Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2020, №1, Том 7 / 2020, No 1, Vol 7 <https://t-s.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/03SATS120.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS120 (<http://dx.doi.org/10.15862/03SATS120>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Церех С.Г., Овчинников И.Г. Статический и динамический анализ сопряжения искусственного сооружения с подходной насыпью // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/03SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/03SATS120

For citation:

Tserekh S.G., Ovchinnikov I.G. (2020). Static and dynamic analysis of the interface between the transport structure and the approached embankment. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/03SATS120.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/03SATS120

УДК 624.04

Церех Станислав Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
Аспирант
E-mail: tserekh@list.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ
E-mail: bridgesar@mail.ru

Статический и динамический анализ сопряжения искусственного сооружения с подходной насыпью

Аннотация. Статья посвящена анализу статического и динамического расчета сопряжения подходной насыпи к искусственным сооружениям, таким как железнодорожный мост и водопропускные трубы, в качестве основного показателя стабильной работы подходной насыпи к искусственному сооружению принята – жесткость основания. Расчеты выполняются в программном комплексе Midas с учетом сопряжения переходных участков от неукрепленного земляного полотна на его укрепленную часть буронабивными сваями и устой моста. Рассмотрена статическая схема нагружения с временной нагрузкой C14 и динамическая схема нагружения подходной насыпи временной нагрузкой от скоростного поезда (Южно-Корейские нормы KTX20 cars standard – 17,335 тонн на колесо, на ось 34,67 тонн), проведен анализ и сравнения полученных результатов. Произведен анализ результатов расчета. Граничные условия приняты в виде «Пружин на поверхности основания» – «Ground Surface spring». Данная функция позволяет автоматически создать упругие или вязкие граничные элементы, необходимые для выполнения динамического расчета. При выборе сетки автоматически создаются граничные условия по левой/правой границе выбранной сетки, а также автоматически вычисляется упругая константа на основе свойств материалов, присвоенных элементам. На основе произведенных исследований выдвинуты рекомендации по развитию подробной модели с учетом динамического воздействия подвижного состава на искусственное сооружение.

Ключевые слова: участок переменной жесткости; подходная насыпь; мост; водопропускная труба; буронабивные сваи; статический анализ; динамический анализ

Введение

Обеспечение плавного сопряжения подходных насыпей с искусственными сооружениями (мостами, путепроводами, водопропускными трубами) является весьма важной задачей как для автомобильных, так и для железных дорог. В местах сопряжения таких физически неоднородных конструкций, как подходная насыпь и искусственное сооружение нередко обнаруживаются просадки, деформации, приводящие к появлению дополнительных динамических сил и возникновению неровностей даже разрушению дорожной одежды (в случае автодорожных мостов) [1; 2]. Причин появления таких деформаций может быть несколько: это и недостаточное уплотнение грунта при сооружении подходных насыпей [3] и повышенное увлажнение насыпей в зоне сопряжения при паводках, а также более интенсивное промерзание и оттаивание этих зон [4]. Все вышесказанное и определяет актуальность решения задачи создания и исследования эффективной конструкции сопряжения искусственных сооружений с подходными насыпями.

Анализ состояния проблемы

Следует заметить, что у железнодорожников за зонами сопряжения искусственных сооружений с подходными насыпями закрепился термин «участки переменной жесткости», назначение которых – постепенное изменение жесткости пути по мере приближения или удаления от искусственного сооружения.

У железнодорожников имеется несколько способов устройства участков переменной жесткости [1]:

- устройство в верхней части подходной насыпи «бездонных коробов», заполненных щебнем;
- замена грунта в верхней части насыпи несколькими слоями щебня, между которыми укладывается армированная сетка;
- омоноличивание балластной призмы на подходе к мостовому сооружению.

Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Исследования авторов работы [1] показали, что даже при устройстве участков переменной жесткости имеет место наличие неравной жёсткости пути на подходах к мостам и сложные условия работы устоев мостов. Делается вывод о необходимости не только повышать жесткость насыпей на подходах к мостовому сооружению, но и понижать жесткость мостовых устоев. Такие же соображения высказываются и в работе [5].

