

УДК 625.033.34

## О работе сборных водопропускных труб в теле насыпи двухпутного земляного полотна

Н. А. Перминов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Перминов Н. А. О работе сборных водопропускных труб в теле насыпи двухпутного земляного полотна // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 41–53. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-41-53

### Аннотация

**Цель:** Установить особенности работы сборных железобетонных водопропускных труб во вмещающем грунтовом массиве двухпутной насыпи с учетом взаимодействия сборных конструкций тела трубы с грунтом. Проанализировать разнонаправленное относительно первого и второго путей сочетание воздействий горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов в зоне трубы. Дать предложения по выбору способов усиления конструкций сборных труб с учетом условий их работы в двухпутном земляном полотне. **Методы:** Анализ и использование аналитических и экспериментальных методов исследований для оценки работы водопропускных труб в теле земляного полотна, в том числе на двухпутных участках. Аналитическое сопоставление результатов исследований и данных инструментальных наблюдений. **Результаты:** Установлены особенности взаимодействия тела сборной водопропускной трубы с телом двухпутной насыпи при разнонаправленной горизонтальной составляющей поездной нагрузки, проанализирован характер распределения вдоль тела трубы напряженно-деформированного состояния вмещающего массива грунта двухпутного земляного полотна. Показано негативное влияние на тело сборной водопропускной трубы в насыпи на двухпутных участках сочетания разнонаправленного воздействия относительно первого и второго путей горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов. **Практическая значимость:** Полученные результаты о картине напряженно-деформированного состояния вмещающего грунтового массива и распределения усилий вдоль тела трубы при сочетании разнонаправленных горизонтальных воздействиях на двухпутной земляном полотне позволили установить характер их совместной работы. Это явилось основой для разработки предложения по выбору способов усиления конструкций труб с учетом условий их работы в земляном полотне двухпутных участков пути.

**Ключевые слова:** Сборная водопропускная труба, двухпутное земляное полотно, поездная нагрузка, горизонтальная составляющая нагрузки, активное и пассивное давления, методы усиления конструкции.

### Введение. Общие черты рассматриваемой проблемы

Сборные железобетонные водопропускные трубы характеризуются особыми условиями работы в теле двухпутных насыпей. Проявление этих условий особо ощутимо для длительно эксплуатируемых сборных труб, находящихся в теле двухпутного земляного полотна. Известно, что само двухпутное земляное полотно проявляет специфику напряженно-деформированного состояния (НДС) в условиях вибродинамического воздействия от подвижной нагрузки на участке

встречного движения поездов. При этом экспериментальными исследованиями зафиксировано от 1,5- до 2-кратного увеличения горизонтальной составляющей амплитуды колебаний грунтов земляного полотна в зоне междупутья. Вибродатчиками характер этого увеличения зафиксирован на глубине до 2,5 м от уровня основной площадки [1, 2]. Поскольку грунты земляного полотна достаточно однородны и имеют высокую степень распределительной способности за счет природной геотехнической зернистости, позволяющей осуществлять перераспределение напряжений в геомассиве, то факт наложения вибродинамического воздействия при встречном движении поездов не вызывает нарушения прочности и деформативности земляного полотна [3]. Иная картина формирования напряженно-деформированного состояния наблюдается в зоне взаимодействия земляного полотна с контактирующими с ним или включенными в его тело конструктивными элементами с отличающимися на несколько порядков (от 25 до 150 МПа для грунтов насыпи и от 17 000 до 32 000 МПа для бетонных сопряжений и включений) величинами упругих деформаций. Это относится к бетонным конструкциям искусственных сооружений, например устоям мостов и бетонным водопропускным трубам. При контактном взаимодействии «разнотвердых» материалов тела насыпи и устоя моста происходит «скачок жесткости». Этот вопрос достаточно изучен при действии поездных нагрузок в условиях двухпутного движения поездов. Даны рекомендации для предотвращения деформаций насыпи земляного полотна в зоне контакта с устоем моста путем устройства различных конструкции переходной жесткости [4].

При встречном движении поездов в зоне расположения сборной водопропускной трубы в двухпутном земляном полотне так же, как и в выше рассмотренных случаях, имеет место ситуация воздействия разнонаправленной горизонтальной составляющей поездной нагрузки, в том числе с вибродинамической составляющей, на систему «тело сборной железобетонной трубы — тело насыпи двухпутного земляного полотна». Последствия этого отрицательного воздействия отмечены многочисленными исследованиями, в том числе выполненными автором статьи [5–7]. Анализ опытно-экспериментальных исследований показал, что характерным дефектом сборных водопропускных труб, длительно эксплуатируемых в двухпутных участках земляного полотна, является разрушение стыковых соединений между звеньями, вызывающее нарушение целостности тела трубы и приводящее к смещению секций тела трубы. Сопровождающееся при этом нарушение гидроизоляции и вынос частиц грунта из насыпи в полость тела трубы приводят к образованию пазух и нарушению целостности насыпи в зонах сопряжения. В силу особенностей сборной конструкции железобетонных водопропускных труб в статье делается попытка рассмотреть характер их работы в теле двухпутного земляного полотна для случая одновременного разнонаправленного воздействия поездной нагрузки при встречном движении поездов. На этой основе

автором статьи даются предложения по выбору способов усиления конструкций сборных труб с учетом условий их работы в земляном полотне двухпутных участков пути.

