
БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КРИТИЧНЫХ ИНФРАСТРУКТУР И ТЕРРИТОРИЙ

DOI 10.15826/rjctst.2025.2.011

УДК 624.131.5:625.08

Н. А. Перминов¹, А. О. Кузьмина², Г. Д. Шевченко³, С. П. Щипанов⁴

^{1,2,3,4} Петербургский Государственный университет путей сообщения (ПГУПС), г.

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: ¹ perminov-n@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ЗАЩИТА

Аннотация. Разработка комплексного подхода к выбору и обоснованию методов защиты длительно эксплуатируемых водопропускных труб объектов водоотведения сложных грунтовых условиях с учетом увеличения поездных нагрузок, скоростей движения поездов и различных режимов природно-техногенных воздействий является сложной геотехнической задачей. Необходимость исследования вопросов первичной защиты от природных и техногенных воздействий сопряженных линейных сооружений в теле насыпей вызвано актуальной потребностью обеспечить эксплуатационную надежность транспортной инфраструктуры для устойчивого развития крупных городов. На примере анализа работы длинномерных водопропускных труб на слабых грунтах оснований насыпей при различных способах увеличения их конструкционной безопасности. Предложена методика и алгоритм проведения совместных геотехнических и конструкторских расчетов, позволяющих моделировать процессы взаимодействия оболочки трубы с грунтовым массивом насыпи и прогнозировать параметры их совместной работы и методы защиты. Рассматривается сочетание способов геотехнической и конструкционной защиты водопропускных труб и показана область их рационального применения для обеспечения конструкционной безопасности сооружения в условиях возрастающих поездных нагрузок и скоростей движения составов.

Ключевые слова: водопропускное сооружение, высокие нагрузки, методы защиты, геотехника, моделирование

Для цитирования: Перминов Н. А., Кузьмина А. О., Шевченко Г. Д., Щипанов С. П. Моделирование взаимодействия транспортных и подземных линейных инженерных сооружений и их защита // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – № 2. – 1102011. – DOI 10.15826/rjctst.2025.2.011.

*N. A. Perminov*¹, *A. O. Kuzmina*², *G. D. Shevcenko*³, *S. P. Shchipanov*⁴

^{1,2,3,4} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), St. Petersburg, Russia

e-mail: ¹ perminov-n@mail.ru

MODELING THE INTERACTION OF TRANSPORT AND UNDERGROUND LINEAR ENGINEERING STRUCTURES AND THEIR PROTECTION

Abstract. The development of an integrated approach to the selection and justification of methods for the protection of long-term water pipes for wastewater disposal facilities in difficult ground conditions, taking into account the increase in train loads, train speeds and various modes of natural and man-made impacts, is a complex geotechnical task. The need to study the issues of primary protection from natural and man-made impacts of associated linear structures in the body of embankments is caused by the urgent need to ensure the operational reliability of transport infrastructure for the sustainable development of large cities. Using the example of analyzing the operation of long-length culverts on weak soils of embankment bases with various ways to increase their structural safety. A methodology and algorithm for conducting joint geotechnical and design calculations are proposed, which make it possible to simulate the processes of interaction between the pipe shell and the embankment soil mass and predict the parameters of their joint operation and protection methods. A combination of geotechnical and structural protection methods for culverts is considered and the scope of their rational use is shown to ensure the structural safety of structures in conditions of increasing train loads and train speeds.

Key words: culvert, high loads, protection methods, geotechnics, modeling

For citation: Perminov N. A., Kuzmina A. O., Shevcenko G. D., Shchipanov S. P. (2025) Modeling the interaction of transport and underground linear engineering structures and their protection. Russian Journal of Construction Science and Technology. 11(2). 1102011. (In Russ.) DOI 10.15826/rjct.2025.2.011.

1. Введение

В условиях интенсивного транспортного строительства особую актуальность приобретают вопросы, связанные с разработкой методов защиты объектов инженерной инфраструктуры, попадающих в зону влияния при реконструкции и развитии городской и магистральной транспортной сети. Реконструкция станций и строительство логистических транспортных узлов часто осуществляются в зонах, сопряженных с городской исторической застройкой, характеризующейся наличием уникальных сооружений инженерной инфраструктуры. [1, 2]. Анализ многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых показывает, что в

условиях интенсивного городского и жилищного строительства основное внимание уделялось защите инженерных сооружений от воздействий, связанных с возведением объектов промышленного и гражданского строительства [3, 4]. Воздействия на окружающую застройку и подземные инженерные сооружения от возведения объектов городской инфраструктуры значительно отличаются по характеру и интенсивности от воздействий, связанных со строительством объектов транспортной инфраструктуры, включая железные и автомобильные дороги, мосты и тоннели различного назначения [5, 6].

