

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

<https://doi.org/10.17816/transsyst634982>

© Д.Ю. Цыбин, Н.А. Ермошин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Санкт-Петербург, Россия)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Анализируются факторы и методы обеспечения надежности металлических водопропускных труб в целях безаварийной эксплуатации автомобильных дорог. Особое внимание уделяется методам расчета конструкций с кольцевым сечением. Результатом работы являются выводы о необходимости их развития в целях обеспечения долговечности и безотказности труб посредством учета стохастического характера параметров нагрузок, конструкционных материалов и условий эксплуатации. Решение этой задачи возможно на основе оценки показателей надежности труб методами имитационного моделирования.

Ключевые слова: стальные гофрированные трубы; метод расчета по предельным состояниям; метод расчета тоннельных обделок; метод конечных элементов; нагрузки на водопропускные трубы.

Как цитировать:

Цыбин Д.Ю., Ермошин Н.А. Анализ методов расчета водопропускных сооружений автомобильных дорог // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 3. С. 320–337. doi: 10.17816/transsyst634982

Section 1. TECHNOLOGY AND PROJECTS

Subject – Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels

© **D.Yu. Tsybin, A.E. Ermoshin**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(St. Petersburg, Russia)

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR ROAD CULVERT STRUCTURES

This analysis focuses on the factors and methods for ensuring the reliability of metal culverts, which are essential for the trouble-free operation of motorways. Special attention is paid to the calculation methods for structures with annular cross-sections. The results of the work are conclusions about the necessity of their annular cross-section. They also conclude the importance of developing these structures to enhance culverts' durability and failure-free operation. This involves considering the stochastic nature of load parameters, structural materials, and operating conditions. Addressing this issue is possible through the assessment of reliability indicators for culverts using simulation modeling methods.

Keywords: steel corrugated culverts; limit state design method; tunnel lining design method; finite element method; culvert loads.

To cite this article:

Tsybin DYu, Ermoshin NA. Analysis of calculation methods for road culverts structures. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2024;10(3):320–337. doi: 10.17816/transsyst634982

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги пересекают множество водотоков, что требует устройства большого количества водопропускных сооружений, основными из которых являются водопропускные трубы. Качество проектирования рассматриваемых сооружений напрямую зависит от разработанности типовых проектов, так как абсолютное большинство водопропускных труб в стране проектируются с учетом их рекомендаций. При этом типовые проекты основаны на расчетах, не учитывающих стохастический характер параметров материалов сооружения и нагрузок, действующих на конструкции. Данное обстоятельство является одной из основных причин, по которой водопропускные трубы не выдерживают межремонтные сроки.

Научная проблема заключается в отсутствии на сегодняшний день методов прогнозирования срока службы водопропускных труб с учетом режима работы и сочетания действующих нагрузок, что может быть достигнуто оценкой показателей их надежности. Решение этой проблемы аналитическими методами ввиду множества случайных факторов, оказывающих влияние на долговечность работы водопропускных сооружений, является весьма трудоемким и сложным. Наиболее приемлемым методом исследования в данном случае является построение имитационной модели работы металлических водопропускных труб для исследования воздействия на них деструктивных факторов и оценки эффективности технических и технологических решений для повышения их надежности.

Таким образом, целью данной работы является анализ методов расчета водопропускных труб, на основе которого будет возможным сделать обоснованные выводы о необходимости их усовершенствования в направлении обеспечения безотказной работы сооружений, который может быть усовершенствован путем применения имитационного моделирования, что в свою очередь позволит учесть стохастический характер нагрузок и параметров материалов.

Для достижения поставленной цели, требуется выполнение ряда задач:

- 1) Анализ факторов, негативно влияющих на долговечность водопропускных труб.
- 2) Литературный обзор существующих методов расчета водопропускных труб.

- 3) Оценка методов расчета водопропускных труб на основе ряда критериев:
- а. точность метода в сравнении с натурными испытаниями;
 - б. уровень проработанности метода;
 - в. возможность детализации и рассмотрения сложных систем;
 - г. адаптивность применения к рассматриваемым конструкциям.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются стальные круглые гофрированные водопропускные трубы, применяемые для пропуска водотоков под насыпью автомобильных дорог. В качестве основного метода исследования в данной статье применяется аналитический обзор существующих методов расчета водопропускных труб с целью поиска оптимального метода и возможностей его усовершенствования.