### О характере распределения напряжений в массиве грунта относительно тела трубы при разнонаправленной полосовой нагрузке

Возьмем для качественной оценки характера распределения разнонаправленных напряжений от полосовой нагрузки условно-упрощенную задачу, где рассмотрим характер распределения напряжений в массиве грунта в зоне боковой поверхности сечений звеньев трубы, но без учета их контактного взаимодействия, возникающих от разнонаправленных нагрузок, имитирующих воздействие нагрузок от шпал через тело насыпи на сборные звенья относительно 1-го и 2-го путей (рис. 1).

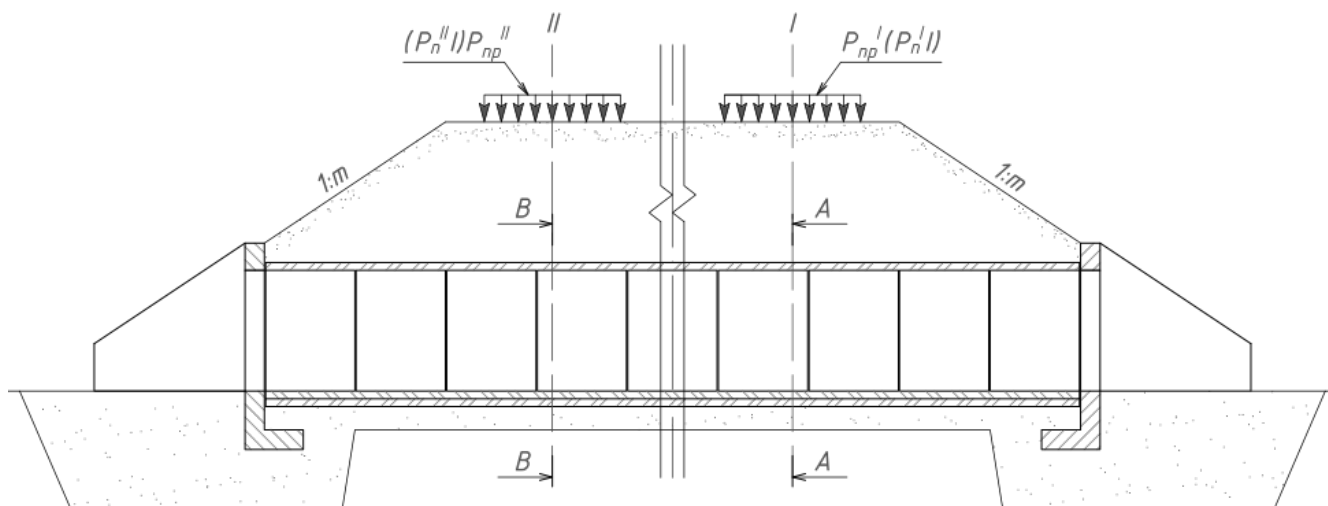


Рис. 1. Схема сборной водопропускной трубы с теле двухпутной насыпи с встречной поездной нагрузкой  $P'$  и  $P''$

Воспользуемся одним из решений, принадлежащих Митчелу и позволяющих провести исследования вертикальных напряжений в земляном полотне с учетом распределяющей способности грунтов [8]. Для определения характера распределения напряжений в массиве грунта двухпутной насыпи от разнонаправленной полосовой нагрузки выполним серию расчетов. Используя предложенные решения, задаемся в соответствии с принятой схемой (рис. 1) следующими параметрами:  $P$  — равномерно распределенная нагрузка, соответственно  $P'$  и  $P''$  от 1 и 2 осей, интенсивностью Па;  $\alpha_B$  — угол видимости, рад;  $\beta_B$  — угол, расположенный между главными осями 1 или 3 и осями начальной системы координат  $Z$  или  $X$ , рад. (рис. 2).

