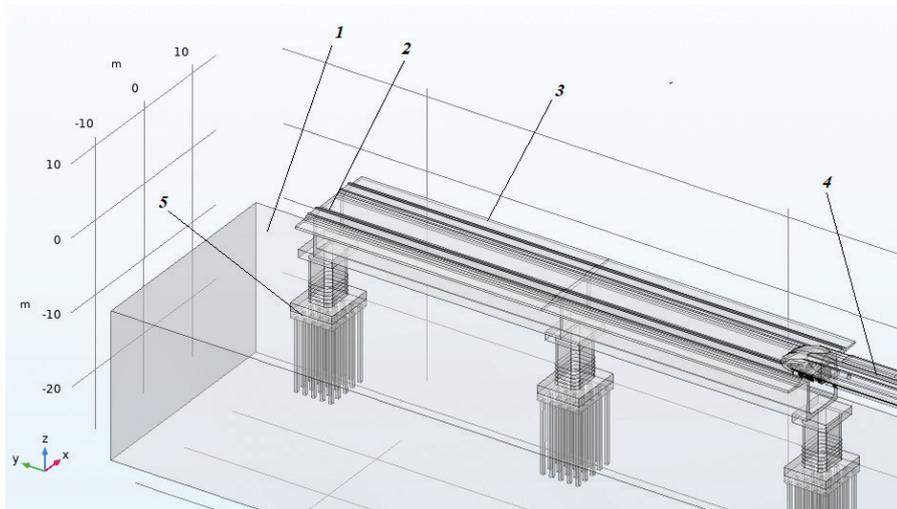


Рис. 1. Общий вид объекта исследования: 1 – грунт; 2 – рельсовый путь; 3 – эстакада; 4 – движущийся поезд; 5 – опора на свайном основании

• Составить расчетную схему для определения деформаций эстакады под воздействием нагрузок и движущегося поезда с помощью конечных элементов, используя подходы теории упругости. Сложность аналитического решения заключается в том, что объект представляет собой систему взаимодействующих между собой объектов с различными упругопластическими свойствами, а также динамическим режимом нагружения.

• Определить механизм формирования направленных импульсов механических колебаний, излучаемых верхним строением пути и опорами при воздействии динамической нагрузки, возникающей при движении высокоскоростного состава типа «Сапсан» (Velaro Rus), а также волновой нагрузки.

• Установить механизм передачи направленного импульса механических колебаний в грунте и по объему искусственного сооружения – эстакады.

• Построить векторную поверхность зависимости распределения давления во времени в характерных поперечных сечениях системы «грунт – эстакада».

• Определить значения продольного изгиба пролетов и опор эстакады.

### Математическая модель

Рассматриваемый объект (рис. 1) представляет собой участок эстакады с опорами, расположенными на участке береговой линии. Опоры заглублены в грунт на 7 м от поверхности. На эстакаде размещен рельсовый путь, представленный двумя фасонными балками, предназначенный для движения поездов с высокими скоростями. Границы целика, торцы эстакады и рельсов зафиксированы по торцам

подвижной роликовой опорой. Рельсы нагружены сосредоточенными силами, расположенными в точках контакта поверхности катания головки рельса и обода колес тележек движущегося подвижного состава.

Модель участка поверхности представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами 30×180 м и высотой 15 м. С целью исключения влияния концевых эффектов опора размещена на 30 м от края грунта в продольном направлении и на 21 м в поперечном.

Железнодорожный путь представлен в виде упрощенной модели, в которой отсутствует детализированное изображение рельса. Высота рельса соответствует типу Р75. Эстакада представлена в виде твердого тела, расположенного на опорах. Нижний срез опоры расположен на расстоянии 7 м от поверхности. Свайное основание не моделировалось. Модель предусматривает возможность исследования движения двух поездов в разных направлениях с различными скоростями.

При моделировании приняты следующие упрощения и допущения:

• Грунт, представляет собой изотропную среду с неизменными параметрами. Слоистая структура не учитывается. Свойства грунта описываются с помощью модели Мора – Кулона со следующими параметрами: плотность грунта 2300 кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга 1 МПа, коэффициент Пуассона 0,27, удельное сцепление 29 кПа, угол внутреннего трения 18°.