На автодорожных мостах применяются такие конструкции сопряжения их с подходными насыпями [2; 6]:

- устройство переходной железобетонной плиты;
- устройство заполненных щебнем железобетонных коробов;
- повышение плотности подходной насыпи при подходе к мостовому сооружению, в том числе путем армирования рабочего слоя земполотна на подходе к мосту бетонными буронабивными сваями в раскатанных скважинах, когда жесткость

насыпи уменьшают от наибольшей у устоев до наименьшей на конце зоны сопряжения [7];

- устройство подушки переменной толщины из щебня, которая послойно армируется геосинтетическим материалом.

Как видно часть способов устройства переходной зоны такая же, как и в случае железнодорожных мостов. Однако следует отметить, что сопряжение подходов насыпей с автодорожными мостами чаще всего устраивалось с использованием переходных железобетонных плит, так как реализация других типов сопряжений приводила к необходимости полного переустройства подхода участка насыпи.

В статье [2] проведено весьма полное численное (с использованием метода конечных элементов) исследование двух вариантов устройства переходного участка автодорожной насыпи (с укладкой железобетонной переходной плиты и армирования рабочего слоя земполотна на переходном участке буронабивными сваями в раскатанных скважинах) с вариантом без конструкций переменной жесткости и показана эффективность второго варианта.

В работах [8; 9] на основе анализа результатов зарубежных исследований [10–16] для улучшения эксплуатационных свойств зон сопряжения подходов насыпей с путепроводами предлагается использовать в отечественной практике интегральные и полу интегральные устои, проанализированы их достоинства. Под руководством профессора Попова В.С. выполнено несколько кандидатских диссертаций по применению интегральных устоев [17–19]. Поведение интегральных мостов также исследовано в работах [20; 21].

Отметим еще ряд публикаций, имеющих отношение к рассматриваемой проблеме [22–26].

Постановка задачи, методы решения и результаты

В данной работе исследуется эффективность применения буронабивных свай для управления жесткостью зон сопряжения железнодорожного моста с подходной насыпью. С технологической точки зрения при устройстве участков переменной жесткости на подходах насыпей с использованием буронабивных свай появляется возможность производства работ без перерыва движения поездов и без разборки верхнего строения пути. К преимуществам данной технологии можно отнести экономию времени, экономию людских ресурсов, отсутствие затрат на разборку и сборку верхнего строения пути, включая разрядку плети.

Рассматривается статический и динамический анализ рассматриваемой конструкции с целью определения разницы перемещений на подходах к водопропускному сооружению, как одного из основных показателей стабильной работы земляного полотна подходной насыпи.

Статический анализ

В расчетной модели исследуется случай, когда зона переменной жесткости разбита на три участка, каждый из которых укрепляется полем буронабивных свай с разным шагом расстановки.

Расчет грунтового массива размерами 30x25x180 м выполнялся в конечно-элементной программе Midas GTS NX 2019. Буронабивные сваи имели диаметр 500 мм, длину 10 м, заполнялись бетоном класса В30. Взаимодействие свай с грунтом моделировалось интерфейсными элементами, описывающими работу свай по боковой поверхности и по пяте, в

соответствии с СП 24.13330.2011. Нижний слой основания – суглинок полутвердый. Сваи заглубляются в нижний слой основания на 5 м. В таблице 1 приведены данные о механических характеристиках грунтов подходной насыпи

Таблица 1

Механические характеристики двух типов грунтов подходной насыпи

№ грунта	Толщина слоя, м	Вид грунта	Удельный вес грунта, кН/м ³	Угол внутреннего трения ϕ°	Сцепление c , кПа	Модуль деформации, мПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент пористости
1	25	суглинок полутвердый	18	24,4	32,05	20	0,35	0,67
2	5	песок средней крупности	18	35	1	32,5	0,25	0,63

Составлена авторами

Верхнее строение пути условно принято, как грунт №2 с толщиной – 0,6 м. Нагрузка принята равномерно распределенной – С14 с интенсивностью 28 тс/пм. Нагрузка распределяется на ширине равной 2,7 м (длина шпалы). Нагрузка расположена над сваями (участок 1–3) и на соседнем участке без свай (участок 4). Массив грунта и верхнее строение пути моделируются тетраэдральными конечными элементами. Размер сетки варьируется от 0,5 м – в области свай с увеличением шага сетки до 4 м в самых удаленных точках модели. На рисунке 1 представлена схема усиления подходной насыпи к мостовому сооружению. Участок №1, расположенный ближе к мосту, имеет трехрядное свайное поле для увеличения жесткости с шагом 1,5 м х 1,5 м, участок №2 также имеет трехрядное поле, но с расстановкой свай с шагом 1,7 м х 1,7 м, участок №3 имеет уже всего два ряда и сваи расположены на расстоянии 1,9 м друг от друга. На рисунке 2 показана схема расположения свай, а также верхнего строения пути и нагрузки С14. На рисунке 3 показан общий вид модели грунтового массива с участком переменной жесткости.