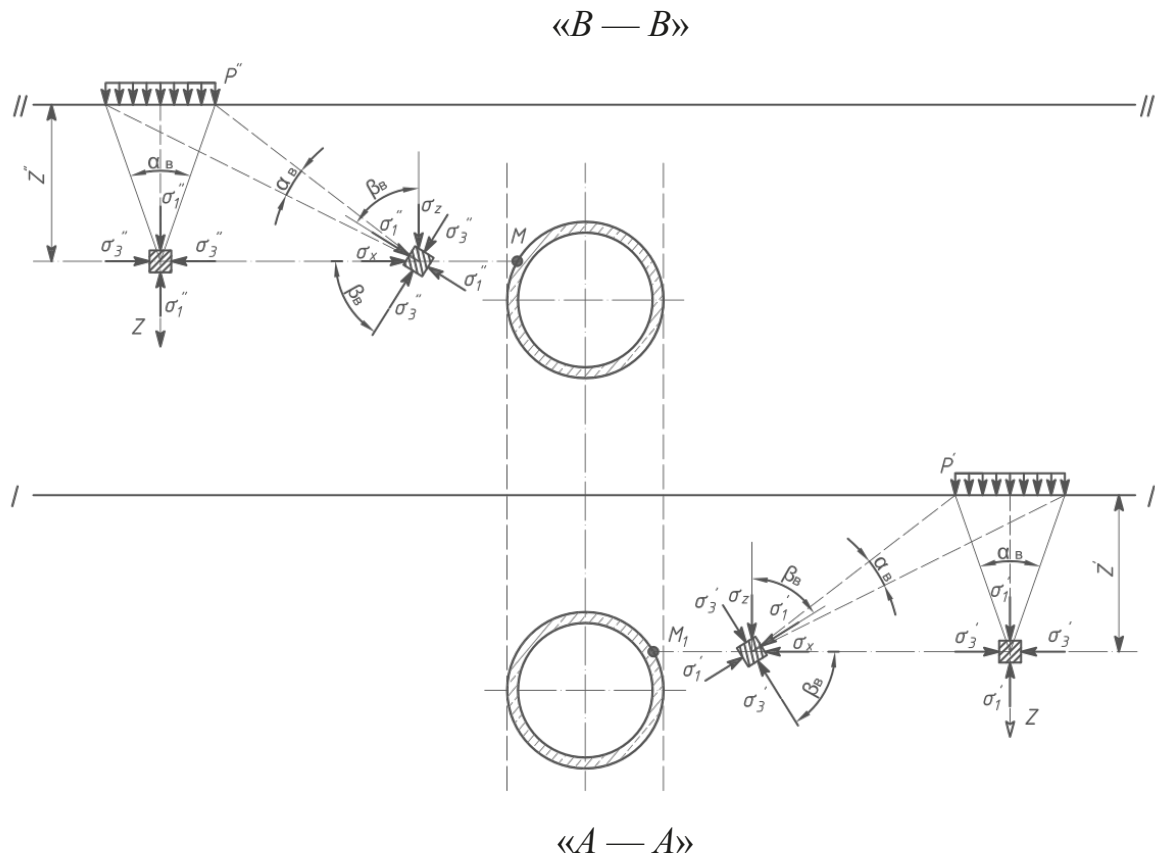


Рис. 2. Определение распределения напряжений по Митчеллу в массиве грунта от полосовой нагрузки в зоне боковой поверхности сечений звеньев, возникающих от разнонаправленных нагрузок, имитирующих воздействия нагрузок  $P'$  и  $P''$  на сборные звенья относительно 1-го и 2-го путей

Составленные с использованием методики Митчелла расчетные схемы (рис. 2) применялись в расчетах по определению характера распределения напряжений в расчетных сечениях «A — A» по 1-му пути и «B — B» по 2-му пути. По результатам выполненных расчетов можно судить о закономерностях изменения величин главных напряжений с приближением к оси трубы со стороны 1 и 2 путей. Для установления общей динамики этих изменений были построены графики зависимости главных напряжений в относительных величинах:  $\sigma_1/p$  и  $\sigma_3/p$  от угла видимости нагрузки  $\alpha_B$  (рис. 3).

Характер кривых на графиках «а» и «б» (рис. 3) справедлив при одинаковой удаленности и величины нагрузки и показывает идентичность картины изменения относительных величин главных напряжений  $\sigma_1/p'$  и  $\sigma_3/p''$  от угла видимости  $\alpha_B$  прикладываемых нагрузок. При этом следует иметь в виду, что зоны приложения этих нагрузок симметричны относительно оси трубы, но имеют разностороннюю направленность в зонах сечения трубы «A — A» и «B — B». Сочетание разностороннего приложения нагрузок к не цельно несущей, а к сборной конструкции трубы вызывает особенности в ее работе с сопряженными элементами и в контактном взаимодействии с вмещающим массивом грунта насыпи.