Факторы, негативно влияющие на долговечность водопропускных труб, можно разделить на две основные группы:

- 1) Факторы окружающей среды, такие как, агрессивность водной среды по отношению к стали и железобетону и расход водного потока, пропуск которого должна обеспечить конструкция. Решение данных задач сводится к назначению допустимого размера отверстия трубы и мер по повышению износостойкости конструкции.
- 2) Проектные вертикальные нагрузки на конструкцию. Решение данной задачи сводится к назначению необходимой толщины стенки трубы. Следовательно, исследование надежности металлических водопропускных труб, в первую очередь, требует анализа воздействующих на них нагрузок.

В данной работе рассматриваются методы расчета водопропускных труб, учитывающие вторую группу факторов, то есть направленных на решение задачи о требуемой толщине стенки трубы, при назначенном заранее отверстии трубы, обеспечивающим пропуск расчетного расхода воды, при заданном режиме работы.

Согласно классификации, представленной в своих исследованиях Г. Клейном [1], спиральновитые гофрированные трубы относятся к пластичным и гибким конструкциям. Это обстоятельство означает, что грунт засыпки оказывает существенное сопротивление при деформациях трубы, которым нельзя пренебречь при анализе напряженно-деформированного состояния конструкции.

Первой нагрузкой при рассмотрении действующих сил, является собственный вес трубы. Для круглой трубы вес распределен равномерно по средней линии поперечного сечения, направление силы – вертикально вниз.

Равнодействующая нагрузки G_c будет равна [1]:

$$G_c = 2\pi\gamma_c r h \quad (1)$$

где γ_c – объемный вес материала трубы; r – средний радиус поперечного сечения трубы, м; h – толщина стенки трубы, м.

Вертикальное давление засыпки, действующее на трубу, можно разделить на действующую на верхнюю часть трубы и нижнюю. Давление на верхнюю часть трубы равняется весу вышерасположенного грунта, приходящемуся на верхний свод трубы. Так как на практике вертикальное давление засыпки на нижнюю часть трубы намного меньше, чем вертикальное давление на верхнюю часть трубы, а также ввиду устройства труб на спроектированное по форме трубы основание, Г. Клейном было предложено не учитывать данную составляющую давления, также как и давление засыпки в угловых пазухах при высоте засыпки больше диаметра трубы. Тогда равнодействующая полного вертикального давления на верхнюю половину трубы будет равна [1]:

$$\sigma_B = \gamma H D_1, \quad (2)$$

где γ – объемный вес материала засыпки, кг/м³; H – высота засыпки, м; D_1 – наружный диаметр трубы, м.

Схема действия нагрузок от веса насыпи и собственного веса трубы показана на Рис. 1 [1].

Горизонтальное давление также принимается равномерно распределенным, и полное боковое давление с каждой стороны будет равно:

$$\sigma_B = \gamma H_0 D_1 \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (3)$$

где φ – угол внутреннего трения грунта засыпки; H_0 – глубина заложения центра трубы от поверхности земли, м.

Стоит учитывать, что осадка засыпки также происходит неравномерно и своим поведением отличается для жестких и гибких