Актуальность исследования водопропускных сооружений, расположенных

в основании железнодорожных насыпей, определяется сочетанием факторов, связанных с их длительной эксплуатацией, ростом нагрузок на ось и скоростями движения до 300 км/час подвижного состава, изменением инженерно-геологических условий, физическим износом, вследствие чего несоответствии проектной и действующей нормативной документации. В этой связи снижаются поездные нагрузки, вводятся скоростные ограничения и пропуская способность железной дороги уменьшается. По данным исследований, длительно эксплуатируемые подземные инженерные сооружения, включая трубы, коллекторы и тоннели, имеют высокие показатели физического износа и ежегодный прирост дефектности до 2 % в год [7].

2.2. Объект исследования

Особенно остро проблема защиты транспортных водопропускных сооружений проявляется в длительно эксплуатируемых конструкциях, размещенных в слабых водонасыщенных грунтах, где даже небольшие отклонения параметров среды приводят к развитию деформаций и снижению несущей способности.

Согласно данным паспорта сооружения, труба имеет:

- полную длину 99,25 м;
- два эксплуатационных участка (1934 г.);
- овальное отверстие переменной высоты 2,6–3,1 м;
- основание из слабых водонасыщенных суглинков и супесей;
- отсутствие железобетонной рубашки или современных усиления;
- признаки эксплуатации в сложных инженерно-геологических условиях.

Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «насыпь-труба-основание» и обоснование технологий усиления трубы в условиях реконструк-

ции железнодорожной инфраструктуры, включая применение методов усиления конструкции и армирования грунтовой среды.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Собрать исходные данные по сооружению (паспорт, геологические сведения).
2. Описать геологическое строение основания и выделить слабые слои, влияющие на НДС.
3. Построить геометрическую цифровую модель насыпи и трубы.
4. Провести моделирование в PLAXIS с определением НДС:
 - в существующем состоянии;
 - при приложении эксплуатационной нагрузки 100 кПа;
 - при использовании слоя армирования (георешетки).
5. Выполнить сравнительный анализ вариантов: без усиления/ с усилением.
6. Оценить эффективность усиления и необходимость санации трубы с помощью конструкторского расчета.
7. Разработать концепцию усиления трубы методом навивки (санации) с повышением пространственной жесткости.

Конструкция трубы (рис. 1) представляет собой сводчатое каменное сооружение длиной 98 м, имеющее овальное поперечное сечение и расположенное под двухпутной железнодорожной насыпью высотой 8,86 м. По данным технической документации и результатов обследования, минимальное заглубление верха трубы составляет 5,46 м от уровня подошвы рельса. Толщина стенки свода трубы, определенная по материалам обследования и архивным данным, составляет 0,30 м.

По уточненным данным обследования 2016 года сооружение состоит из двух участков овального сечения (табл. 1).

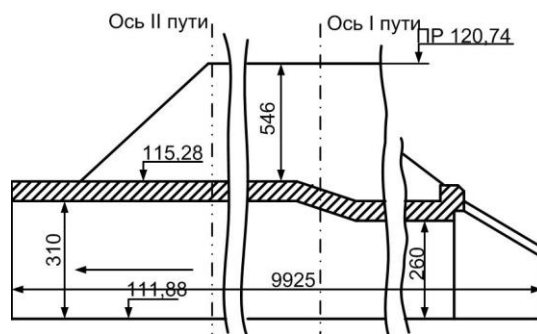


Рис. 1. Поперечный профиль трубы (рисунок авторов)

Таблица 1

Характеристика участков трубы

№ участка	Год постройки	Длина, м	Высота отверстия, м	Материал	Тип сечения
1	1934	59,0	3,1	Каменная кладка	Овальное
2	1934	40,25	2,6	Каменная кладка	Овальное

Труба обеспечивает пропуск малых водотоков и выполняет важную функцию поддержания стабильности гидрологического режима на участке пути. В процессе длительной эксплуатации сооружение подверглось воздействию природных и техногенных факторов, что привело к частичной деградации каменной кладки и необходимости разработки инженерных решений по уси-

лению и восстановлению ее несущей способности.