• Рельс является однородной изотропной средой со следующими параметрами: модуль Юнга 206 000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3, плотность 7800 кг/м<sup>3</sup>. Пластические деформации

не учитываются. Влияние рельсовых скреплений и наличие зазоров в стыках не рассматривалось.

• Бетон эстакады и опор принимает как эластичный линейный материал с плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>, модулем Юнга 30 000 МПа, коэффициентом Пуассона 0,25.

• Пустоты между поверхностью опор и грунтом, зазоры между опорами и пролетным строением, а также между элементами пролетного строения отсутствуют. Сооружение представляет собой сплошную монолитную конструкцию.

• Форма поперечного сечения рельса оказывает пренебрежимо малое влияние на колебательные процессы и распределение напряжений в толще грунта и объеме эстакады.

• Контакт между опорой и грунтом является полным. Проскальзывание поверхностей отсутствует.

• Путь расположен строго параллельно оси эстакады. Рельсы параллельны друг другу. Поверхности катания рельсов находятся на одном уровне.

### Начальные и граничные условия

Расчет напряженно-деформированного состояния коллектора выполнен для случая движения скоростного поезда с осевой нагрузкой 18 т и произведен в программном пакете Comsol Multiphysics. При построении сетки конечных элементов использовано разбиение на тетраэдры. Общее число узлов сетки 1 260 000.

При расчете использованы следующие граничные условия:

• Нижняя поверхность расчетной модели жестко закреплена. Использовано граничное условие fixed constraint.

• К боковым и торцевым поверхностям эстакады, торцевым граням рельсов, боковым поверхностям грунта применено граничное условие роликовой опоры.

• Распределение нагрузки на поверхность рельса от поезда как функция координаты имеет вид, представленный на рис. 2. Для расчета динамически изменяющейся нагрузки, обусловленной движением поезда, применено граничное условие Boundary load, где распределение нагрузки задано в виде функции вида:

$$f(t) = F_{max} (x - Vt + x_0),$$

где  $F_{max}$  – амплитуда нагрузки на ось;  
 $V$  – скорость поезда, м/с;  
 $t$  – значение времени, с;  
 $x$  – координата вдоль оси рельса, м;  
 $x_0$  – координата, м.

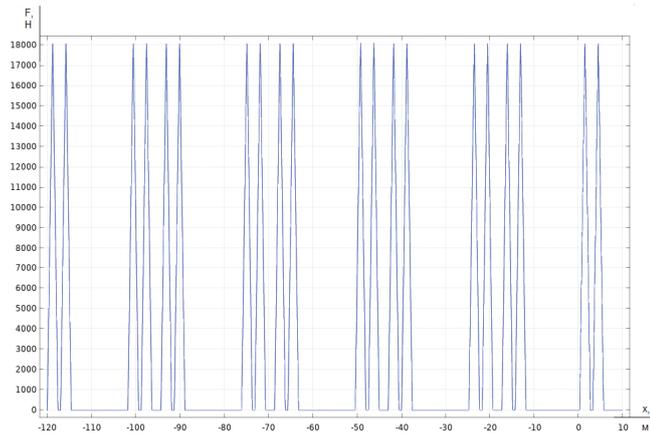


Рис. 2. Распределение нагрузки на поверхность рельса от поезда как функция координаты

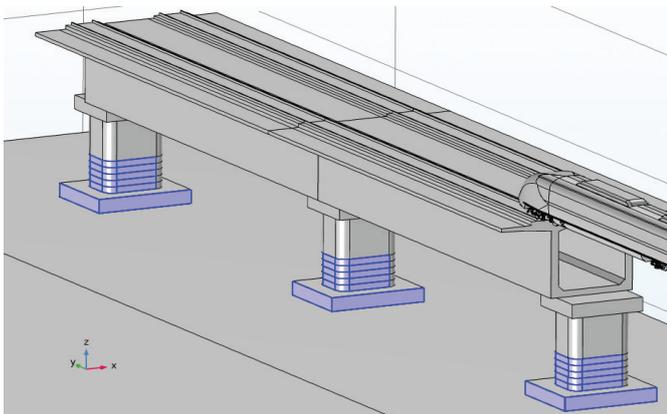


Рис. 3. Фрагмент расчетной области с границей, к которой приложено граничное условие Boundary Load для имитации нагрузки от набегающих волн