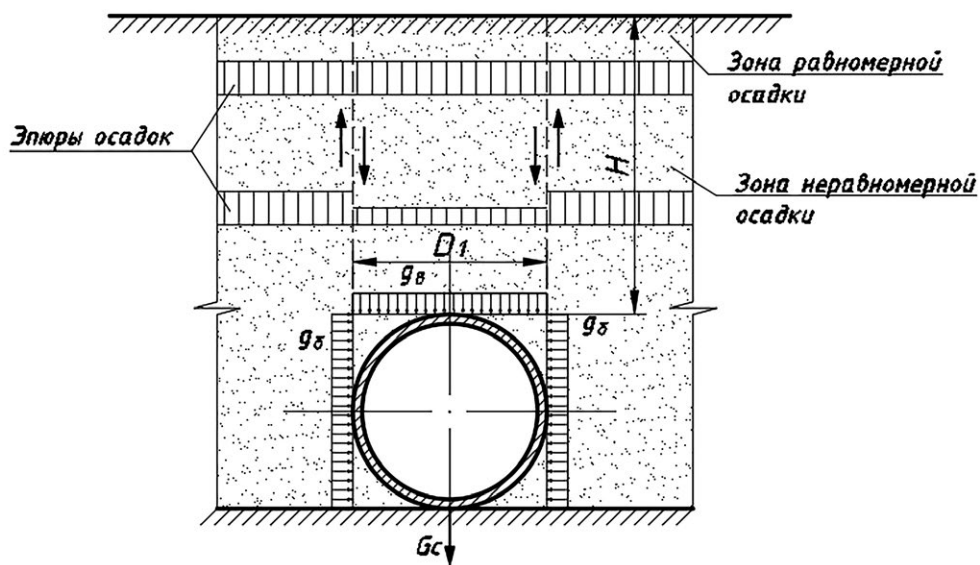


Рис. 1. Расчетная схема действия нагрузок на трубу в насыпи

Fig. 1. Calculation scheme of loads acting on the culvert in the embankment

труб. Осадка над гибкой трубой происходит быстрее ввиду меньшей жесткости относительно жесткости окружающего грунта. Вследствие этого между засыпкой над трубой и рядом с ней действуют силы трения и сцепления, направление их действия снижает полное вертикальное давление на трубу, как показано на Рис. 1, а в случае жесткой трубы полное вертикальное давление увеличивается. Этот процесс учитывается коэффициентом вертикального давления грунта насыпи $K_H < 1$ [2]. Таким образом гибкие стальные трубы воспринимают нагрузку меньше, чем жесткие трубы при равной высоте засыпки и являются более надежными.

В таком случае полное вертикальное давление будет равно:

$$\sigma_b = n\gamma K_H H D_1 \quad (4)$$

где K_H – коэффициент вертикального давления грунта насыпи; n – коэффициент перегрузки (1,2–1,4).

При расчете водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог также не обойтись без учета нагрузок от транспортных средств.

Согласно требованиям действующих нормативных документов для расчета труб применяется нагрузка типа НК, представляющая собой одиночную четырехосную тележку с нагрузкой на ось 18К и классом К 14.

Стоит учитывать, что транспортная нагрузка оказывает динамическое воздействие, которое определяется рядом факторов [1]:

- динамика нагрузки;
- динамика грунта;
- динамика конструкции;
- динамика материала.

Динамическое влияние транспортной нагрузки не может быть проигнорировано, так сама по себе данная нагрузка является кратковременной, вместе с тем учет каждого динамичного фактора значительно увеличил трудоемкость расчетов. Поэтому целесообразно применять общий коэффициент динамичности.

При переходе к анализу методов расчета водопропускных труб первым стоит рассмотреть метод расчета по предельным состояниям, который учитывает указанные нагрузки в виде сочетания нескольких постоянных нагрузок (собственный вес конструкции, вертикальное и боковое давления грунта насыпи) и как минимум одной временной (транспортная нагрузка H14).

Суть метода заключается в применении ряда частных коэффициентов надежности (по нагрузке, по материалу, условий работы и т.д.) и коэффициентов сочетания данных нагрузок. Такой подход выгодно выделял данный метод по сравнению с предшествующими ему методами (методы расчета по допускаемым напряжениям, по разрушающим нагрузкам) в которых принимается единый коэффициент запаса прочности, поэтому данный метод был утвержден в качестве обязательного к применению при расчетах конструкций и сооружений, в том числе и водопропускных труб. Значительное влияние на теоретическое развитие методов расчетов труб под насыпями автомобильных дорог оказали исследования и работы Г.К. Клейна.

В своей работе [1] Г.К. Клейн выделил три предельных состояния:

- потеря несущей способности;
- развитие чрезмерных деформаций;
- появление местных повреждений, которыми для стальных труб следует считать нарушения сплошности стенок труб и их соединений.

Метод расчета по предельным состояниям является на сегодняшний день основным и отражен в нормативных документах, в которых как правило рассматриваются первые две группы предельных состояний из ранее приведенных.

Согласно [1] при проверке несущей способности из условия прочности безнапорных стальных труб расчетным внутренним усилием в упругой стадии является наибольший изгибающий момент, однако Г.К. Клейн

предложил учесть пластические свойства материала, тогда несущая способность трубы из условия прочности определяется формулой (5) [1]:

$$M_{np}^0 = mR \frac{bh^2}{4} \quad (5)$$

где R – расчетное сопротивление стали на растяжение, сжатие и изгиб, Па; m – коэффициент условий работы; b – длина рассматриваемого участка трубы, м; h – толщина стенки трубы, м.

Для приведения к расчетному неравенству для нагрузок (6) [1], путем преобразований предельная нагрузка P_{np} , будет определяться по формуле (7) [1]:

$$P_{расч} \leq P_{np} \quad (6)$$

$$P_{np} = \frac{4M_{np}^0}{r} \quad (7)$$

Для расчета по второму предельному состоянию применяется условие [1]:

$$f \leq f_{np} \quad (8)$$

где f – деформация вертикального диаметра трубы, м; f_{np} – предельная деформация вертикального диаметра трубы, м.

Определяемая невозможностью дальнейшей эксплуатации трубы, для стальных труб не должна превышать 0,05D.