Участок характеризуется сложным инженерно-геологическим строением, типичным для водно-ледниковых равнин с развитой аллювиальной сетью. В табл. 2 приведены инженерно-геологические элементы залегающие в основании насыпи.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтов

№ слоя	Наименование грунта	$\gamma_{unsat}/\gamma_{sat}$, кН/м ³	c' , кПа	ϕ' , °	E , МПа	ν	k , м/сут	Модель
1	Насыпь (суглинок уплотненный)	18,5 / 20,0	10	28	45	0,33	0,5	Mohr–Coulomb
2	Суглинок мягкопластичный	17,5 / 19,0	7	22	8	0,35	0,05	Mohr–Coulomb
3	Супесь мелкая	18,0 / 19,5	1	33	60	0,30	100	Mohr–Coulomb
4	Песок плотный	19,0 / 20,0	1	38	150	0,27	800	Mohr–Coulomb
5	Верхнее строение пути (щебёночная подушка)	18,5/20	1	42	110	0,30	5000	Mohr–Coulomb

3. 3. Методика и методы исследования

Методика исследования основана на применении численного геотехнического и конструкторского моделирования, позволяющего оценить напряженно-деформированное состояние водопропускной трубы в составе железнодорожной насыпи и обосновать эффективность предложенных мероприятий по ее усилению. Численный анализ выполнен в рамках методов механики грунтов и теории упругости, с использованием программного комплекса PLAXIS 2D, предназначенного для моделирования взаимодействия сооружений с основанием в нелинейных постановках [8, 9].

Расчетная область сформирована с учетом затухания деформаций за границами зоны влияния сооружения. Ширина области принята 60 м, глубина – 18 м, высота насыпи – 8,86 м. Каменная водопропускная труба моделируется как замкнутый контур, соответствующий ее фактическим размерам: внутренний диаметр около 3,0 м, толщина стенки 0,30 м. Внутреннее пространство заполнено материалом с пониженной жесткостью, имитирующим воздушную полость.

Грунтовые слои заданы в соответствии с инженерно-геологическими данными участка. Для всех слоев используется модель *Mohr–Coulomb*, позволяющая описать основные характеристики деформации и прочности грунтов при инженерных расчетах [10].

Оболочка трубы моделируется элементом *Plate* типа *Elastic*. Эквивалентные жесткости определяются по толщине стенки $t = 0,30$ м:

$$EA = E \times t \quad (1)$$

$$EI = E \times t^3 / 12, \quad (2)$$

где $E = 12\,000$ МПа, $\nu = 0.20$.

Такой подход обеспечивает корректное воспроизведение работы каменной кладки.

Расчетная область включает тело насыпи высотой 8,86 м, водопропускную трубу длиной 99,25 м, а также слоистое основание, состоящее из шести геотехнических слоев.

Эксплуатационная нагрузка задана на поверхности насыпи в виде равномерно распределенного давления $p = 100$ кПа, моделирующего совместное воздействие веса пути, подвижного состава и технологических нагрузок. Собственный вес грунтов учитывается автоматически через гравитационное моделирование (рис. 2).

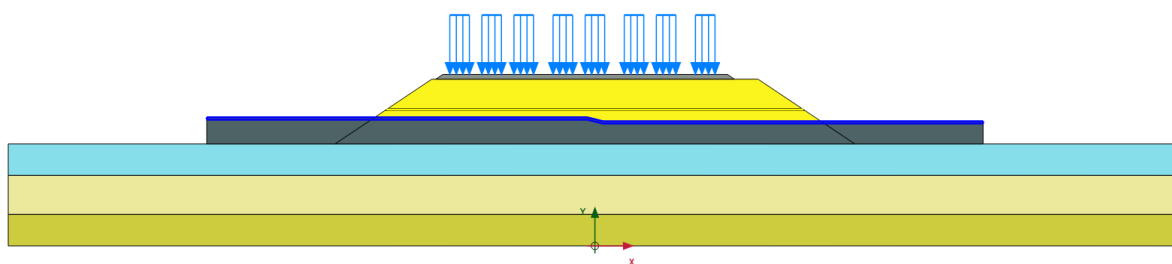


Рис. 2. Расчетная упрощенная модель (нагрузка на пути сортировочной станции)

4. Геотехническое моделирование

Геотехнический расчет выполнен для оценки напряженно-деформированного состояния системы «железнодорожная насыпь – водопропускная труба – грунтовое основание» в существующем состоянии и при воздействии экс-

плуатационной нагрузки от подвижного состава. Расчет проводился методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 2D, что позволило учесть нелинейные свойства грунтов, работу трубной конструкции и изменения напряженного состояния при при-

ложении вертикальной нагрузки.

Расчёт выполнен в несколько этапов:

- моделирование текущего состояния (вариант «без усиления»);
- моделирование варианта с армированием верхней части насыпи георешёткой (вариант «усиление»);
- сравнительный анализ влияния армирования на осадки, распределение пластических зон и коэффициент устойчивости.

В расчете рассмотрено несколько сочетаний нагрузок:

1. Поездная нагрузка прикладывается на 4 и 5 пути;
2. На все 8 путей сортировочной станции;
3. На 3, 4, 5 и 6 пути станции;
4. На 1 и 2 пути.