Функциональная зависимость нагружающего усилия верхнего строения пути от высокоскоростного поезда VelaroRUS (ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан») получена в результате кинематического моделирования колебательного процесса наддрессорной части подвижного состава с учетом условий контактирования обода колеса с поверхностью катания головки рельса [1–10] и представляет собой граничное условие вида Boundary load. При выполнении расчетов амплитуда нагрузки на ось  $F_{max}$  принималась равной 180 кН, а значение скорости  $V$  составило 56 м/с. Применение указанного граничного условия позволяет моделировать движение поезда путем перемещения нагрузки вдоль рельсового пути с заданной скоростью с течением времени. Более подробно применение данного подхода рассмотрено в [1].

Волновая нагрузка учитывается с помощью граничного условия Boundary Load. Область приложения нагрузки представлена на рис. 3.

Предполагается, что на опору набегают единичная волна, движущаяся в направлении оси X. Форма волны описывается с помощью функции Triangle. Амплитуда нагрузки одинакова для всех трех опор и составляет 10 кН; длительность волнового воздействия 1,2 с. Максимальная нагрузка соответствует 0,95 с расчетного времени, что соответствует подходу поезда к средней опоре эстакады.

Расчет выполнен в нестационарной постановке. Рассмотрен временной диапазон от 0 до 2 с, что соответствует времени захода четырех вагонов поезда на эстакаду со скоростью 55 м/с. За начало отсчета принято время наезда первой колесной пары на рельс эстакады.

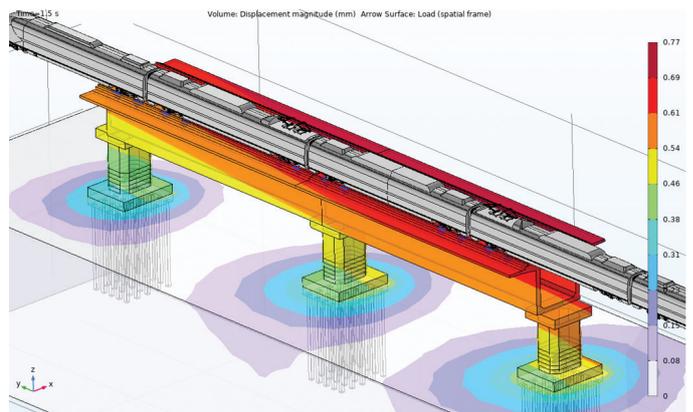
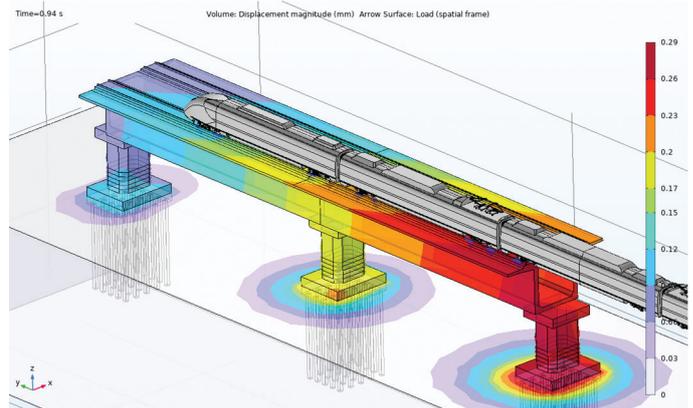
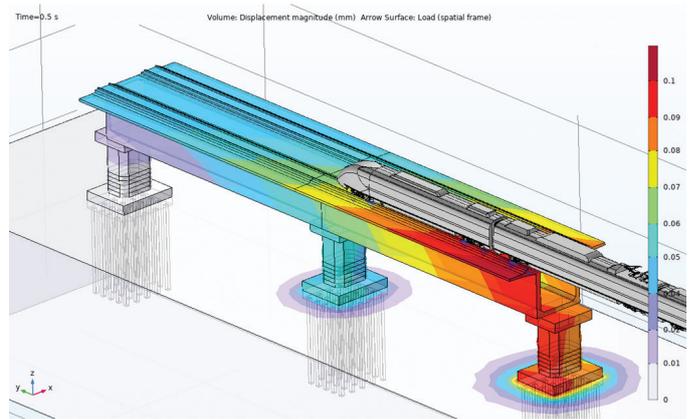