Для гофрированных труб применяется следующая формула (9) [1]:

$$f = \frac{0,048Q_g^i r^3}{E_c I} \quad (9)$$

где Q_g^H – равнодействующая нормативной вертикальной нагрузки, Н; E_c – модуль упругости стали, Н/см²; I – момент инерции продольного сечения стенки, см⁴.

Серьезное влияние на методы расчетов водопропускных труб оказало развитие расчетных методов тоннельных обделок. В отечественной литературе можно выделить несколько методов, получивших наибольшее распространение, и описанных в работе [3].

Метод Метростроя заключается в замене кругового сечения на шестнадцатигульник, в его углах расположены упругие опоры, заменяющие реакции основания, как показано на Рис. 2 [3].

Распределенные нагрузки заменяются силами, приложенными к вершинам многоугольника. В результате такой замены геометрии сечения в верхних трех вершинах отсутствуют связи, образующие угол 90° , то есть зону, в которой отсутствует отпор грунта. При этом связи направлены к центру многоугольника, если в задаче не рассматривается сила трения грунта и обделки. Исследователями метростроя было предложено для удобства ведения расчетов рассматривать схему как трехшарнирную арку ACB и шарнирную цепь ADB.

Канонические уравнения деформации имеют вид [3]:

[illegible]

где δ_{ik} – единичные перемещения по направлению i -ой связи, вызванное реакцией k -ой связи; M_k – неизвестные изгибающие моменты; Δ_{np} – грузовые перемещения при количестве уравнений n .

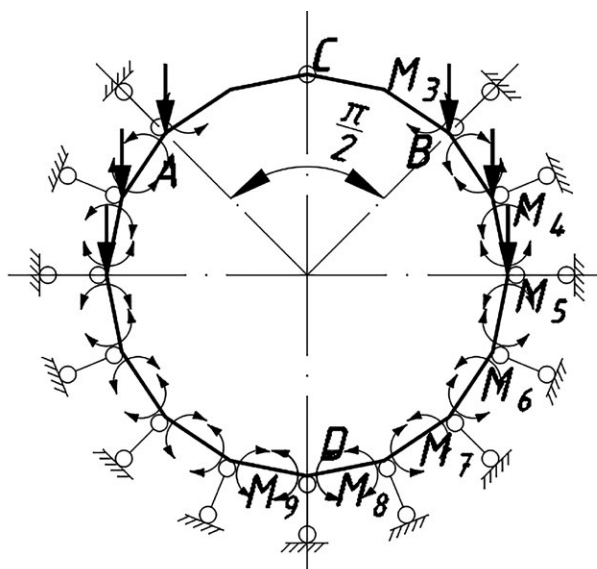


Рис. 2. Расчетная схема обделки по методу Метростроя

Fig. 2. Calculated scheme of the structure according to the Metrostroy method

Единичные перемещения δ_{ik} определяются по формуле (11) [3]:

$$\delta_{ik} = \sum \int_0^a \frac{\bar{M}_i \bar{M}_k ds}{EI} + \sum \frac{\bar{N}_i \bar{N}_k}{EF} a + \sum \frac{\bar{R}_i \bar{R}_k}{D} \quad (11)$$

где $\bar{M}_i, \bar{M}_k$ и $\bar{N}_i, \bar{N}_k$ – изгибающие моменты и нормальные силы в основной системе; $\bar{R}_i, \bar{R}_k$ – реакции опорных стержней, Н; a – длина стороны многоугольника, м; D – характеристика жесткости упругих опор, определяемая по формуле (12):

$$D = Kab \quad (12)$$

где K – коэффициент отпора породы; b – ширина выделенного для расчета кольца обделки, м.

Метод О.Е. Бугаевой, разработанный для расчета обделок в том числе круглого очертания изложен подробно в работе [4] и также как методы Метростроя и Метрогипротранса основан на гипотезе отпора грунта Фусса-Винклера.

Согласно эпюре отпора, показанной на Рис. 3 [3], зона отлипания также, как и в методе Метростроя составляет приблизительно угол 90° и зависит от жесткости породы.

Рассматриваемая эпюра определяется по пяти точкам: двумя нулевыми в сечении $\pi/4$, двумя точками на горизонтальном диаметре $k\delta_a$, и точкой на подошве $k\delta_b$.