Наиболее неблагоприятный случай сочетание приложений нагрузки на 8 путей станции.

Эксплуатационная нагрузка от подвижного состава принята в виде равномерно распределённого давления $q = 100$ кПа, что соответствует верхней оценке динамического напряжения на основной площадке земляного полотна по «Методике расчёта осадки земляного полотна железнодорожного пути» (ОАО «РЖД», 2022) и обеспечивает консервативный характер расчёта. Нагрузка прикладывается на полосу шириной 2,7 м в зоне пути, что отражает реальные условия передачи нагрузок от конструкции

верхнего строения пути через шпалы и балласт.

4.1. Расчетная ситуация «без усиления»

В исходном варианте (без применения георешетки и других мероприятий по усилению) на верхнюю поверхность насыпи была приложена эксплуатационная нагрузка 100 кПа, моделирующая воздействие верхнего строения пути и подвижного состава на балластный слой. Полученные результаты показывают:

- формирование вертикальных перемещений трубы в пределах 0,46–0,57 м;
- плавное распределение деформаций без локальных провалов или признаков потери устойчивости;
- отсутствие протяженных пластических зон в слабом слое.

Изополя вертикальных перемещений показывают формирование характерного провиса над сводом трубы, связанного с концентрацией нагрузки в зоне слабого суглинка. Максимальное значение осадки достигает 57 см (рис. 3–4).

Коэффициент устойчивости $K_{уст} = 1,269 > 1,0$, что указывает на то, что система в существующем состоянии сохраняет устойчивость при приложении эксплуатационной нагрузки 100 кПа и обладает положительным запасом несущей способности (рис. 5–6).

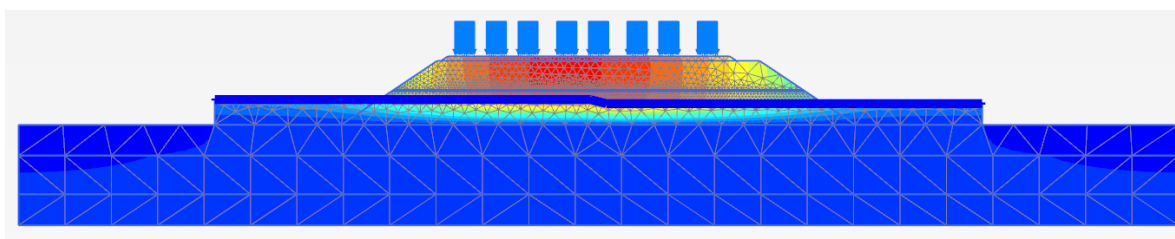


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений (осадок) $u_y = -0,5713$ м. После приложения нагрузки

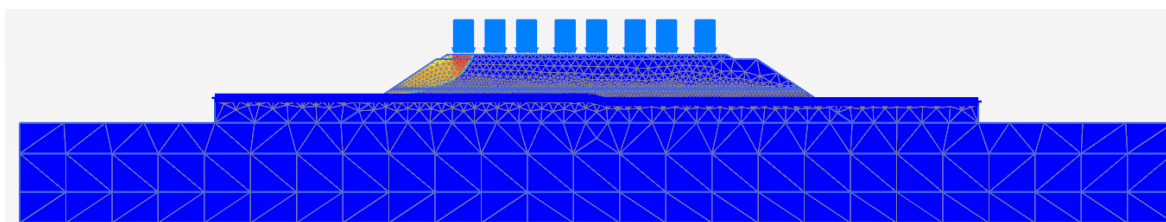


Рис. 4. Изополя полных перемещений. Теоретическая кривая обрушения. $K_{уст}=1,269$

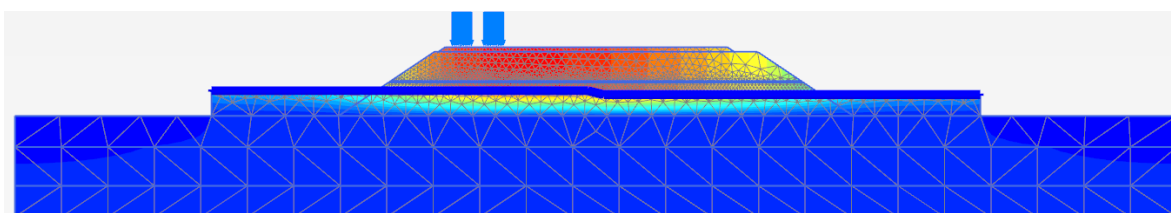


Рис. 5. Изополя вертикальных перемещений (осадок) $u_y = -0,46\text{м}$. После приложения нагрузки