Рисунок 1. План расположения свай на участке переменной жесткости (составлен авторами)

Рисунок 2. Схема расположения свай, верхнего строения пути и нагрузки С14 (составлен авторами)

Рисунок 3. Общий вид модели грунтового массива с участком переменной жесткости (составлен авторами)

Как видно, изменение жесткости подходной насыпи кусочное, и обеспечивается изменением густоты сетки расположения свай и их количества.

В расчетах рассматривался случай приложения нагрузки С14 на существующую насыпь, при этом осадка массива грунта от веса насыпи не учитывалась и насыпь считалась слежавшейся.

Массив грунта и верхнее строение пути заданы тетраэдральными конечными элементами. Размер сетки варьируется от 0,5 м – в области свай с увеличением шага сетки до 4 м в самых удаленных точках модели. Количество конечных элементов при моделировании грунта в статическом расчете – 19545, при моделировании свай – 540.

В статическом расчете временная нагрузка принята равномерно распределенной – С14 с интенсивностью 28 тс/пм. Нагрузка распределяется на ширине равной 2,7 м (длина шпалы). Как известно, нагрузка С14 учитывает воздействие обращающегося и перспективного состава. Нагрузка представляет объемлющую равномерно распределенную эквивалентную нагрузку от групп сосредоточенных грузов с максимальным значением 35 т и равномерную нагрузку интенсивностью 14 тс/м.

Сваи моделировались одномерными балочными элементами длиной 3,5 см. Кроме того, с помощью интерфейсных элементов моделировалось взаимодействие свай с грунтом по боковой поверхности и по пяте.

В результате расчета получены изополя перемещений по оси Z (осадка), показанные на рис. 4. На рис. 5 приведена картина перемещений верхнего строения пути (ВСП), а в таблице 2 максимальные величины перемещений ВСП на всех трех участках и за ними.

Рисунок 4. Картина изополей перемещений (составлен авторами)

Рисунок 5. Перемещения верхнего строения пути (ВСП) (деформированный вид) (составлен авторами)

Таблица 2

Перемещения ВСП по участкам

№ участка	Перемещения, мм
1	22.06
2	23.088
3	22.12
4 (без свай)	23.40

Составлена авторами

Динамический анализ

В расчетной модели условно приняты два участка (рис. 6), укрепленных полем буронабивных свай с разным шагом расстановки, полученные результаты сравниваются с третьим участком (без усиления).

Рисунок 6. План расположения свай на участке переменной жесткости (составлен авторами)

Расчет грунтового массива выполнялся в программе Midas GTS NX 2019. Массив грунта имел размеры 20,5x44,3x50 м. Сваи – буровые диаметром 500 мм, длиной 10 м, бетон свай – класса В30. Количество конечных элементов при моделировании грунта в динамическом расчете – 18456, при моделировании свай – 790. Взаимодействие свай с грунтом моделируется интерфейсными элементами по боковой поверхности и по пяте, в соответствии с СП 24.13330.2011. Нижний слой основания – суглинок полутвердый. Сваи заглубляются в нижний слой основания на 5 м. Схема подходной насыпи приведена на рис. 7. Характеристики грунта приведены в таблице 3.

Рисунок 7. Схема подходной насыпи (составлен авторами)

Таблица 3

Характеристики грунта

N грунта	Толщина слоя, м	Вид грунта	Удельный вес грунта, кН/м ³	Угол внутреннего трения ϕ°	Сцепление c , кПа	Модуль деформации, мПа	Коэффициент Пуассона	Коэфф. пористости
1	15	суглинок полутвердый	18	24,4	32,05	20	0,35	0,67
2	5	песок средней крупности	18	35	1	32,5	0,25	0,63
3	0.5	верхнее строение пути (ВСП)	25	-	-	23000	0,18	-

Составлена авторами

Расчет выполнен в соответствии с пособием Midas GTS «Moving Train load history». Материал верхнего строения пути и свай принят по модели – Isotropic-Elastic, грунты по модели Мора-Кулона (Mohr-Colomb).