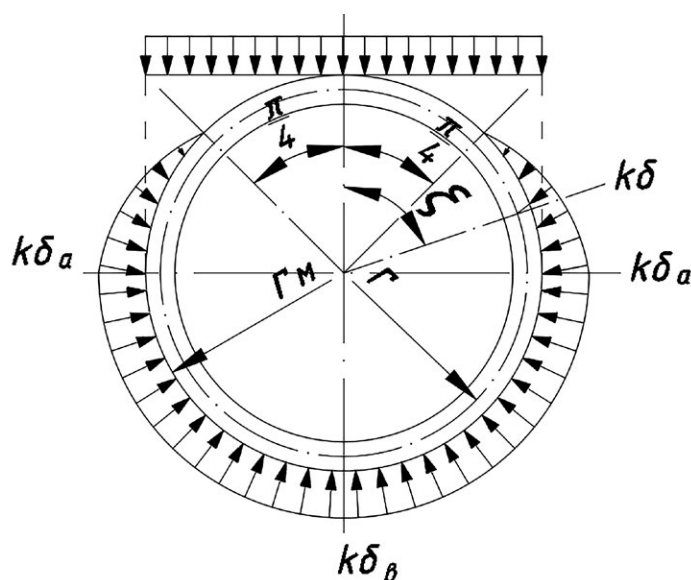


Рис. 3. Эпюра отпора по методу О.Е. Бугаевой

Fig. 3. Repulsion diagram by the method of O.E. Bugaeva

Очертание эпюры отпора выражается на участке ($\pi/4 \leq \xi \leq \pi/2$) уравнением (13) [4]:

$$k\delta = -k\delta_a \cos 2\xi \quad (13)$$

На участке ($\pi/2 \leq \xi \leq \pi$) уравнением (14) [4]:

$$k\delta = k\delta_a \sin^2 \xi + k\delta_b \cos^2 \xi \quad (14)$$

где $k\delta$ – ордината эпюры отпора в рассматриваемом сечении; ξ – угол между вертикальной осью кольца и рассматриваемым сечением.

Известны исследования направленные на применение теории оболочек к расчету гофрированных конструкций [4, 5]. Результаты данного исследования основаны также на следующих предположениях:

- 1) В продольном направлении оболочка принимается условно-гладкой. Кривизна образующей не учитывается, то есть радиус в продольном направлении принимается равным бесконечности [4].
- 2) В поперечном направлении радиус от центра окружности цилиндрической оболочки до срединной поверхности заменяется функцией $r(x)$.

Согласно результатам исследования, общие уравнения равновесия цилиндрической гофрированной оболочки принимают вид [4]:

$$\frac{dN_1}{d\xi} + r(x) \cdot q_1 = 0; \frac{dQ_1}{d\xi} - N_2 + r(x) \cdot q_n = 0; \frac{dM_1}{d\xi} - Q_1 \cdot r(x) = 0; \quad (15)$$

$$\frac{dS_1}{d\xi} + r(x) \cdot q_2 = 0; \frac{\partial H_1}{\partial \xi} = 0; S_1 - S_2 - \frac{H_2}{r(x)} = 0 \quad (16)$$

Геометрические уравнения имеют вид [4]:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{r(x)} \frac{du_1}{d\xi}; \varepsilon_2 = \frac{w}{r(x)}; x_1 = -\frac{1}{(r(x))^2} \frac{d^2 w}{d\xi^2} \quad (17)$$

$$\omega = \frac{1}{r(x)} \frac{du_2}{d\xi}; \tau = -\frac{1}{(r(x))^2} \frac{d^2 u_2}{d\xi^2} \quad (18)$$

где ξ – безразмерная величина равная $\frac{x}{r}$; $N_1, N_2, Q_1, Q_2, S_1, S_2$ – продольные, поперечные и сдвигающие силы; M_1, M_2, H_1, H_2 – изгибающие и крутящие

моменты; q_1, q_n – внешняя равномерно-распределенная нагрузка; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – осевые деформации точки срединной поверхности оболочки; x_1, x_2 – величины, характеризующие изменения кривизны срединной поверхности оболочки; ω – сдвиг в точке срединной поверхности оболочки, возникающий в результате деформации; τ – величина, характеризующая кручение срединной поверхности оболочки; u_1, u_2, w – компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности оболочки.

Одни из наиболее актуальных исследований направлены на рассмотрение и расчет гофрированных конструкций как конструктивно ортотропных [6, 7]. В данных работах гофрированные элементы рассматриваются как гладкие пластины эквивалентной жесткости.

При таком рассмотрении конструкций связь между внутренними усилиями и обобщенными деформациями для симметричного гофра имеет вид [6]:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ H \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ 2\chi_{xy} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma, \chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ – деформации срединной поверхности и изменения кривизн; $A_{11}, A_{12}, A_{22}, A_{33}$ – жесткости при растяжении/сжатии; $D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{66}$ – жесткости элемента оболочки при изгибе.