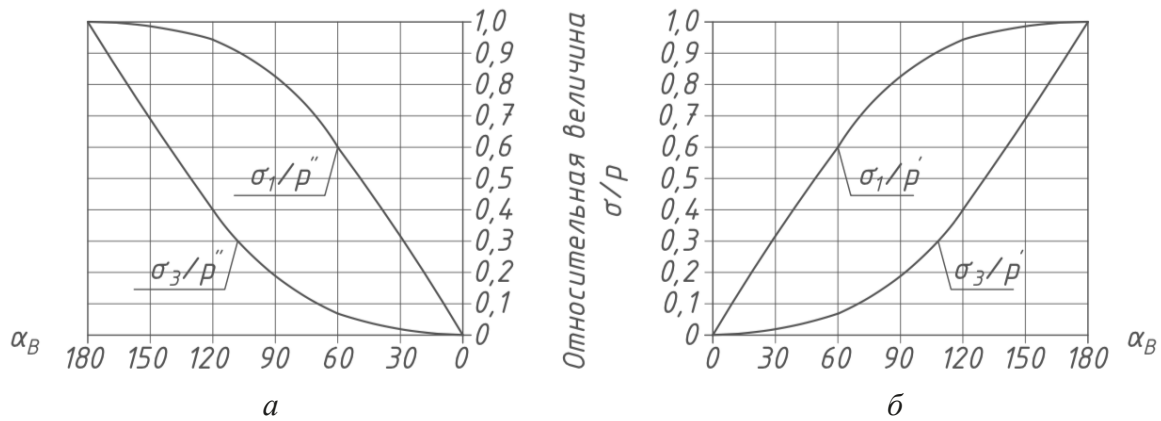


Рис. 3. Характер изменения относительной величины главных напряжений  $\sigma_1/p'$  и  $\sigma_3/p''$  в зависимости от удаленности (угла видимости —  $\alpha_B$ ) нагрузки:  $a$  — зона сечения « $A — A$ »;  $b$  — зона сечения « $B — B$ »

Для частного случая расположения проездных нагрузок по оси трубы в зонах сечения « $A — A$ » и « $B — B$ » воздействие будет носить однонаправленный характер. Этот случай отражен в СП 35.13330. 2011, и для поверочных расчетов в нем предложены формулы определения главных напряжений в массиве грунта насыпи от нагрузки действующей по оси трубы.

На рис. 4 представлен характер изменений главных напряжений, вычисленных по выше отмеченной методике, в зависимости от относительной глубины  $Z/R$  и относительной удаленности приложения нагрузки  $L/R$ . Из анализа зависимостей (рис. 4,  $a, b$ ) следует, что с изменением относительной глубины при  $Z/R$  от 0,25 до 2,5 и относительной удаленности нагрузки изменение динамики как приращения, так и уменьшения главных максимальных и минимальных напряжений носит разнонаправленный и знакопеременный характер.

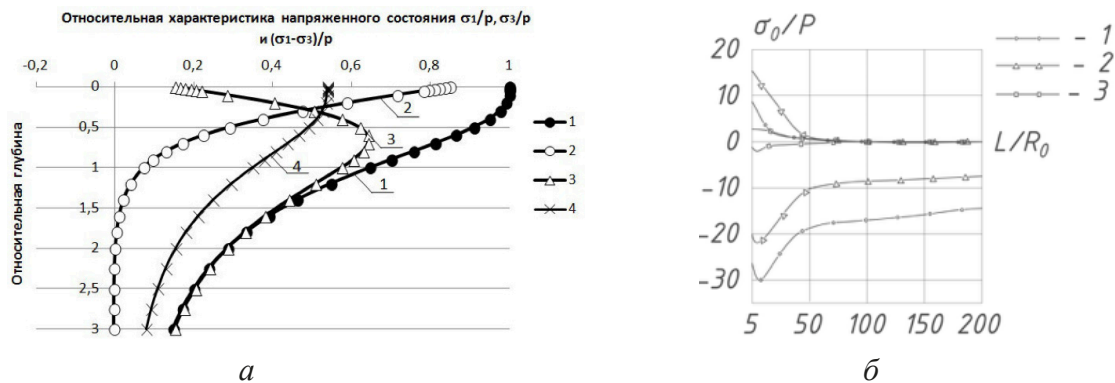


Рис. 4. Кривые изменения характеристик напряженного массива условно однородного грунта:  $a$  — при изменении приложении осевых нагрузок по относительной глубине  $Z/R$  соответственно относительных главных напряжений и девиатора напряжений — 1, 2, 3, 4;  $b$  — при изменении относительной удаленности приложения относительных нагрузок  $L/R$  соответственно от оси по сечениям « $A — A$ » и « $B — B$ » (при различных относительных глубинах 1, 2, 3)

Рассмотренный характер распределения напряжений в массиве грунта относительно тела трубы при разнонаправленной полосовой нагрузке выполнен с использованием условно-упрощенной модели, не учитывающей распределения контактных напряжений в массиве грунта в зоне взаимодействия с боковой поверхностью сечений звеньев трубы, возникающих от разнонаправленных нагрузок. Одновременное воздействие разнонаправленных нагрузок на тело трубы в сочетании с ее не цельно несущей, а сборной конструкцией вызывает нестационарные режимы в работе сопряженных элементов и нуждается в учете их контактного взаимодействия с вмещающим массивом грунта двухпутной насыпи.

### Оценка воздействия на сборную трубу веса грунта двухпутной насыпи и встречной поездной нагрузки

Прочность и деформативность конструкции трубы, ее геометрическую изменчивость необходимо рассчитывать не только на данный период эксплуатации, а на всю историю нагружения поездной нагрузкой с учетом процесса контактного взаимодействия оболочки звеньев трубы грунтовым массивом

По общей теории [8] давление грунта насыпи на тело трубы в состоянии покоя можно определить из выражения:

$$\sigma_0(z) = \sigma_x(z, u_x) \Big|_{u_x=0} = \lambda_0 \gamma z. \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя;

$\gamma$  — удельный вес грунта;

$z$  — расстояние от поверхности грунта до рассматриваемой точки.