Расчет выполнялся в два этапа: на первом определялись формы собственных колебаний массива грунта, на втором использовались значения периодов собственных колебаний, полученных на первом этапе с приложением динамической поездной нагрузки. Схема приложения динамической нагрузки показана на рис. 8.

Рисунок 8. Схема приложения динамической нагрузки (составлен авторами)

Проводилось сопоставление результатов расчета, полученных с использованием двух расчетных схем, одна из которых включает буронабивные сваи, вторая – нет. Динамическая нагрузка принята по стандартам республики Корея: нагрузка типа «КТХ 20» (20 вагонов).

Нагрузка от корейского поезда «КТХ20 cars standard» – встроена в ПО Midas GTS, описывает 20 вагонов и 46 колес (осей) состава. Модель задана временной функцией, которая показывает, как поезд воздействует на модель на скорости 300 км/час. Нагрузка «КТХ20 cars standard» – 17,335 тонн на колесо, на ось – 34,67 т, причем для С14 максимальная нагрузка на ось – 35 тс и равномерно распределенная – 14 тс/м. Расстояния между колесами поезда условно принято 1.88 м. Нагрузка приложена на всем протяжении насыпи – 50 м. Скорость поезда 300 км/ч (83,3 м/с). Время приложения нагрузки – 3 секунды, число шагов – 100. Граничные условия приняты в виде «Пружин на поверхности основания» – «Ground Surface spring». Данная функция позволяет автоматически создать упругие или вязкие граничные элементы, необходимые для выполнения динамического расчета. При выборе сетки автоматически создаются граничные условия по левой/правой границе выбранной сетки, а также автоматически вычисляется упругая константа на основе свойств материалов, присвоенных элементам. На нижней грани модели установлен запрет перемещений. На рисунке 9 показан общий вид модели грунтового массива с насыпью, а на рис. 10 – схема расположения свай, а также верхнего строения пути и нагрузки КТХ 20.

Рисунок 9. Общий вид модели грунтового массива с насыпью (составлен авторами)

Рисунок 10. Схема расположения свай, а также верхнего строения пути и нагрузки КТХ 20 (составлен авторами)

Результаты динамического расчета приведены на рисунках 11,12 и в таблице 4. На рис. 11 приведены изополя максимальных перемещений в направлении оси Z для насыпи без усиления ее буронабивными сваями (при 100 шагах расчета по времени), а на рис. 12 для насыпи с усилением свайным полем.

Рисунок 11. Изополя максимальных перемещений в направлении оси Z для насыпи без усиления ее буронабивными сваями (составлен авторами)

Рисунок 12. Изополя максимальных перемещений в направлении оси Z для насыпи, усиленной буронабивными сваями (составлен авторами)

Таблица 4

Перемещения ВСП по участкам, мм

N	Без свай	1 участок со сваями	2 участок со сваями
1	1.557	1.269	1.305
2	1.559	1.287	1.322
3	1.495	1.295	1.325
4	1.571	1.297	1.326
5	1.572	1.303	1.344
6	1.601	1.285	1.353
7	1.615	1.299	1.348
8	1.613	1.291	1.378

N	Без свай	1 участок со сваями	2 участок со сваями
9	1.609	1.293	1.393
10	1.609	1.301	1.387
Ср. значение	1.580	1.292	1.348

Составлена авторами

Как видно, динамический расчет показывает, что в разнице в максимальных перемещениях первого и второго участка составляет 4,2 %, а разнице в максимальных перемещениях первого участка и участка без свай составляет 18,2 %.

Заключение

За основной показатель стабильной работы подходной насыпи к искусственному сооружению принято считать жесткость основания, которая характеризуется величиной перемещения (осадки). Как видно из полученных значений перемещений (таблица 2) – при статическом расчете разница значений перемещений грунта основания при наличии усиления свайным полем и без него составила 1,36 мм. Модель же, учитывающая динамические эффекты, показала, что разница максимальных перемещений грунта, усиленного свайным полем и не усиленного составила 18,2 %. Перемещения, возникающие в динамической модели нагружения в 17 раз меньше, чем в статической и составляет всего 6 % от них. Динамический расчет предполагает случай единичного прохода поезда и показывает, как ведет себя насыпь в каждый момент времени прохода состава.

