

УДК 624.012.45:691.175.54

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19)**И.В. БАКЛЫКОВ**

АО «Институт Гидропроект», Волоколамское шоссе, д. 2, г. Москва, 125993, Российская Федерация

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Аннотация

Введение. В статье рассматривается использование трубобетона в гидротехническом строительстве, а также проводится сравнение различных конструктивных вариантов с точки зрения напряженно-деформированного состояния и несущей способности.

Цель. Анализ применения трубобетона и различных подходов к его проектированию, а также сравнение напряженно-деформированного состояния различных конструктивных решений.

Материалы и методы. Расчеты железобетонных конструкций были выполнены методом конечных элементов с применением нелинейных моделей в программном обеспечении ANSYS.

Результаты. Результаты расчетов показали, что для монолитного бетонного стержня (без арматуры) несущая способность составила 56,28 кНм, для железобетонного стержня с арматурой несущая способность составила 416,60 кНм, для металлической трубы – 639,07 кНм, для трубобетона (металлическая труба, заполненная бетоном) увеличение несущей способности составило до 768,76 кНм, армированный трубобетон показал наибольшую несущую способность – 1085,50 кНм.

Выводы. Результаты расчетов и сравнительного анализа показывают, что армированный трубобетон является наиболее эффективным с точки зрения несущей способности, хотя и имеет более высокую стоимость. В то же время железобетон и металлические трубы предлагают более экономичный вариант, но с меньшей несущей способностью. Выбор

материала зависит от конкретных требований проекта, включая нагрузки, стоимость и условия эксплуатации.

Ключевые слова: трубобетон, шпунт, расчетные исследования, несущая способность, изгибающий момент, напряженно-деформированное состояние, нелинейный бетон, трещинообразование, гидротехническое сооружение

Для цитирования: Баклыков И.В. Сравнительный анализ применения трубобетонных конструкций в гидротехническом строительстве на основе анализа напряженно-деформированного состояния // *Бетон и железобетон*. 2025. № 3 (628). С. 5–19. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19). EDN: HXGXVQ

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.02.2025

Поступила после рецензирования 31.03.2025

Принята к публикации 03.04.2025

I.V. BAKLYKOV

Hydroproject Institute JSC, Volokolamskoe Shosse, 2, Moscow, 125993, Russian Federation

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF CONCRETE—FILLED STEEL TUBE STRUCTURES IN HYDRAULIC ENGINEERING BASED ON THE ANALYSIS OF THE STRESS—STRAIN STATE

Abstract

Introduction. The article examines the use of concrete-filled steel tube (CFST) structures in hydraulic engineering and compares various structural options in terms of their stress-strain state and load-bearing capacity.

Aim. The main goal of the work is to analyze the application of concrete-filled steel tubes and various approaches to their design, as well as to compare the stress-strain states of different structural solutions.

Materials and methods. The calculations of reinforced concrete structures were performed using the finite element method with nonlinear models in ANSYS software.

Results. The calculation results showed that for monolithic concrete pipes (without reinforcement), the load-bearing capacity was 56.28 kNm; for reinforced concrete pipes, the load-bearing capacity was 416.60 kNm; for the metal pipe, it was 639.07 kNm; for the concrete-filled steel pipe (tubular concrete), the load-bearing capacity increased to 768.76 kNm; and for reinforced concrete-filled steel pipe, the highest load-bearing capacity was 1085.50 kNm.

Conclusions. The calculation results and comparative analysis show that reinforced tubular concrete is the most effective in terms of load-bearing capacity, although it has a higher cost. At the same time, reinforced concrete and metal pipes offer a more economical option but with lower load-bearing capacity. The choice of material depends on the specific project requirements, including loads, cost, and operating conditions.

Keywords: concrete-filled steel tube, sheet pile, computational studies, load-bearing capacity, bending moment, stress-strain state, nonlinear deformation of concrete, crack formation, hydraulic structure

For citation: Baklykov I.V. Comparative analysis of the application of concrete-filled steel tube structures in hydraulic engineering based on the analysis of the stress-strain state. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025, no. 3 (628), pp. 5–19. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3\(628\)-5-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2025-3(628)-5-19). EDN: HXGXBXQ

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 11.02.2025

Revised 31.03.2025

Accepted 03.04.2025

Введение

Трубобетон – это строительный материал, представляющий собой бетон, который твердеет внутри металлических труб, фактически создающих несъемную опалубку для бетона. Он находит широкое применение в различных сферах строительства, включая возведение гидротехнических объектов, мостов, трубопроводов, а также для устройства свай и фундаментных конструкций.

Состав трубобетона аналогичен обычному бетону и включает цемент, песок, щебень (или другие заполнители) и воду. Однако его особенностью является то, что бетон заполняется в металлические трубы, которые служат опалубкой, обеспечивая прочность. Кроме того, как будет показано далее, трубы увеличивают несущую способность конструкции в целом.