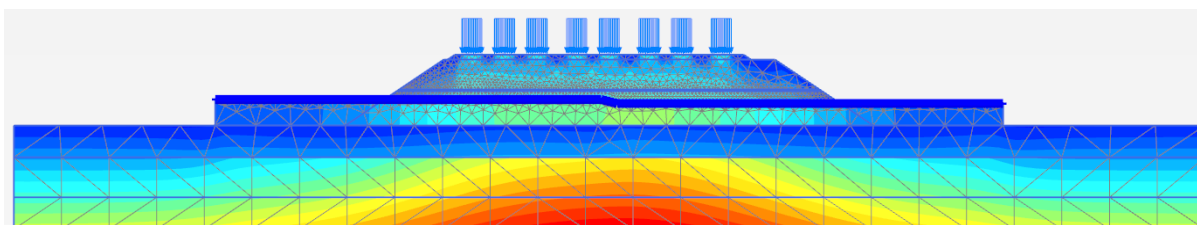


Рис. 6. Вертикальные напряжения нормальные $\sigma_{yy}=4,383 \text{ кН/м}^2$

4.2. Расчетная ситуация «усиление»

В рамках анализа эффективности мероприятий по усилению была рассмотрена расчетная ситуация с включением георешетки в тело железнодорожной насыпи над сводом водопропускной трубы. Георешетка моделировалась элементом Geogrid с эквивалентной продольной жесткостью $EA_1 = 400 \text{ кН/м}$. Армирующий слой был размещен на расстоянии 1,0 м выше свода трубы, что согласуется с технологией усиления насыпей без вмешательства в конструкцию водопропускного сооружения.

Вдоль георешетки формируется зона повышенной жесткости. Этот эффект

формирует композитный армированный слой (КС), воспринимающий растягивающие усилия, в то время как прилегающий грунт работает на сжатие. Данная зона выполняет функцию «жесткого пояса» в верхней части насыпи.

После включения нагрузки 100 кПа и активации армирующего слоя были получены изополя вертикальных перемещений, приведенные на рис. 7. Максимальное оседание составило 57 см (рис. 7).

Построенная на основе нелинейного анализа кривая обрушения показала, что при увеличении нагрузки запас несущей способности исчерпывается при $K_{уст} = 1,33$.

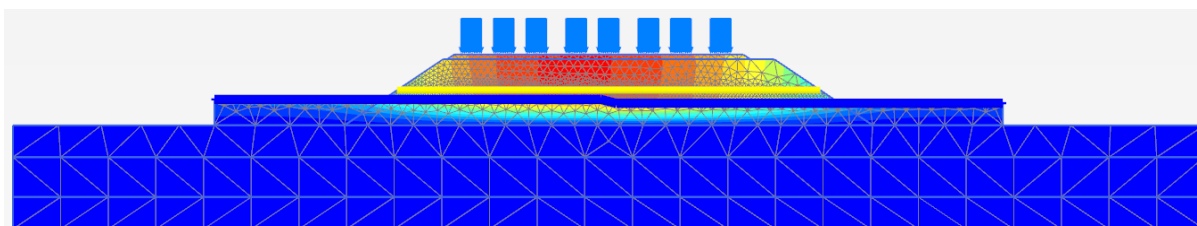


Рис. 7. Изополя вертикальных перемещений (осадок) $u_y = -0,5705\text{м}$. После приложения нагрузки

4.3. Сравнение вариантов (без усиления / с усилением)

По результатам расчетов консервативной оценки статического приложения поездной нагрузки на балластный слой насыпи в таблицах 3 и 4 представлены значения деформаций насыпи и коэффициентов запаса устойчивости без мероприятий усиления в сравнении с

усиленным георешеткой грунтом. Сопоставительные результаты расчетов приведены в таблицах 3, 4 и 5.

Введение георешетки увеличивает коэффициент устойчивости $K_{уст}$ примерно на 6–7%, что свидетельствует о положительном эффекте армирования на сопротивление сдвиговым деформациям.