Рис. 4. Поле деформаций грунта и эстакады при воздействии нагрузок: а – от поезда после захода первого вагона на эстакаду (0,5 с); б – от поезда и максимуме нагрузок от набегающей волны (0,94 с); в – от поезда после захода первой тележки четвертого вагона на эстакаду (1,5 с)



Рис. 5. Распределение напряжений в грунте и эстакаде при воздействии нагрузок от поезда и набегающей волны (значение времени 0,94 с)

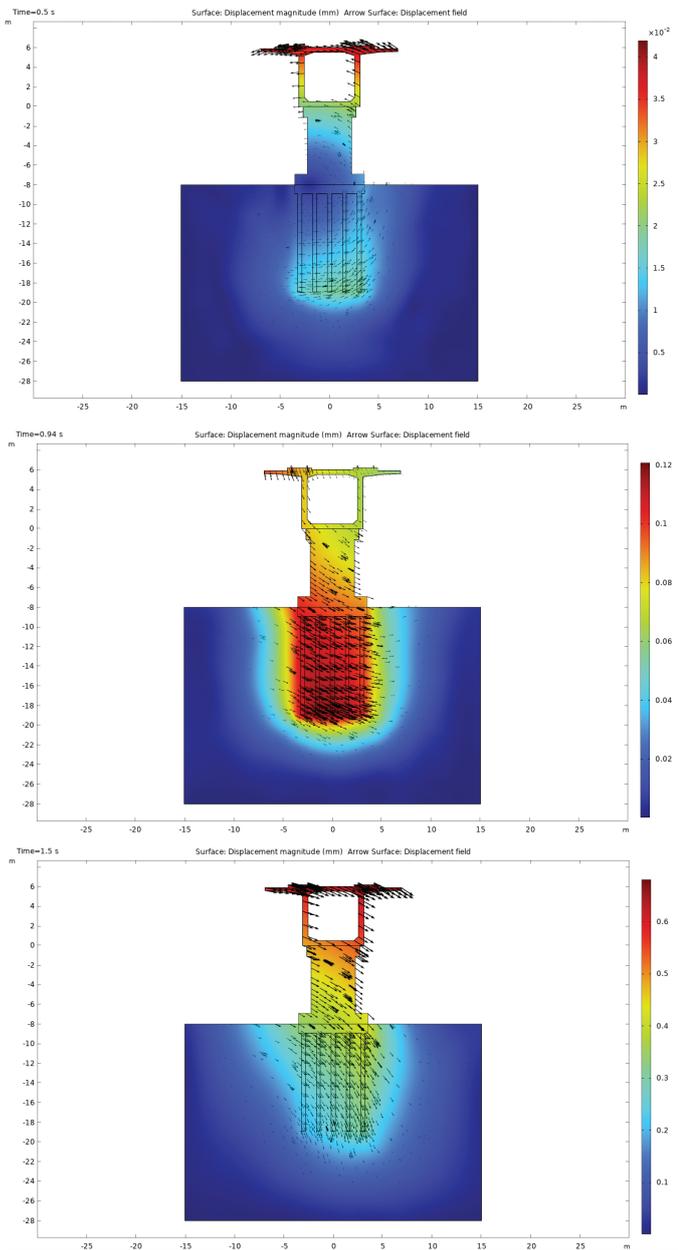


Рис. 6. Фазы поля распределения перемещений в толще грунта и эстакаде в момент времени, с: а – 0,5; б – 0,94; в – 1,5