Проведем оценку воздействия на водопропускную трубу от веса грунта насыпи и поездной нагрузки. Рассмотрим влияние активного и пассивного давлений с точки зрения возможного проявления смещений звеньев сборной трубы при нарушении сплошности стыковых соединений. Активное и пассивное давление грунта на ограждение составляют предельные величины давлений, то есть эффективное давление всегда находится в диапазоне:

$$\sigma_a(z) \leq \sigma_x(z, u_x) \leq \sigma_p(z). \quad (2)$$

С некоторым допущением, принятым в современной теории бокового давления грунта [10], функцию давления грунта от смещения представим как:

$$f(u_x) = \sigma_0 - k u_x, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент жесткости грунта;

$\sigma_0$  — давление грунта в состоянии покоя.

В качестве коэффициента жесткости грунта можно использовать коэффициент постели грунта (отпора). Результирующим давлением по образующей верхнего, среднего и нижнего участков тела трубы является сумма эффективных давлений от грунтового массива и поездной нагрузки.

Построим функцию  $\sigma_x(z, u_x)$  в виде кусочно-заданной функции для любого значения  $z$ .

Для описания эффективных давлений  $\sigma_x(z, u_x)$  для отдельных участков диаграммы, находящихся в интервалах между предельными активным  $\sigma_a(z) = \lambda_a \gamma z - c \lambda_{ac}$  и пассивным  $\sigma_p(z) = \lambda_p \gamma z + c \lambda_{pc}$  давлениями вместо индексов "l", "r" для слагаемых, относящихся к звеньям для участков трубы над осями I и II путей. В том случае величины давления  $\sigma_x$  на боковую поверхность звена на некоторой глубине  $z$  от перемещений  $\sigma_x(z, u_x)$  получают вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \sigma_p^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k), & u_x \leq u_1 \\ \sigma_0^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k) - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ \sigma_0^l(z) - \sigma_a^r(z - h_k) - u_x(k^l + k^r), & u_2 < u_x < u_3. \\ \sigma_a^l(z) - \sigma_0^r(z - h_k) - u_x k^r, & u_3 < u_x < u_4 \\ \sigma_a^l(z) - \sigma_p^r(z - h_k), & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (4)$$

При раздельном рассмотрении результирующие давления на участки тела трубы от верхней до нижней грани ( $z \leq h_k$ ), то выражение (7) примет вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \sigma_p^l(z), & u_x \leq u_1 \\ \sigma_0^l(z) - k^l u_x, & u_1 < u_x < u_3. \\ \sigma_a^l(z), & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (5)$$

После общего преобразования выражения (4) и (5) получают следующий вид:

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \lambda_{pl} \gamma z + c \lambda_{pcl}, & u_x \leq u_1 \\ \lambda_{0l} \gamma z + k_l u_x, & u_1 < u_x < u_3. \\ \lambda_{al} \gamma z + c \lambda_{acl}, & u_3 \leq u_x \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_x(z, u_x) = \begin{cases} \lambda_p^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) + c \lambda_{pc}^l + c \lambda_{ac}^l, & u_x \leq u_1 \\ \lambda_0^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) + c \lambda_{ac}^r - u_x k^l, & u_1 < u_x < u_2 \\ \lambda_0^l \gamma z - \lambda_a^r \gamma (z - h_k) - u_x(k^l + k^r), & u_2 < u_x < u_3. \\ \lambda_a^l \gamma z - \lambda_0^r \gamma (z - h_k) - c \lambda_{ac}^r - u_x k^r & u_3 < u_x < u_4 \\ \lambda_a^l \gamma z - \lambda_p^r \gamma (z - h_k) - c \lambda_{ac}^l - c \lambda_{ac}^r & u_4 \leq u_x \end{cases} \quad (7)$$