Таблица 3

Значения осадок при различных сочетаниях нагрузок

Сочетание нагрузок	Вертикальные перемещения u без усиления, м	Вертикальные перемещения u с усилением георешеткой и композитным слоем, м
4 и 5 пути	0,4774	0,4764
8 путей	0,5713	0,5705
3–6 пути	0,5211	0,5202
1 и 2 пути	0,4615	0,4610

Таблица 4

Значения коэффициента устойчивости при различных сочетаниях нагрузок

Сочетание нагрузок	Куст без усиления	Куст с усилением георешеткой и композитным слоем
8 путей	1,269	1,332
1 и 2 пути	1,258	1,345

Таблица 5

Значения напряжений в конструкции обделки трубы

Сочетание нагрузок	Вертикальные напряжения нормальные σ_{yy} , кН/м ²	Горизонтальные напряжения нормальные σ_{xx} , кН/м ²	Продольная сила в своде трубы N , кН/м	Поперечная сила в своде трубы Q , кН/м	Изгибающий момент в своде трубы M , кН·м/м
4 и 5 пути	4,376/4,375	3,698/3,922	257,1/259,2	45,10/46,23	127,8/132,1
8 путей	4,383/4,383	3,710/14,16	324,7/330,1	49,43/50,21	181,4/181,3
3–6 пути	4,375/4,373	4,526/4,099	290,5/293,0	44,51/45,73	152,6/150,0
1 и 2 пути	4,380/17,40	4,173/6,350	214,4/215,4	45,26/46,29	147,2/151,1

В числителе даны значения без усиления тела насыпи, в знаменателе с усилением

4.4. Выводы по геотехническому расчету

По результатам геотехнического моделирования установлено, что основная часть осадок формируется в верхней части железнодорожной насыпи, поскольку трубная конструкция работает как жёсткий распределяющий элемент и частично перераспределяет нагрузку на основание. Армирование насыпи георешёткой приводит к локальному увеличению её жёсткости и росту коэффициента устойчивости. Таким образом, для повышения надёжности сооружения требуется не только армирование насыпи, но и конструктивное усиление самой трубы. Такой подход позволяет перераспределить напряжения, повысить пространственную жёсткость сооружения и обеспечить его безопасную эксплуатацию в условиях возрастающих нагрузок и реконструкции железнодорожной инфраструктуры.

Принятая концепция усиления конструкции трубы была основана на следующих предположениях.

В процессе эксплуатации водопропускная труба испытывала комплекс техногенных воздействий: увлажнение при прохождении малого водотока, давление грунта тела насыпи, поездные нагрузки, температурные деформации и процессы вымывания раствора обделки трубы. Это привело к снижению прочности каменной кладки. При реконструкции железнодорожного пути в связи с увеличением нагрузок от подвижного состава необходимо было разработать инженерное решение по усилению конструкции самого водопропускного сооружения, которое обес-

печило бы восстановление несущей способности и повышение эксплуатационной надёжности.

5. Конструкторский расчет трубы

Модель для расчета была выполнена в специализированном расчётном комплексе Midas GTS NX, предназначенного для расчета методом конечных элементов. Расчетная область была сформирована для 8-ми путного участка железнодорожной линии с учетом затухания деформаций за границами зоны влияния сооружения. Ширина и глубина принята равной 150 м, высота насыпи – 8,86 м. Каменная водопропускная труба смоделирована максимально приближено к исходным данным: толщина стенки – 0,3 м; внутренний пролет – 2,13 м; внутренняя высота – 2,6 и 3,1 м, соответственно для каждого участка трубы. Грунтовые слои заданы в соответствии с инженерно-геологическими данными участка. Для всех слоев используется модель Mohr–Coulomb, позволяющая описать основные характеристики деформации и прочности грунтов при инженерных расчетах. Для оболочки трубы используется модель Elastic. $E = 12\,000$ МПа; $\nu = 0,20$; $\gamma = 21,5$ кН/м³. Для моделирования полимерцементного состава используется модель Elastic. $E = 51\,750$ МПа; $\nu = 0,20$; $\gamma = 25$ кН/м³. Толщина слоя принимается 150 мм [11, 12].

Такой подход обеспечивает корректное воспроизведение работы каменной кладки без усиления и с усиление полимерцементным составом. Расчетная упрощённая модель (общий вид) представлена на рисунке 8.

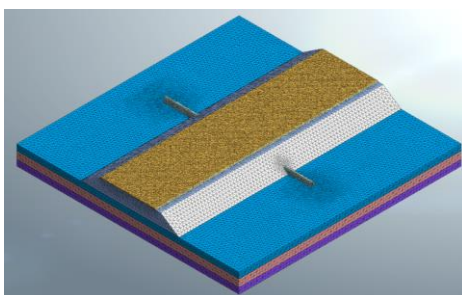


Рис. 8. Расчетная упрощённая модель (общий вид)

Расчеты производились в следующей последовательности:

1. Создание жесткого основания, уплотнение под собственным весом, формирование НДС.
2. Формирование тела трубы, насыпи и ВСП с последующим уплотнением

под собственным весом, формирование НДС.

По результатам расчета после усиления перемещения и растягивающие напряжения в зоне прогиба трубы не превышают предельно допустимых значений (рис. 9–10).