Трубобетон обладает несколькими важными преимуществами по сравнению с традиционными конструкциями, что делает его популярным в строительстве:

- высокая несущая способность. Бетон, твердеющий в трубах, имеет отличные прочностные характеристики, что делает его идеальным для строительства гидротехнических объектов, котлованов, мостов, фундаментов и других конструкций;

- устойчивость к воздействию воды. Трубобетон активно используется в гидротехнических сооружениях, таких как дамбы и причалы, поскольку он не подвержен коррозии и выдерживает длительное воздействие воды;

- удобство и скорость монтажа. Заполнение бетона в трубчатые формы позволяет значительно сократить время строительства и снизить трудозатраты при возведении объектов.

Однако также стоит отметить и его недостатки:

- сложности с качественным бетонированием;
- увеличение стоимости строительства;
- трудность контроля качества.

Трубобетон является современным и высокоэффективным строительным материалом, который находит широкое применение благодаря своей высокой несущей способности, долговечности и устойчивости к агрессивным внешним воздействиям. Он активно используется в строительстве гидротехнических сооружений, свайных фундаментов, мостов и других объектов.

Для выполнения расчетных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности рассмотренных конструкций применялись нелинейные модели деформирования материалов. В частности, для бетона применялась уже зарекомендовавшая себя модель материала Menetrey – Willam [1–5], которая в достаточной степени позволяет описать поведение бетона.

Модель Menetrey – Willam представляет собой поверхность разрушения с тремя параметрами, описанную следующим уравнением:

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[\sqrt{1.5} \times \frac{\rho}{f_c'} \right]^2 + m \times \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \times f_c'} \times r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \times f_c'} \right] - c = 0, \quad (1)$$

где

$$r(\theta, e) = \frac{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2 \theta + (2 \times e - 1)^2}{2 \times (1 - e^2) \times \cos \theta + (2 \times e - 1) \times \sqrt{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2 \theta + 5 \times e^2 - 4 \times e}} \quad (2)$$

$$m = 3 \times \frac{f_c'^2 - f_t'^2}{f_c' \times f_t'} \times \frac{e}{e + 1}. \quad (3)$$

Уравнение (1) выражается с помощью трех инвариантов напряжений известных как координаты Haigh – Westergaard; m – параметр трения материала, зависящий от прочности на одноосное сжатие f_c' , от прочности на одноосное растяжение f_t' , а также от параметра эксцентриситета e . Эксцентриситет e определяет гладкость поверхности Menetrey – Willam, и его значение влияет на описание разрушения либо при двухосном растяжении, либо при сжатии. В (1) ξ – инвариант гидростатического напряжения, ρ – инвариант девиаторного напряжения, θ – девиаторный полярный угол Лоде. Координаты Haigh – Westergaard (H – W) записываются как:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_1, \quad I_1 = \sigma_{ii}, \quad (4)$$

$$\rho = \sqrt{2 \times J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad (5)$$

$$\cos 3\theta = \frac{3 \times \sqrt{3}}{2} \times \frac{J_3}{J_2^{3/2}}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{ik} s_{ki}, \quad (6)$$

где s_{ij} обозначает компоненты девиаторного напряжения; т. е. $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ является символом Kronecker. Следует отметить, что при $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ выполняются следующие соотношения между главными напряжениями σ_{ij} и координатами H – W:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \times \rho \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2 \times \pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2 \times \pi}{3} \right) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Поверхность, представленная формулой (1), определена для $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$, поэтому простирается во все полярные направления $0 \leq \theta \leq 2\pi$, используя тройную симметрию.

Поверхность разрушения показана на рис. 1.

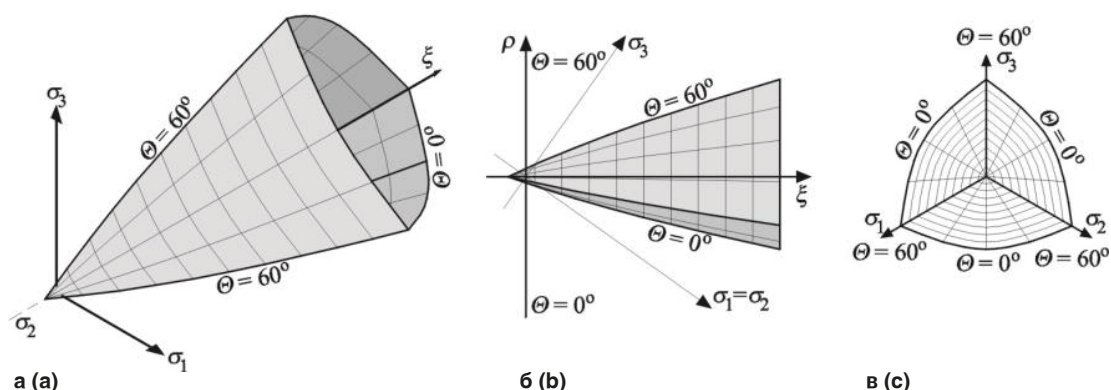


Рис. 1. Поверхность разрушения Menetrey – Willam: а – вид в пространстве главных напряжений; б – вид осевого сечения; в – вид девиаторного сечения