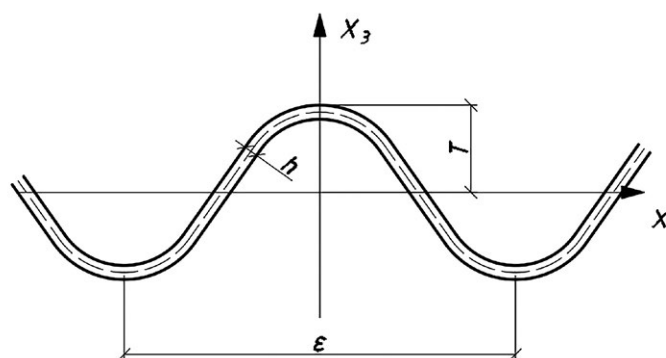


Рис. 4. Геометрия гофра

Fig. 4. Geometry of the corrugation

В рассматриваемом методе геометрия гофра, представленная на Рис. 4 [6], задается уравнением:

$$x_3 = x_3(X) \quad (21)$$

где X – безразмерная координата, равная x/ε , согласно рисунку 4 [6].

Суть метода заключается в том, чтобы на основании известной геометрии гофра, определить величины момента инерции гофра I и длины дуги S , с помощью которых определяются жесткости элементов при изгибе D_{ij} и при растяжении A_{ij} . Известны исследования, в которых определялись значения D_{ij} для трапецевидного гофра с учетом коэффициента Пуассона [8] и синусоидального гофра [9], следовательно, геометрия гофра имеет решающее значение в данном методе.

Одним из наиболее распространенных методов расчета в современной практике проектирования является метод конечных элементов, основанный на методе перемещений и реализованный во множестве различных программных комплексов. Многие современные исследования строительных конструкций выполнены с применением данного метода благодаря ряду преимуществ, в том числе, посвященные водопропускным трубам [10–12].

Особый интерес представляют исследования, в которых совмещено применение метода конечных элементов и полномасштабные испытания конструкций [13–15]. Данный метод позволяет рассматривать влияние дополнительных, элементов усиления на основную конструкцию. Вместе с тем возможен анализ взаимодействия различных сред с помощью контактных элементов, что особенно важно при рассмотрении системы «грунт основания-труба-грунт засыпки». Возможность задания типов поверхностей также является преимуществом метода, так как наличие трения грунта о поверхность водопропускной трубы является важным фактором, влияющим на отпор грунта засыпки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье рассматриваются методы расчета круглых стальных гофрированных водопропускных труб. Проанализированы методы расчета по предельным состояниям, методы расчета тоннельных обделок и метод конечных элементов. Каждый из данных методов имеет свои особенности, и оценка рассматриваемых методов выполнена на основе следующих факторов:

- точность метода в сравнении с натурными испытаниями;
- уровень проработанности метода;

- возможность детализации и рассмотрения сложных систем;
- адаптивность применения к рассматриваемым конструкциям.

Метод расчета по предельным состояниям, описанный Г.К. Клейном для стальных труб дает широкое представление о работе конструкции под насыпью автомобильной дороги. Изложенный метод явно пересекается с нормативными документами. Существует неоднозначность при назначении коэффициента вертикального давления грунта насыпи исходя из рекомендаций или исходя из расчета, с чем необходимо определиться исследователю. Рекомендованные значения коэффициента равны или больше единицы, а его значения при расчете могут принимать значения меньше единицы, что свидетельствует об стремлении обеспечить более высокий запас прочности конструкции, что может рассматриваться с одной стороны как рациональное решение ввиду не стопроцентной точности расчетов, а с другой как нерациональное решение.

Исходя из приведенных критериев можно заключить, что рассмотренный метод обладает достаточной точностью результатов, что подтверждается его распространенностью в строительной отрасли и множеством реализованных проектов. Указанный метод имеет явные преимущества по сравнению с предшествующими ему методами по допускаемым напряжениям и по разрушающим усилиям благодаря введению частных коэффициентов надежности, и в большей степени описывает работу рассматриваемых конструкций.

Методы, предложенные исследователями ОАО «Метрострой» и О.Е. Бугаевой являются более современными и лучше отражают отпор грунта вокруг конструкции, но разработаны для обделок тоннелей и требуют адаптации расчетов для стальных водопропускных труб. Метод Метростроя является весьма трудоемким в виду большого количества рассматриваемых узлов, вместе с этим количество данных узлов напрямую влияет на точность расчетов. При этом низкая детализация расчетной схемы может привести к результатам, значительно отличающимся от напряжений и перемещений, возникающих в реальных конструкциях при их эксплуатации, что повышает риск выхода из строя сооружения, вследствие этого для данных методов требуется значительная детализация схемы и автоматизация расчетов.