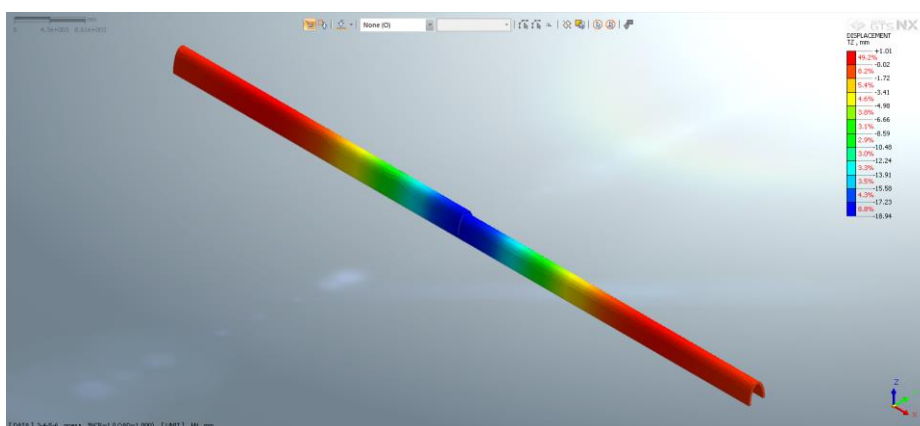


Рис. 9. Перемещения вдоль вертикальной оси ZZ

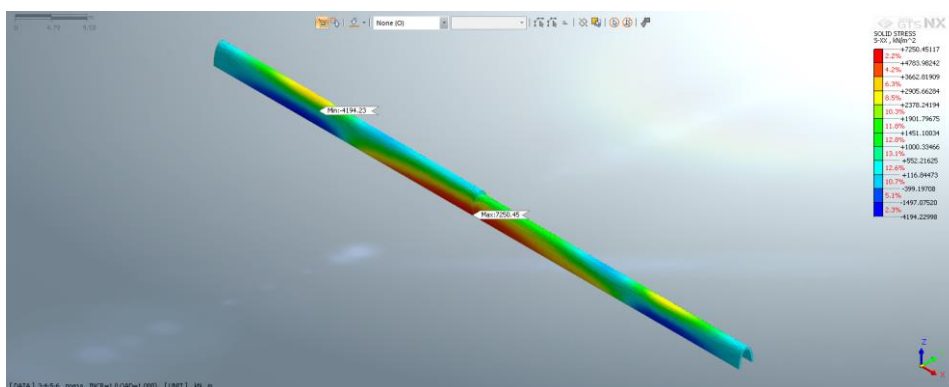


Рис. 10. Напряжения вдоль оси трубы (ось XX)

Расчётное конструктивное моделирование показало допустимый уровень напряжений в усиленной трубе по сравнению с исходным состоянием. Таким образом, конструкционное уси-

ление тела трубы повышает надёжность сооружения. Такой подход позволяет перераспределить напряжения, повысить пространственную жёсткость сооружения и обеспечить его безопасную

эксплуатацию в условиях возрастающих нагрузок и реконструкции железнодорожной инфраструктуры.

6. Заключение

Результаты численного моделирования позволили выявить наиболее уязвимые элементы системы «насыпь – труба – основание». Было установлено, что слабый суглинок оказывает доминирующее влияние на величину осадок и формирование напряженно–деформированного состояния тела длинноразмерной трубы.

Особое значение имеет применение метода конструкционного усиления водопропускной трубы по технологии санации и навивки. Этот метод позволяет сформировать новый силовой контур, повышающий пространственную жёсткость свода и перераспределяющий напряжения в теле сооружения. Конструктивное расчётное моделирование показало допустимый уровень напряжений в усиленной трубе по сравнению с исходным состоянием. Данное явление является нормальным и объясняется тем, что после усиления труба начинает активнее включаться в

работу по всей длине, воспринимая большую долю внешних нагрузок благодаря увеличенной жёсткости. Рост напряжений при этом не свидетельствует о снижении надёжности, а указывает на перераспределение усилий от деформируемых массивов грунта к усиленной конструкции. В конечном итоге это должно приводить к снижению относительных деформаций трубы и уменьшению концентрации растягивающих напряжений в каменной кладке.

Таким образом, выполненное исследование позволяет сформировать научно обоснованный подход к защите длительно эксплуатируемых инженерных водопропускных сооружений, работающих в сложных геотехнических условиях. Полученные результаты могут быть использованы в практике проектирования и реконструкции транспортных объектов, для разработки мер предупреждения техногенных рисков, связанных с подземными сооружениями, а также в образовательной и научной деятельности в области геотехники.