Fig. 1. Menetrey – Willam fracture surface: а – view in the main stresses space; б – view of the axial section; в – view of the deviatoric section

Для металла модель разрушения принята в виде билинейного изотропного упрочнения и описывается двухлинейной зависимостью напряжения σ от деформации ε . Начальный наклон кривой соответствует модулю упругости материала E . После достижения напряжения текучести начинается развиваться пластическая деформация ε_{p1} , зависимость напряжения от деформации продолжается вдоль линии с наклоном, определяемым касательным модулем E_p , показанная на рис. 2.

В работе [6] рассмотрено сравнение круглой и квадратной колонн при центральном сжатии, при этом колонны круглого сечения демонстрируют немного большую несущую способность (1280 кН) по сравнению с квадратными колоннами (1262 кН). Это объясняется более выраженным эффектом обоймы, что улучшает их характеристики при центральном сжатии. Однако при увеличении эксцентриситета ($e/b = 0,125$;

0,25; 0,5) разница в несущей способности круглых и квадратных колонн становится практически незначительной, менее 2 %. Для сравнения вариантов в работе использован программный комплекс Ansys Workbench для численного моделирования с учетом физической нелинейности бетона и стали, что позволило достичь высокой точности результатов. Применена модель Друкера – Прагера и учтен контакт трения между стальной оболочкой и бетонным ядром. Отмечено, что в существующих нормативных документах (СП 266.1325800.2016 [7]) подробно описан расчет только круглых трубобетонных колонн. Для квадратных колонн требуется дальнейшая проработка методик проектирования и расчетов.

В работе [8] рассмотрены трубобетонные колонны и их применение. Отмечено, что трубобетонные колонны, представляющие собой композитную конструкцию из стальной оболочки и бетонного ядра, обладают

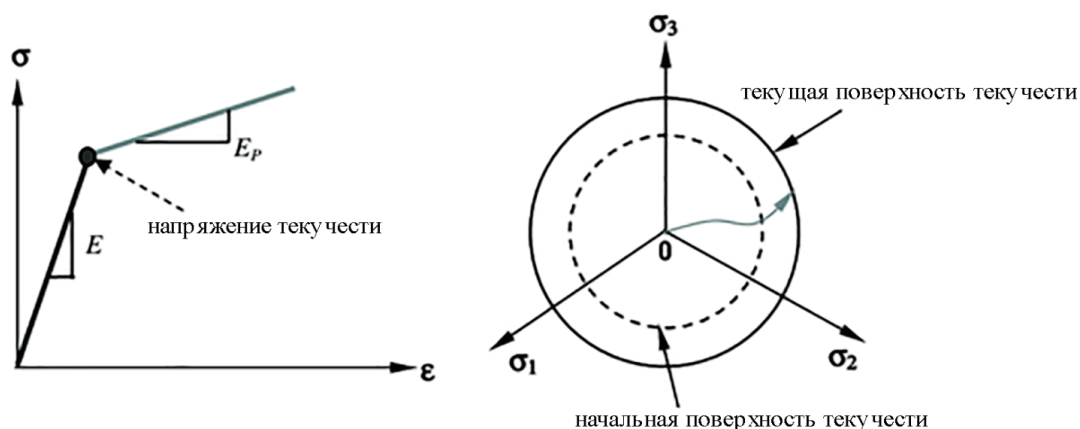


Рис. 2. Поверхность разрушения билинейного изотропного упрочнения
Fig. 2. Fracture surface of bilinear isotropic hardening

высокой несущей способностью и сейсмостойкостью, а также широко применяются в строительстве высотных зданий и сооружений благодаря экономичности, легкости возведения и повышенной надежности. Для анализа несущей способности в работе использован математический аппарат теории упругости для бетонного ядра и механики оболочек для стальной трубы, при этом несущая способность колонны определялась по состоянию разрушения стальной оболочки под действием окружных напряжений. Также отмечено, что использование бетона более высоких марок (М350, М400) и стали с высоким пределом прочности существенно увеличивает несущую способность. Увеличение толщины стенки трубы и радиуса сечения также положительно сказывается на несущей способности. Делается вывод и о практическом применении трубобетона: применение трубобетонных колонн позволяет сократить трудозатраты на этапе строительства и увеличить надежность конструкции.