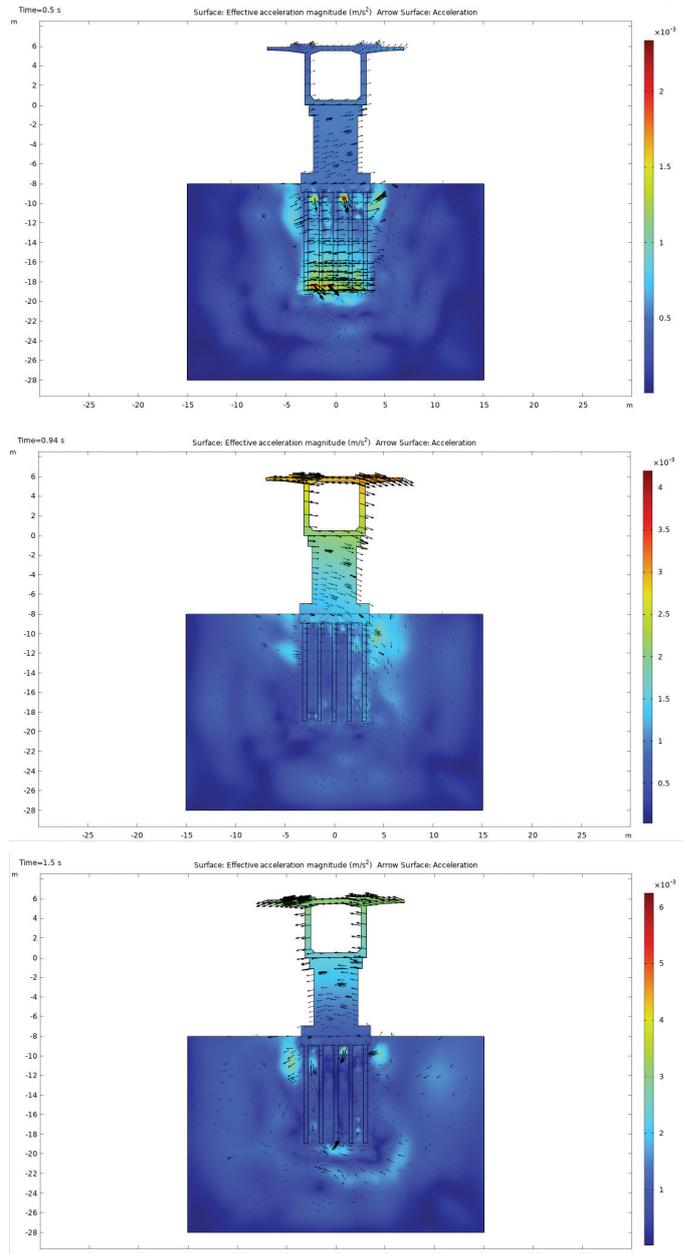


Рис. 7. Фазы поля распределения ускорений в эстакаде и толще грунта в момент времени, с: а – 0,5; б – 0,94; в – 1,5

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния эстакады при совместном действии динамических нагрузок от движущегося поезда и набегающих волн

Поля деформаций грунта и эстакады при воздействии нагрузок от поезда после захода первого вагона на эстакаду при значении времени 0,5, 0,94 и 1,5 с представлены на рис. 4.

Из полученных данных следует, что деформации эстакады носят волновой характер, значения деформаций в целом незначительны, а прочность сооружения достаточна.

На рис. 5 представлено распределение напряжений по объему эстакады и грунта в момент времени 0,94 с от момента въезда поезда на эстакаду, что соответствует

максимальной нагрузке на опоры от набегающей волны.

Выявлено, что распространение напряжений также носит волновой характер. По этой причине представляет интерес анализ процесса распространения энергии колебаний, возбуждаемых движущимся поездом в объеме эстакады и толще грунта. Динамика колебательного процесса отображена на рис. 6, 7. Ввиду малости деформаций деформированное состояние не показано.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что характер распространения деформаций и ускорений носит волновой характер. Величина деформации значительно (более чем в два раза) уменьшается с ростом глубины. Значение же ускорения значительно затухает по мере удаления от опоры.

Результат расчета распределения удельной энергии системы представлен на рис. 8. Масштаб деформации значительно увеличен для наглядности.