Методы расчета, разработанные на основе теории оболочек и метод расчета гофрированных конструкций как конструктивно-ортотропных являются наиболее современными, вместе с тем наиболее полно учитывают влияние геометрии гофра в отличие от остальных описанных

аналитических методов. Исходя из литературного обзора рассмотренные методы могут быть успешно применены к различным типам конструкций, в том числе и для расчета гофрированных водопропускных труб под насыпями автомобильных дорог. Анализ исследований с применением данных методов показал высокую точность, получаемых результатов, вместе с тем методы являются достаточно трудоемкими, но не лишены возможности автоматизации.

Метод конечных элементов благодаря ряду преимуществ, таких как автоматизация расчетов, реализованных в специальных программных комплексах, возможность учета большого количества факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции (возможность учета стадийности возведения сооружения и т.д.), возможность построения сложных трехмерных моделей, состоящих из нескольких конструкций, и высокая точность расчетов, может быть применен в качестве сравнительного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно поставленным задачам, в работе были выполнены:
2. Анализ влияния нагрузок, действующих на водопропускные трубы, включающий собственный вес трубы, вес грунта насыпи и транспортную нагрузку. Обзор существующих методов расчета водопропускных труб.
3. Обоснована необходимость усовершенствования методов, применением принципов системного подхода, методов имитационного моделирования и математической теории надежности расчета с целью оценки влияния отклонений параметров материалов и выявления закономерности влияния физико-механических и эксплуатационных характеристик конструкционных материалов водопропускных труб на срок безотказной работы сооружения.

Необходимо отметить, что проанализированные методы расчета труб являются строго детерминированными, не учитывают стохастический характер нагрузок, ориентированы на применение нормированных значений переменных и констант в форме их математических ожиданий. Указанные обстоятельства могут привести к тому, что даже при допустимых отклонениях физико-механических характеристик грунтов и конструктивных материалов водопропускных труб, параметров технологических процессов строительства, а также состава и интенсивности транспортного потока возможны ситуации, когда все

воздействующие факторы окажутся на нижнем уровне допустимых значений. Такое их сочетание вызовет преждевременное разрушение и отказ в работе водопропускных сооружений в межремонтный период. В связи с этим требуется разработка методов оценки и повышения надежности водопропускных труб при их проектировании, строительстве и эксплуатации. На основе выполненного анализа можно заключить, что наиболее подходящими аналитическими методами для дальнейшего имитационного моделирования являются методы расчета конструкций как конструктивно ортотропных и по предельным состояниям.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле. Москва: Госстройиздат, 1957. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: <http://www.amas.md/biblioteca/data/25/17/02/24.2.pdf>
2. Колоколов Н.М., Янковский О.А., Щербина К.Б. Черняховская С.Э. Металлические гофрированные трубы под насыпями. Москва: Транспорт, 1973. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: <https://elima.ru/books/?id=5544>
3. Бугаева О.Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей. Ленинград: ЛИИЖТ, 1966. Дата обращения: 30.07.2024. Режим доступа: <https://elima.ru/books/?id=2337>
4. Осокин И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб // Интернет-журнал науковедение. 2013. Т. 15, № 2. С. 34. EDN: QJCLNN
5. Чепурненко А.С., Языев Б.М., Турко М.С. Расчет металлических гофрированных оболочек при осесимметричном нагружении // Инженерный вестник Дона. 2018. Т. 50, № 3. С. 126. EDN: YRQOEP
6. Турко М.С., Чепурненко А.С., Языев Б.М. Расчет металлических гофрированных конструкций как конструктивно ортотропных // Инженерный вестник Дона. 2018. Т. 51, № 4. С. 199. EDN: MYOBRX
7. Ye Z., Berdichevsky V.L., Yu W. An equivalent classical plate model of corrugated structures // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol. 51, N. 11–12. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.02.025
8. Briassoulis D. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets // Computers and Structures. 1986. Vol. 23, N. 2. doi: 10.1016/0045-7949(86)90207-5