Благодарности

Настоящая статья написана при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Список используемых источников

1. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
2. Перминов, Н. А. Моделирование взаимодействия линейных подземных сооружений водоотведения с неоднородным грунтовым массивом с учетом сочетания воздействий / Н. А. Перминов // Проектирование и конструирование строительных систем. Строительная механика. Основания и фундаменты подземные сооружения. – 2024. – Т. 2.
3. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. – Москва : Госстрой России, 2004. – 48 с.
4. ОДМ 218.2.068–2016. Рекомендации по учету динамического воздействия от современных транспортных средств при расчетах прочности, устойчивости и деформативности земляного полотна. – Москва : Росавтодор, 2019. – 48 с.
5. СП 119.13330.2017. Земляное полотно железных дорог. Актуализированная редакция СНиП 32–01–95. – Москва : Минстрой России, 2017. – 114 с.

6. Zheng, Chunliang ; Li, Yongfeng ; Wei, Xiaohui, et al. Mechanical Simulation and Engineering Utilization of Limestone Tailings in Roadbed Construction / Chunliang Zheng, Yongfeng Li, Xiaohui Wei, etc. // *Frontiers in Built Environment*. – 2025. – Vol. 11. – Art. no. 1575453.
7. Лесов К., Таджибаев Ш., Мавланов А., Кенжалиев М. Расчёт устойчивости насыпи и укрепление откосов земляного полотна с использованием геосинтетических материалов / К. Лесов, Ш. Таджибаев, А. Мавланов, М. Кенжалиев // *Транспорт Шелкового Пути*. – 2021. – № 1.
8. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н. С. Булычев. – Москва : Недра, 1989. – 45–46 с.
9. Методика расчёта осадки земляного полотна железнодорожного пути : утв. ОАО «РЖД» 18 февраля 2022 г. № 423/р.
10. PLAXIS 2D Reference Manual. – Delft University of Technology/Bentley Systems, 2022. – 456 p.
11. PLAXIS 2D Material Models Manual. – Delft University of Technology/Bentley Systems, 2022. – 312 p.
12. Перминов, Н. А. Способ ремонта тоннельных коллекторов и подземных трубопроводов : пат. 2630629 Рос. Федерация / Н. А. Перминов и др.; заявл. 2016-04-15; опубл. 2017-10-24. – Бюл. № 26.

References

1. Federal Law No. 384-FZ Dated December 30, 2009 “Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures.” (*Legislation of the Russian Federation*).
2. Perminov, N. A. (2024). *Modeling the Interaction of Linear Underground Drainage Facilities With an Inhomogeneous Soil Mass Taking Into Account the Combination of Impacts. Design and Construction of Building Systems. Construction Mechanics. Foundations and Foundations Are Underground Structures*, t.
3. Manual on Designing the Road Surface on Weak Soils. (2004). Retrieved from Moscow.
4. ODM 218.2.068–2016. Recommendations on Taking Into Account Dynamic Effects of Modern Vehicles in Calculating Strength, Stability, and Deformability of Roadbed. (2019).
5. SP 119.13330.2017. Railroad Tracks. Updated Edition of SNIP 32-01-95. (2017). Moscow: Ministry of Construction of Russia.
6. Zheng, C., Li, Y., Wei, X., & et al. (2025). *Mechanical Simulation and Engineering Utilization of Limestone Tailings in Roadbed Construction. Frontiers in Built Environment*, vol. 11, article 1575453.
7. Lesov, K., Tajibaev, Sh., Mavlanov, A., & Kenzhaliev, M. (2021). *Calculation of the Stability of Embankments and Reinforcement of Roadbed Slopes Using Geosynthetic Materials. Silk Road Transport*, No. 1.
8. Bulychev, N. S. (1989). *Mechanics of Underground Structures in Examples and Tasks* (pp. 45–46). Moscow: Nedra.
9. Methodology for Calculating Precipitation of Railway Track Bed. Approved by JSC Russian Railways No. 423/r On February 18, 2022.
10. PLAXIS 2D Reference Manual. (2022). Delft University of Technology/Bentley Systems.
11. PLAXIS 2D Material Models Manual. (2022). Delft University of Technology/Bentley Systems.
12. Perminov, N. A., et al. (2017). Patent No. 2630629, Russian Federation. IPC F16L 55/165, F16L 55/163, B29C 53/78. *A Method for Repairing Tunnel Collectors and Underground Pipelines. Inventions. Useful Models.*, No. 26.

Получено: 04.12.25
Прошла рецензирование: 15.12.25
Принята к публикации: 26.12.25
Доступно он-лайн: 29.12.25

Received: 04.12.25
Revised: 15.12.25
Accepted: 26.12.25
Available on-line: 29.12.25