По результатам исследования распределения удельной энергии системы можно сделать вывод о тенденции резкого снижения интенсивности энергетических процессов, обусловленных наличием волновой и динамической нагрузок от движущегося поезда. Видно, что энергия от поезда с достаточной скоростью рассеивается в толще опоры и эстакады. Энергия волновых процессов передается на опору и затухает в направлении к основанию. Таким образом, при данном типе сооружения динамическая нагрузка от набегающих волн при заданной интенсивности оказывает

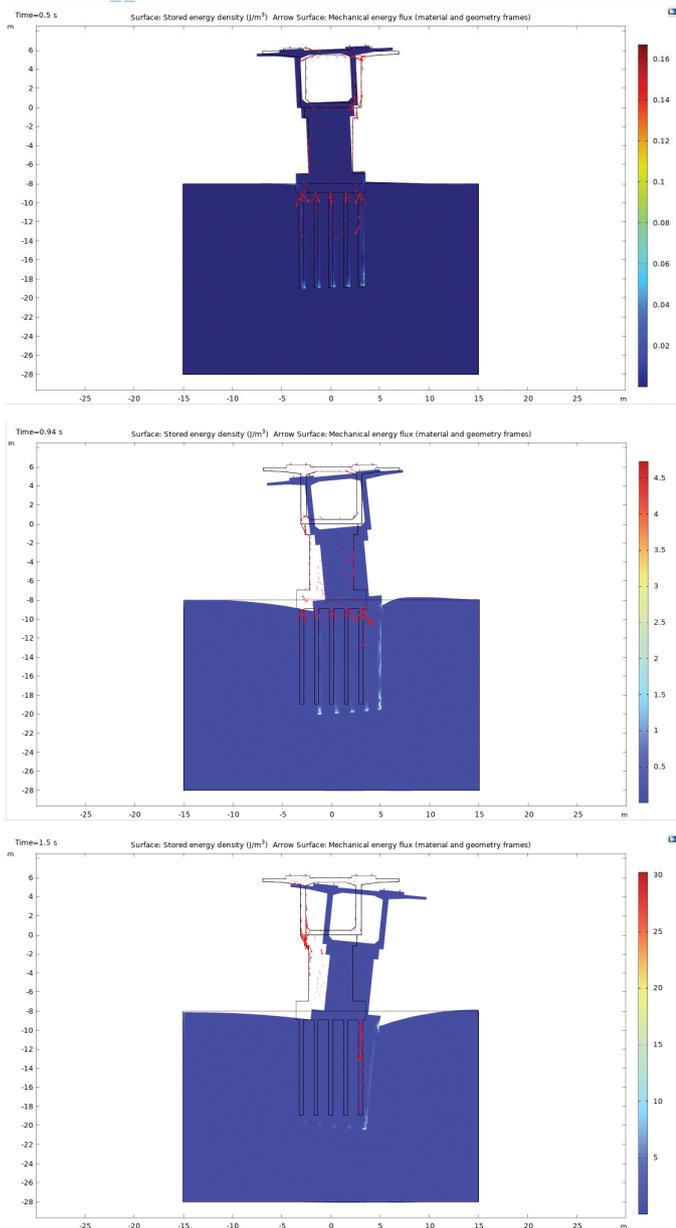


Рис. 8. Фазы поля распределения плотности энергии в момент времени, с: а – 0,5; б – 0,94; в – 1,5

пренебрежимо малое влияние на деформацию и вибрации верхнего строения пути.

**Результаты расчета собственных частот колебательных процессов**

Для оценки надежности сооружения [9, 10] информационно достаточную картину представляет собой распределение модальных (эффективных) долей массы конструкции, участвующих в колебательном процессе на резонансных частотах. Расчет проводился с помощью инструмента Eigenfrequency [8].

В результате расчета определены массы, вовлеченные в колебательный процесс по отведениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно. Полученные значения соотнесены с полной массой рассматриваемой колебательной системы. Относительные значения долей масс, участвующих в колебательном процессе для соответствующих модальных частот, представлены в таблице.

В результате расчета определены значения резонансных частот, которым соответствуют наибольшие значения масс, вовлеченных в колебательный процесс, т. е. обладающие высокой

энергией деформации, Гц: для отведения  $X$  – 0,4052; для отведения  $Y$  – 0,1986; для отведения  $Z$  – 0,2670. Моды колебаний, соответствующие резонансным частотам представлены на рис. 9.

Полученным модам колебаний при резонансных частотах соответствуют следующие амплитудные значения перемещений по отведению, мм:  $X$  – 0,07;  $Y$  – 0,097;  $Z$  – 0,104.