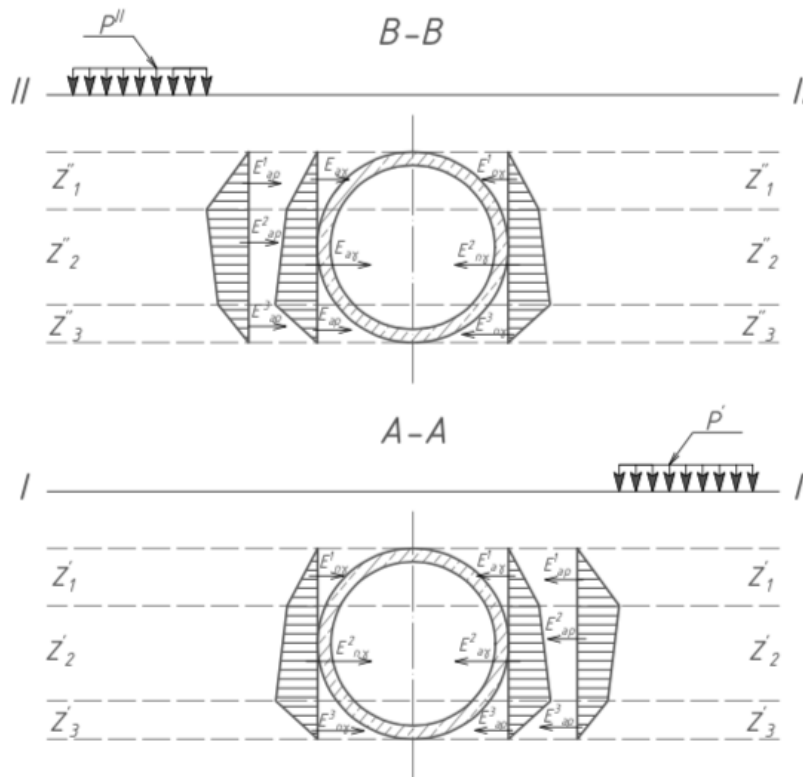


Рис. 5. Результирующие давления по образующей верхнего, среднего и нижнего участков тела трубы соответственно по сечениям «А — А» и «В — В» сумма эффективных давлений от грунтового массива и поездной нагрузки для первого — I и второго — II путей

После внесения соответствующих индексов, одних — указывающих положение участка сборной трубы относительно I и II путей, других — характеризующих направления и зоны действия результирующих величин активного и пассивного давлений от воздействия горизонтальной составляющей расчетного веса массива грунта и горизонтальной (продольной) составляющей поездной нагрузки в зоне ее максимального влияния, производятся уточнения составляющих формул (6) и (7). На рис. 5 представлены эпюры давлений в соответствии с характером потенциальных смещений тела сборной водопропускной трубы. Вибродинамический характер горизонтальных составляющих активного и пассивного давлений от грунтового массива и поездной нагрузки на боковую поверхность смежных звеньев трубы вызывают знакопеременные НДС стыковых соединений и скачкообразный характер перемещений: разнонаправленные деформации, смещения участков тела сборной трубы под I и II путями для случая одновременного воздействия поездной нагрузки на боковую поверхность звеньев при встречном прохождении составов в зоне активного влияния. Путем использования полученных выражений и зависимостей создается возможность определения результирующих разнонаправленных воздействий на тело сборной трубы в двухпутной насыпи для случая одновременного встречного прохождения поездов по насыпи



над трубой в зоне активного влияния горизонтальной составляющей поездной нагрузки и их использование в расчетном обосновании усиления конструкций при ремонте и реконструкции длительно эксплуатируемых водопропускных труб. На основании анализа условий нестационарной работы сборных водопропускных труб в теле двухпутного земляного полотна явно просматривается проблема необходимости защиты стыковых соединений от разнонаправленного и знакопеременного воздействия поездной нагрузки при встречном движении поездов [12, 13].

## Заключение

Проведенный анализ позволил установить особенности работы водопропускных труб во вмещающем грунтовом массиве двухпутной насыпи с учетом взаимодействия сборных конструкций тела трубы с грунтом для случая разнонаправленного относительно первого и второго путей сочетания воздействий горизонтальных составляющих поездных нагрузок при встречном прохождении поездов в зоне трубы.

Показано, что сумма эффективных давлений на тело сборной трубы, находящейся в массиве грунта насыпи двухпутного земляного полотна, носит асимметричный и знакопеременный относительно оси тела трубы. Нестационарность воздействия проявляется как в противоположных осевых направлениях, так и в верхнем, среднем и нижнем частях трубы и вызывает скачки напряженно-деформированного состояния в теле сборной трубы.

При расчетном обосновании выбора конструктивного решения и способа усиления длительно эксплуатируемых конструкций труб указана необходимость учета знакопеременного характера напряженно-деформированного состояния тела сборной трубы для обеспечения конструктивной безопасности водопропускного сооружения при работе в насыпи двухпутного земляного полотна. В качестве конструктивного решения предлагается система восстановления и усиления тела сборной трубы, включающая поверхностное армирование зон стыковых соединений углепластиковым материалом типа Wrab, футеровка внутренней поверхности трубы, например полимерной навивкой по технологии «Сатурн» с последующим заполнением межтрубного пространства полимерцементным раствором. Способ усиления водопропускных труб успешно применяется в ОАО «РЖД» Октябрьской железной дороге на Мурманском, Московском и Витебском направлениях [14].

## Библиографический список

1. Прокудин И. В. Распространение в железнодорожных насыпях колебаний, возникающих от проходящих поездов / И. В. Прокудин // Вопросы земляного полотна и геотехники на железнодорожном транспорте. — 1980. — Вып. 208/29. — С. 24–30.