Для большей полноты картины требуется разработка подробной модели с учетом динамического воздействия подвижного состава на искусственные сооружения, учитывающая динамическое взаимодействие подвижного состава с насыпью на подходе к водопропускной трубе. Сравнение результатов расчета с использованием не только статической, но и динамической модели будет полезно для выбора более экономичной схемы укрепления подходной насыпи к искусственным сооружениям, так как наиболее неблагоприятная ситуация возникает именно при прохождении поезда, а не во время его вероятного отстоя на месте сопряжения насыпи с искусственным сооружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замуховский А.В., Меренченко К.В. Экспериментальное обследование участков переменной жесткости // Мир транспорта. 2013. №3. с. 22–31.
2. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Ломов П.О. Сопряжение подходов насыпей с мостами и путепроводами // Вестник СибАДИ, 2016, выпуск 2(48). С. 110–120.
3. Журавлев М.М. Сопряжение проезжей части автодорожных мостов с насыпью / М.М. Журавлев. – М. Транспорт. 1976. 81 с.
4. Крицкий М.Я., Скоркин В.Ф., Кошелев В.Н. Новая конструкция сопряжения насыпей автомобильных дорог с мостами и путепроводами // Актуальные проблемы повышения надежности и долговечности автомобильных дорог и искусственных сооружений на них. Барнаул. 2003. С. 75–78.
5. Шталь В., Фройденштайн Ш. Упругие характеристики верхнего строения пути // RTR Russian edition. Октябрь 2012. – С. 4–7.
6. Попов В.И., Прохоров А.А. Способы сопряжения конструкций путепроводов с насыпями подходов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» <http://naukovedenie.ru>. 25KO514. Выпуск 5 (24), сентябрь–октябрь 2014. С. 1–11.
7. Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Востриков К.В. К вопросу разработки конструкций участка насыпи переменной жесткости на подходах к мосту // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: материалы IX науч. техн. конф. с международным участием. Москва, 2012. С. 185–188.
8. Попов В.И. Совершенствование конструкции сопряжения путепроводов с насыпью путем применения интегральных устоев // Дороги и мосты: сб. статей / ФГУП «Росдорнии». – 2014. – Вып. 31/1. – С. 166–177.
9. Попов В.И. Мосты с интегральными устоями // Дороги. Инновации в строительстве. 2019. № 79 с. 18–23.
10. Jin, Xiaoqin; Shao, Xudong; Peng, Wanghu; Yan, Banfu. A New Category of Semi-integral Abutment in China // Structural Engineering International. – 2005. – Vol.15. – № 3. – August. – PP. 186–188.
11. Arthur P. Yannotti, Sreenivas Alampalli, Harry I. White. New York State Department of Transportation's Experience with Integral Abutment Bridges // Integral Abutment and Jointless Bridges: Proceedings of the FHWA Conference. – Maryland. – Baltimore. – 2005. – March. – PP. 41–49.
12. Rodolfo F. Maruri, Samer H. Petro. Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB) 2004 Survey Summary. // Integral Abutment and Jointless Bridges: Proceedings of the FHWA Conference. – Maryland. – Baltimore. – 2005. – March. – PP. 12–29.
13. Zordan T., Brisegholla B., Jan Cheng. Analytical Formulation Limit Length of Integral Bridges // Structural Engineering International. – 2005. – Vol.21. – № 3. – August. – PP. 304–310.
14. Milenko Przulj. Up to Date Concept of Overpasses on Motorway: Proceedings of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges. – Canada. – Quebec. – Montreal. – 2006. – August. – PP. 124–137.