**Заключение**

Разработана математическая модель, позволяющая выполнять численные исследования напряженно-деформированного состояния эстакады под совместным воздействием нагрузок от набегающих волн и движущегося высокоскоростного поезда с помощью метода конечных элементов в нестационарной постановке.

Предложена методика учета динамического воздействия на эстакаду со стороны движущегося высокоскоростного поезда с помощью граничных условий, позволяющих моделировать движение поезда путем перемещения нагрузки вдоль рельсового пути с заданной скоростью.

Показано, что распределение деформаций эстакады при проходе по ней высокоскоростного поезда, а также характер возникающих при этом напряжений в ней и в толще окружающего ее грунта носят волновой характер. При этом величина деформации грунта значительно (более чем в два раза) уменьшается с ростом глубины. Значение же ускорения значительно затухает по мере удаления от опоры. В целом полученные значения деформаций и напряжений незначительны для данного типа конструкции и не представляют опасности.

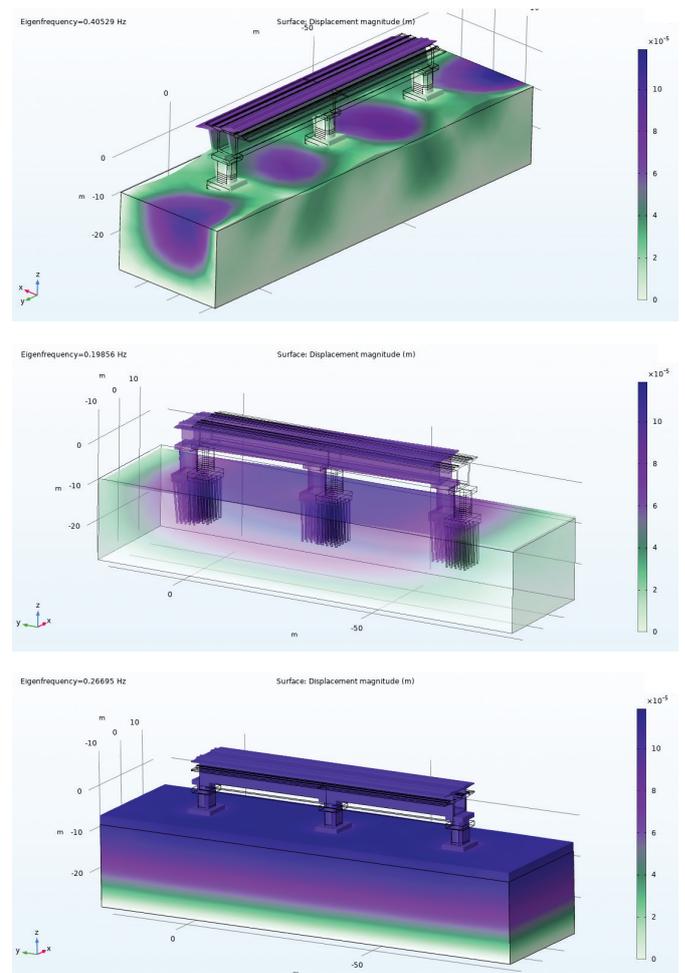


Рис. 9. Моды колебаний, соответствующие резонансным частотам участка эстакады по отведению: а –  $X$ ; б –  $Y$ ; в –  $Z$