2. Смолин Ю. П. Исследование колебаний двухпутных железнодорожных насыпей от поездной нагрузки / Ю. П. Смолин // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. — 1986. — № 5. — С. 1–20.
3. Кузахметова Э. К. Учет особенностей механического отклика слабых грунтов на действие внешней нагрузки на примере линейных транспортных сооружений / Э. К. Кузахметова, Я. О. Пономарев, Н. С. Степаненко // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов: материалы Общероссийской научно-практической конференции. — 2019. — С. 15–25.
4. Дыдышко П. И. Осадки пути и горизонтальные перемещения рельсовпод поездной нагрузкой / П. И. Дыдышко, В. В. Макаров // Вестник ВНИИЖТА. — 2010. — № 1. — С. 19–21.
5. Коншин Г. Г. Работа земляного полотна под поездами / Г. Г. Коншин. — Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. — 208 с.
6. Колос А. Ф. Прогнозирование несущей способности и деформативности подшпального основания при повышенных вибродинамических нагрузках / А. Ф. Колос, Е. И. Шехтман, В. В. Говоров и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2018. — № 2. — С. 60–66.
7. Серебряков Д. В. Исследование колебательных процессов в земляном полотне на участках сопряжения с мостами / Д. В. Серебряков, А. А. Конон, В. В. Ганчиц // Путь и путевое хозяйство. — 2017. — № 9. — С. 9–11.
8. Александров А. С. Исследование вертикальных напряжений в земляном полотне с учетом распределяющей способности грунтов / А. С. Александров, Н. П. Александрова, Н. В. Кузин и др. // Транспортное строительство. — 2010. — № 8. — С. 18–21.
9. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общей ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. — М.: АСВ, 2016. — 1040 с.
10. Караулов А. М. Определение предельных давлений на ограждения учетом сейсмических воздействий / А. М. Караулов, К. В. Королев, Ю. П. Смолин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 4(43). — С. 49–53.
11. Саммаль А. С. Аналитический метод определения напряженного состояния многослойной обделки, создаваемой в результате восстановительного ремонта коллекторного тоннеля / А. С. Саммаль, О. М. Левищева, Т. Г. Саммаль // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2013. — № 1. — С. 158–163.
12. Патент № 2016100526 Российская Федерация RU 2620478 С1. Конструкция для внутренней защиты водопропускных систем и способ восстановительных работ с ней (варианты). Заявка № от 11.01.2016.
13. Церех С. Г. Прогнозирование поведения водопропускных труб с учетом деформаций и повреждений эксплуатационного характера / С. Г. Церех, И. Г. Овчинников // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. — 2022. — № 3. — С. 79–87.
14. Перминов Н. А. Инновационная геотехнология ремонта водопропускных сооружений / Н. А. Перминов, И. П. Сафонов, А. Н. Перминов // Путь и путевое хозяйство. — 2017. — № 9. — С. 16–21.

Дата поступления: 04.04.2023

Решение о публикации: 10.05.2023

**Контактная информация:**

ПЕРМИНОВ Николай Алексеевич — канд. техн. наук, доц.; perminov-n@mail.ru

## On the Operation of a Combined Culvert in the Body of a Double-Track Embankment

N. A. Perminov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Perminov N. A. On the Operation of a Combined Culvert in the Body of a Double-Track Embankment. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 41–53. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-41-53

### Summary

**Purpose:** To find out features of operation of precast reinforced concrete culverts in the embedding soil bulk of the two-track embankment with account of interaction of precast culvert structures and soil for the case of oppositely directed towards the first and second tracks combination of horizontal components of train loads at opposite transit of trains in the culvert area; to propose on selection of methods of reinforcement of culvert structures with account of conditions of their operation in the two-track subgrade. **Methods:** The analysis and use of analytical and experimental research methods for evaluating operation of culverts in the body of the subgrade including two-track sections of railway. Analytical comparison of research results and data of instrumental observations. **Results:** There have been identified the features of interaction of the body of the precast culvert with the body of the two-track embankment at oppositely directed horizontal components of the train load, there has been analyzed the nature of distribution of stress-strain state of the embedding soil bulk of the two-track subgrade along the culvert body. There has been demonstrated a negative influence of the combination of oppositely directed towards the first and second tracks combination of horizontal components of train loads at opposite transit of trains on the body of the precast culvert in the embankment of two-track sections. **Practical significance:** The obtained results concerning the stress-strain behavior of the embedding soil bulk and distribution of forces along the culvert body at combination of oppositely directed horizontal actions at the two-track subgrade allowed identifying the nature of their joint operation and, based on it, proposing on selection of methods of reinforcement of culvert structures with account of conditions of their operation in the subgrade of two-track parts of railways.

**Keywords:** Precast culvert, two-track subgrade, train load, horizontal component of load, active/passive pressures, methods of reinforcement of structures.