9. Alshabatat N. Design of corrugated plates for optimal fundamental frequency // *Advances in Acoustics and Vibration*. 2016. N. 1. doi: 10.1155/2016/4290247
10. Горшков Н.И., Краснов М.А., Ловцов А.Д., Федорова В.С. Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния системы «металлическая гофрированная труба (МГТ) – основание–насыпь» на основе МКЭ // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. Т. 74, № 3. С. 152–160. doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160
11. Тимчук Д.В., Ловцов А.Д. Особенности расчета гофрированной водопропускной трубы. В кн.: Материалы секционных заседаний 60-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ; Апрель 26–30 2020. Хабаровск: ТОГУ, 2020. EDN: GWIJOF
12. Kunecki B. Full-scale test of corrugated steel culvert and FEM analysis with various static systems // *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2006. Vol. 28, N. 2. P. 39–54. doi: 10.1061/40946(248)98
13. Beben D., Stryczek A. Numerical analysis of corrugated steel plate bridge with reinforced concrete relieving slab // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016. Vol. 22, N. 5. P. 585–596. doi: 10.3846/13923730.2014.914092
14. Kolisoja P., Kalliainen A. Modelling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 427–434. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.054
15. Новодзинский А.Л., Клевеко В.И. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 1. С. 81–94. EDN: PMSLTT

REFERENCES

1. Klein GK. *Calculation of culverts laid in the ground*. Moscow: Gosstroyizdat; 1957. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: <http://www.amac.md/biblioteca/data/25/17/02/24.2.pdf>
2. Kolokolov NM, Yankovsky OA, Shcherbina KB, Chernyakhovskaya SE. *Metallic corrugated culverts under embankments*. Moscow: Transport; 1973; 117. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: <https://elima.ru/books/?id=5544>
3. Bugaeva OE. *Designing of transport tunnel linings*. Leningrad: LIIZHT, 1966. (In Russ.). [cited 2024 July 30]. Available from: <https://elima.ru/books/?id=2337>
4. Osokin IA. Application of the theory of shells of rotation to the calculation of corrugated culverts. *Bulletin of Eurasian Science*. 2013;2(15):34. (In Russ.). EDN: QJCLNN
5. Chepurnenko AS, Yazyev BM, Turko MS. Calculation of metallic corrugated shells under axisymmetric loading. *Inženernyj vestnik Dona*. 2018;3(50):126. (In Russ.). EDN: YRQOEP
6. Turko MS, Chepurnenko AS, Yazyev BM. Calculation of metal corrugated structures as structurally orthotropic. *Inženernyj vestnik Dona*. 2018;4(51):199. (In Russ.). EDN: MYOBRX

7. Zheng Ye, Berdichevsky VL, Wenbin Yu. An equivalent classical plate model of corrugated structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51: 2073-2083.
8. Briassoulis D. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets. *Computers & Structures*. 1986;23:129–138. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11264
9. Alshabatat N. Design of corrugated plates for optimal fundamental frequency. *Advances in Acoustics and Vibration*. 2016. doi: 10.1155/2016/4290247
10. Gorshkov NI, Krasnov MA, Lovtsov AD, Fedorova VS. Analysis and evaluation of stress-strain state of the system “metal corrugated pipe (MCT) – base – embankment” on the basis of FEM. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019;3(74):152–160. (In Russ.). doi: 10.23968/1999-5571-2018-16-3-152-160
11. Timchuk DV, Lovtsov AD. Peculiarities of the corrugated culvert calculation. In: *Proceedings of the sectional sessions of the 60th Student Scientific and Practical Conference of TOGU; 2020 Apr 26–30; Khabarovsk*. Khabarovsk: TOGU; 2020. (In Russ.). EDN: GWIJOF
12. Kunecki B. Full-scale test of corrugated steel culvert and FEM analysis with various static systems. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2006;28(2):39–54. doi: 10.1061/40946(248)98
13. Beben D, Stryczek A. Numerical analysis of corrugated steel plate bridge with reinforced concrete relieving slab. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016;22(5):585–596. doi: 10.3846/13923730.2014.914092
14. Kolisoja P, Kalliainen A. Modelling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D. *Procedia Engineering*. 2016;143:427–434. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.054
15. Novodzinsky AL, Kleveko VI. Accounting for the influence of corrugated element thickness on the strength and stability of a metal culvert. *Vestnik of PNIPU. Construction and architecture*. 2012;1:81–94. (In Russ.). EDN: PMSLTT

Сведения об авторах:

Цыбин Дмитрий Юрьевич, аспирант;

eLibrary SPIN: 1977-1543; ORCID: 0000-0002-6074-3995;

E-mail: dmitryts32@gmail.com

Ермошин Николай Алексеевич, д.воен.н, профессор;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-0367-5375;

E-mail: ermonata@mail.ru

Information about the authors:

Dmitry Yu. Tsybin, postgraduate student;

eLibrary SPIN: 1977-1543; ORCID: 0000-0002-6074-3995;

E-mail: dmitryts32@gmail.com

Nikolay A. Ermoshin, Doctor of Military Sciences, Professor;

eLibrary SPIN: 6694-8297; ORCID: 0000-0002-6074-3995;

E-mail: ermonata@mail.ru