## Значения массовых долей, участвующих в колебательном процессе

$f, \text{Гц}$	$m_{f,x} \text{ о. е.}$	$m_{f,y} \text{ о. е.}$	$m_{f,z} \text{ о. е.}$
0,1986	5,51E-10	<b>0,683381</b>	1,93E-08
0,2445	0,065018	6,96E-12	7,33E-07
0,2670	7,18E-08	7,99E-07	<b>0,819875</b>
0,2702	1,46E-08	0,023235	2,7E-05
0,2955	7,52E-10	4,92E-06	9,27E-05
0,3036	4,3E-08	0,000124	1,09E-07
0,3067	2,06E-09	2,04E-06	1,69E-05
0,3077	7,83E-07	1,57E-07	5,48E-09
0,3210	1,15E-05	1,07E-09	4,16E-08
0,3295	0,001053	7,04E-08	9,17E-08
0,3376	0,002467	2,58E-08	4,68E-09
0,3434	9,7E-07	4,79E-10	1,33E-07
0,3483	0,059922	2,29E-08	1,79E-11
0,3602	7,6E-07	0,002234	2,05E-06
0,3656	7,62E-05	2,75E-06	1,19E-11
0,3715	5,07E-06	3,21E-10	4,38E-06
0,3891	0,007102	6,17E-06	2,74E-07
0,3917	1,36E-05	0,03983	9,64E-08
0,3963	2,96E-07	6,41E-05	5,59E-05
0,4021	2,41E-06	3,2E-07	9,34E-10
0,4052	<b>0,492406</b>	3,78E-07	6,57E-09
0,4178	0,028587	3,82E-07	7,68E-09
0,4224	0,001266	1,2E-08	4,83E-08
0,4413	7,2E-05	3,22E-08	5,35E-13
0,4458	6,5E-07	2,38E-05	8,78E-07
0,4581	1,77E-07	1,68E-05	5,1E-07
0,4676	0,000294	9,07E-06	1,59E-05
0,4685	0,004158	1,54E-05	6,02E-07
0,4722	9,48E-06	0,000812	3,34E-07
Сумма	0,66247	0,74976	0,8201

**Примечание:** максимальные значения массовых долей, соответствующие резонансным частотам, выделены полужирным шрифтом.

На основе результатов исследования распределения удельной энергии системы выявлено, что интенсивность энергетических процессов, обусловленных наличием волновой и динамической нагрузок от движущегося поезда, имеет тенденцию к резкому снижению по мере распространения вглубь конструкции, что связано с процессами рассеяния энергии в толще опоры и эстакады. Таким образом, при данном типе сооружения динамическая нагрузка от набегающих волн при заданной интенсивности оказывает пренебрежимо малое влияние на деформацию и вибрации верхнего строения пути.

Выполненный модальный анализ колебаний конструкции позволил опреде-

лить резонансные частоты, которым соответствуют наибольшие значения масс, вовлеченных в колебательный процесс, т. е. обладающие высокой энергией деформации для отведения, Гц:  $X - 0,4052$ ;  $Y - 0,1986$ ;  $Z - 0,2670$ . Полученным модам колебаний при резонансных частотах соответствуют следующие амплитудные значения перемещений по отведению, мм:  $X - 0,07$ ;  $Y - 0,097$ ;  $Z - 0,104$ , что свидетельствует о высокой надежности выбранного варианта конструкции. ■

### Источники

1. Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Кавказский В. Н. Моделирование динамического воздействия высокоскоростного подвижного состава на заглубленные со-

оружения тоннельного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 72–84. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-6-9

2. Введение в COMSOL Multiphysics. URL: [https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/6.0/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (дата обращения: 14.03.2025).
3. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / под ред. М. Ф. Вериго. М.: Транспорт, 1986. 559 с. URL: <https://lokomо.ru/zheleznodorozhnyy-put/vzaimodeystvie-puti-i-sostava.html> (дата обращения: 14.03.2025).
4. 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 н/Д: РГУПС, 2016. С. 44–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28342638> (дата обращения: 14.03.2025).
5. Лайрд Д. Конечно-элементный анализ для всех. Часть 2. URL: <http://sapr.ru/article/21944> (дата обращения: 14.03.2025).
6. Чернышев М. А. Практические методы расчета пути. М.: Транспорт, 1967. 235 с. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_rc\\_4792595/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_4792595/) (дата обращения: 14.03.2025).
7. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с. URL: <https://vtome.ru/knigi/tehnika/453305-zheleznodorozhnyj-put-1987.html> (дата обращения: 14.03.2025).
8. COMSOL Multiphysics v 6.0 Reference manual. URL: [https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL\\_ReferenceManual.pdf](https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf) (дата обращения: 13.01.2025).
9. 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. № 6. Pp. 352–356. DOI: 10.1784/insi.2006.48.6.352. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/bindt/insight/2006/00000048/00000006/art00007> (дата обращения: 10.04.2025).
10. Huan Feng. 3D models of Railway Track for Dynamic Analysis. URL: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:467217/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 14.03.2025).