### References

1. Prokudin I. V. Rasprostranenie v zheleznodorozhnykh nasypakh kolebaniy, voz-nikayushchikh ot prokhodyashchikh poezdov [Propagation in railway embankments of oscillations arising from passing trains]. *Voprosy zemlyanogo polotna i geotekhniki na zheleznodorozhnom transporte* [Issues of subgrade and geo-technics in railway transport]. 1980, Iss. 208/29, pp. 24–30. (In Russian)
2. Smolin Yu. P. Issledovanie kolebaniy dvukhputnykh zheleznodorozhnykh nasypey ot poezdnoy nagruzki [Study of vibrations of double-track railway embankments from train loads]. *Izvestiya vuzov. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Izvestiya vuzov. Series: Construction and architecture tour]. 1986, Iss. 5, pp. 1–20. (In Russian)

3. Kuzakhmetova E. K., Ponomarev Ya. O., Stepanenko N. S. Uchet osobennostey mekhanicheskogo otklika slabykh gruntov na deystvie vneshney nagruzki na primere lineynykh transportnykh sooruzheniy [Taking into account the peculiarities of the mechanical response of weak soils to the action of an external load on the example of linear transport structures]. *Polevye i laboratornye metody issledovaniya gruntov: materialy Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Field and laboratory methods of soil research: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. 2019, pp. 15–25. (In Russian)

4. Dydyshko P. I., Makarov V. V. Osadki puti i gorizontal'nye peremeshcheniya rel'sovpod poezdnoy nagruzkoj [Settlement of the track and horizontal movement of rails under train load]. *Vestnik VNIIZhTA* [Vestnik VNIIZhTA]. 2010, Iss. 1, pp. 19–21. (In Russian)

5. Konshin G. G. *Rabota zemlyanogo polotna pod poezdami* [Work of subgrade under trains]. Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012, 208 p. (In Russian)

6. Kolos A. F., Shekhtman E. I., Govorov V. V. Prognozirovaniye nesushchey sposobnosti i deformativnosti podshpal'nogo osnovaniya pri povyshennykh vibrodinamicheskikh nagruzkakh [Forecasting the bearing capacity and deformability of the under-sleeper base under increased vibrodynamic loads]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2018, Iss. 2, pp. 60–66. (In Russian)

7. Serebryakov D. V., Konon A. A., Ganchits V. V. Issledovanie kolebatel'nykh protsessov v zemlyanom polotne na uchastkakh sopryazheniya s mostami [Study of oscillatory processes in the subgrade at the intersections with bridges]. *Put'i i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2017, Iss. 9, pp. 9–11. (In Russian)

8. Aleksandrov A. S., Aleksandrova N. P., Kuzin N. V. et al. Issledovanie vertikal'nykh napryazheniy v zemlyanom polotne s uchetom raspredelyayushchey sposobnosti gruntov [Study of vertical stresses in the subgrade, taking into account the distribution capacity of soils]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction]. 2010, Iss. 8, pp. 18–21. (In Russian)

9. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamente i podzemnye sooruzheniya; pod obshchey red. V. A. Il'icheva i R. A. Mangusheva* [Handbook of geotechnics. Foundations, Foundations and Underground Structures. Ed. V. A. Ilyichev and R. A. Mangushev]. Moscow: ASV Publ., 2016, 1040 p. (In Russian)

10. Karaulov A. M., Korolev K. V., Smolin Yu. P. Opredeleniye predel'nykh davleniy na ograzhdeniya uchetom seysmicheskikh vozdeystviy [Determination of limiting pressures on fences taking into account seismic impacts]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2017, Iss. 4(43), pp. 49–53. (In Russian)

11. Sammal' A. S., Levisheva O. M., Sammal' T. G. Analiticheskiy metod opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya mnogoslnoy obdelki, sozdavaemoy v rezul'tate vosstanovitel'nogo remonta kollek-tornogo tonnelya [Analytical method for determining the stress state of a multilayer lining created as a result of the restoration repair of a collector tunnel]. *Izvestiya Tul'skogo*

*gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Izvestiya Tula State University. Earth Sciences]. 2013, Iss. 1, pp. 158–163. (In Russian)

12. Perminov N. A. *Konstruktsiya dlya vnutrenney zashchity vodopropusknykh sistem i sposob vosstanovitel'nykh rabot s ney (varianty)* [Structure for internal protection of culvert systems and method of restoration work with it (options)]. Patent RF, no. 2016100526, 2016. (In Russian)

13. Tserekh S. G., Ovchinnikov I. G. Prognozirovanie povedeniya vodopropusknykh trub s uchetom de-formatsiy i povrezhdeniy ekspluatatsionnogo kharaktera [Forecasting the behavior of culverts, taking into account deformations and operational damage]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology]. 2022, Iss. 3, pp. 79–87. (In Russian)

14. Perminov N. A., Safonov I. P., Perminov A. N. Innovatsionnaya geotekhnologiya remonta vodopropusknykh sooruzheniy [Innovative geotechnology for the repair of culverts]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities]. 2017, Iss. 9, pp. 16–21. (In Russian)

Received: April 04, 2023

Accepted: May 10, 2023

**Author's information:**

Nikolai A. PERMINOV — PhD in Engineering, Associate Professor; perminov-n@mail.ru