15. Sami Arsoy, Richard M. Barcer, J. Michael Duncan. The Behavior of Integral Abutment Bridges / Final Contract Report. – Virginia. – Charlottesville. – 1999. – November. – PP. 1–33.
16. Zolan Prucz. Integral Abutment Bridge Design / Presentation of Modjeski and Masters, Inc., 2007. – PP. 1–15.
17. Фам Туан Тхань. Совершенствование конструкции сопряжения путепроводов с насыпями подходов в условиях Вьетнама. Автореферат диссертации. М. МАДИ. 2017. 24 с.
18. Нгуен Ван Хиен. Применение интегральных устоев в косых путепроводах в условиях Вьетнама. Автореферат диссертации. М. МАДИ. 2019. 21 с.
19. Нгуен Мань Ха. Особенности работы криволинейных путепроводов с интегральными устоями в условиях Вьетнама. М. МАДИ. 2019. 26 с.
20. Cheng Lan. On the performance of super-long integral abutment bridges / Parametric analyses and design optimization. Ph.D. thesis. University of Trento. 2012. 210 p.
21. Sami Arsoy, Richard M. Barker, J. Michael Duncan. The behavior of integral abutment bridges. Final contract report. Kocaeli University. 1999. 33 p.
22. Harvey E. Wahls. Design and constructions of bridge approaches. North Carolina State University. 1990. 45 p.
23. Соколов А.Д. Армогрунтовые системы автодорожных мостов // Мир дорог. 2014, №76. с. 28–32.
24. Зазвонов, В.В. Динамический анализ НДС в грунтозасыпных мостах с железобетонными сводчатыми пролетными строениями при землетрясении / В.С. Сафронов, В.В. Зазвонов // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. – Москва, 2011. – Вып. №7. С. 564–569.
25. Зазвонов В.В. Развитие конструктивных форм и методов статического и динамического расчета грунтозасыпных мостовых сооружений. Автореферат диссертации. Воронеж. ВорГАСУ. 2015. 21 с.
26. Шапиро Д.М. Теория и расчет оснований обсыпных устоев автодорожных мостов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 104–116. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.11.

Tserekh Stanislav Gennad'evich

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: tserekh@list.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Static and dynamic analysis of the interface between the transport structure and the approached embankment

Abstract. The article is devoted to the analysis of static and dynamic calculation of the interface of an approach embankment to artificial structures, such as a railway bridge and culverts? the main indicator of the stable operation of an approach embankment to an artificial structure is the stiffness of the base. Calculations are performed in the Midas software package, taking into account the interface of the transition sections from the unfixed roadbed to its fortified part with bored piles and the bridge abutment. A static loading scheme with a C14 time load and a dynamic loading scheme for an approach embankment with a time load from a high-speed train (South Korean KTX20 cars standard norms – 17,335 tons per wheel, 34,67 tons per axle) are considered, and the results are analyzed and compared. The analysis of calculation results is made. The boundary conditions are taken as "Springs on the base surface" – "Ground Surface spring". This function allows you to automatically create elastic or viscous boundary elements that are necessary for performing dynamic calculations. When selecting a grid, boundary conditions are automatically created on the left/right border of the selected grid, and an elastic constant is automatically calculated based on the material properties assigned to the elements. Based on the research, recommendations were made for the development of a detailed model, taking into account the dynamic impact of rolling stock on an artificial structure.

Keywords: section of variable stiffness; approached embankment; bridge; culvert; filling pile; static analysis; dynamic analysis

REFERENCES

1. Zamukhovskiy A.V., Merenchenko K.V. (2013). Experimental inspection of variable stiffness areas. *World of Transport*, 3, pp. 22–31 (in Russian).
2. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Lomov P.O. (2016). Pairing approach embankments with bridges and overpasses. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway University*, 2(48), pp. 110–120 (in Russian).
3. Zhuravlev M.M. (1976). Sopryazhenie proezzhey chasti avtodorozhnykh mostov s nasyp'yu. [*Mating the roadway of road bridges with the embankment.*] Moscow: Transport, p. 81.
4. Kritskiy M.Ya., Skorkin V.F., Koshelev V.N. (2003). Novaya konstruktsiya sopryazheniya nasypey avtomobil'nykh dorog s mostami i puteprovodami // Aktual'nye problemy povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti avtomobil'nykh dorog i iskusstvennykh sooruzheniy na nikh. [*A new design for interfacing embankments of roads with bridges and overpasses // Actual problems of increasing the reliability and durability of roads and artificial structures on them.*] Barnaul, pp. 75–78.
5. Shtal' V., Froydenshtayn Sh. (2012). Elastic characteristics of the track superstructure. *RTR Russian edition*, pp. 4–7. (in Russian).
6. Popov V.I., Prokhorov A.A. (2014). Connection means of overpasses construction with approach. *Naukovedenie*, [online] 5(6), pp. 1–11. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/25KO514.pdf> (in Russian).
7. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Vostrikov K.V. (2012). K voprosu razrabotki konstruktsiy uchastka nasypi peremennoy zhestkosti na podkhodakh k mostu. [*On the issue of designing the site of the embankment of variable stiffness on approaches to the bridge.*] Moscow, pp. 185–188.
8. Popov V.I. (2014). Improving the design of the interface between overpasses and the embankment by using integrated foundations. *Roads and Bridges*, 31/1, pp. 166–177 (in Russian).
9. Popov V.I. (2019). Bridges with integral abutments. *Roads. Building Innovation*, 79, pp. 18–23 (in Russian).
10. Jin Xiaoqin, Shao Xudong, Peng Wanghu, Yan Banfu (2005). A New Category of Semi-integral Abutment in China. *Structural Engineering International*, 3(15), pp. 186–188.
11. Arthur P. Yannotti, Sreenivas Alampalli, Harry I. White (2005). *New York State Department of Transportation's Experience with Integral Abutment Bridges*. Maryland, Baltimore: Integral Abutment and Jointless Bridges, pp. 41–49.
12. Rodolfo F. Maruri, Samer H. Petro (2005). *Integral Abutments and Jointless Bridges (IAJB)*. Maryland, Baltimore: Integral Abutment and Jointless Bridges, pp. 12–29.
13. Zordan T., Brisegholla B., Jan Cheng (2005). Analytical Formulation Limit Length of Integral Bridges. *Structural Engineering International*, 3(21), pp. 304–310.
14. Milenko Przulj (2006). *Up to Date Concept of Overpasses on Motorway*. Canada, Quebec, Montreal, pp. 124–137.
15. Sami Arsoy, Richard M. Barcer, J. Michael Duncan (1999). *The Behavior of Integral Abutment Bridges*. Virginia, Charlottesville: Final Contract Report, pp. 1–33.

16. Zolan Prucz (2007). *Integral Abutment Bridge Design*. Presentation of Modjeski and Masters, Inc., pp. 1–15.
17. Fam Tuan Tkhan' (2017). Sovershenstvovanie konstruktсии sopryazheniya puteprovodov s nasypami podkhodov v usloviyakh V'etnama. Avtoreferat dissertatsii. [*Improving the design of the interface of viaducts with embankments of approaches in Vietnam. Abstract of dissertation.*] Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University, p. 24.
18. Nguen Van Khien (2019). Primenenie integral'nykh ustoev v kosykh puteprovodakh v usloviyakh V'etnama. Avtoreferat dissertatsii. [*The use of integral foundations in oblique overpasses in Vietnam. Abstract of dissertation.*] Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University, p. 21.
19. Nguen Man' Kha (2019). Osobennosti raboty krivolineynykh puteprovodov s integral'nymi ustoyami v usloviyakh V'etnama. [*Features of the work of curved overpasses with integrated abutments in Vietnam.*] Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University, p. 26.
20. Cheng Lan (2012). *On the performance of super-long integral abutment bridges / Parametric analyses and design optimization*. University of Trento, p. 210.
21. Sami Arsoy, Richard M. Barker, J. Michael Duncan (1999). *The behavior of integral abutment bridges. Final contract report*. Kocaeli University, p. 33.
22. Harvey E. Wahls (1990). *Design and constructions of bridge approaches*. North Carolina State University, p. 45.
23. Sokolov A.D. (2014). Armored road systems of road bridges. *World of Roads*, 76, pp. 28–32 (in Russian).
24. Safronov V.S., Zazvonov V.V. (2011). Dynamic analysis of VAT in soil-filled bridges with reinforced concrete vaulted spans during an earthquake. *Scientific and Technical Journal. Bulletin Moscow State University of Civil Engineering*, 7, pp. 564–569 (in Russian).
25. Zazvonov V.V. (2015). Razvitie konstruktivnykh form i metodov staticheskogo i dinamicheskogo rascheta gruntozasypnykh mostovykh sooruzheniy. Avtoreferat dissertatsii. [*Development of structural forms and methods for static and dynamic calculation of bulk bridge structures. Abstract of dissertation.*] Voronezh: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, p. 21.
26. Shapiro D.M. (2019). Theory and calculation of the foundations of the bulk foundations of road bridges. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*, 3(10), pp. 104–116 (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.11.