В работе [9] рассмотрено усиление трубобетонных колонн композитными материалами (FRP) и стальными лентами. В работе отмечается, что усиление с использованием FRP и сварных стальных лент значительно увеличивает несущую способность колонн по сравнению с трубобетонными колоннами (CFST). Например, при усилении FRP (1–4 слоя) или с использованием стальных лент толщиной 3 и 6 мм несущая способность увеличивается на 28,72–64,16 % и 28,46–49,82 % соответственно. Увеличение числа слоев FRP и толщины стальных лент способствует улучшению несущей способности колонн, с приростом до 31,21 % при толщине стальной ленты 6 мм. При этом отмечается, что стоимость усиленных стальными лентами колонн CFST почти на 40 % ниже стоимости колонн с усилением FRP, а их эффективность в плане повышения несущей способности аналогична. Таким образом, с точки зрения затрат усиление стальными лентами является более предпочтительным для инженерной практики, в то время как с точки зрения удобства монтажа усиление FRP предпочтительнее.

В работе [10] рассмотрено поведение колонн CFST при осевом сжимающем воздействии. В ходе эксперимента исследовалось поведение 24 колонн CFST при вертикальной нагрузке до разрушения. Основными переменными были длина, диаметр, прочность стальной трубы и прочность бетона. Результаты показали, что колонны с высоким изгибом (длинные) разрушались от изгиба, в то время как более короткие колонны разрушались за счет сжатия бетона и текучести стальной трубы. Экспериментальные данные сравнивались с прогнозируемыми нагрузками по стандарту (SANS 10162-1 [11]) и Еврокоду 4 (EC4) [12]. Оценка показала, что обе нормативные базы дают консервативные результаты, занижая реальные значения предельных нагрузок на 8,4 и 13,6 % (для SANS) и на 10,5 и 20,2 % (для EC4) соответственно для серий 1 и 2. Это подтверждает, что оба норма-

тивных документа склонны к занижению нагрузки по сравнению с реальными экспериментальными данными. Отмечается, что колонны CFST имеют сочетание преимуществ стали и бетона. Стальная труба действует как постоянная опалубка и обеспечивает горизонтальное ограничение для бетона, что предотвращает локальное выдавливание стали в момент повышенных нагрузок. Это позволяет значительно повысить несущую способность колонн по сравнению с отдельными бетонными или стальными колоннами. В серии 1 экспериментов колонны CFST, имеющие большие отношения длины к диаметру, разрушались в основном из-за изгиба. В серии 2 колонны с меньшими отношениями ($L/d = 5:16$ до $9:84$) разрушались из-за сжатия бетона и текучести стали, а также наблюдалась выпуклость стальной трубы.

Статья [13] посвящена численно-экспериментальным исследованиям прочности сжатых сталежелезобетонных элементов, выполненных с использованием высокопрочного бетона и квадратных стальных труб класса С345. Основное внимание уделено расчету прочности таких конструкций, учитывающему особенности работы материалов в составе трубобетонных сечений. В отличие от круглых труб, в квадратных трубах бетон подвергается неравномерному боковому сжатию, что существенно влияет на его прочность. Исследования включают как численные моделирования с использованием метода конечных элементов, так и экспериментальные испытания образцов. Результаты численных расчетов подтвердили их достоверность с экспериментальными данными, с максимальной разницей в разрушающей нагрузке – менее 4 %. В статье рассматриваются также факторы, влияющие на прочность конструкций, такие как прочность бетона и стали при одноосном сжатии, соотношение толщины стенки обоймы и геометрические параметры труб. Разработанная методика расчета прочности позволяет учитывать основные особенности работы материалов и улучшить точность расчетов трубобетонных конструкций, что важно для их применения в строительстве. Результаты исследования могут быть использованы для разработки нормативных документов и проектирования устойчивых и безопасных конструкций с квадратными трубами.

Цель настоящей работы заключается в проведении сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных конструкций.

Материалы и методы

В работе используются аналитические методы расчета и метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния и несущей способности трубобетонных конструкций.

Результаты

В качестве примера применения трубобетона в строительстве в работе рассмотрены шпунтовые

стены сухого дока (высотой до 20 м), возведенные в 2019 году и успешно функционирующие в условиях Кольского залива (рис. 3).

Как показали предварительные расчеты, основным фактором при оценке несущей способности рассмотренных конструкций является изгибающий момент. Для сравнительной оценки конструктивных вариантов несущая способность рассмотрена для конструкций при действии изгибающего момента.

В работе рассматриваются сравнительные варианты трубобетона в виде:

- стержень сплошного круглого сечения из бетона без арматурного каркаса;
- стержень сплошного круглого сечения из бетона с арматурным каркасом;
- металлическая труба;
- трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном;
- армированный трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном и установкой арматурного каркаса.

Расчет изгибающего момента в шпунтах имеет важное значение, особенно в области гидротехнических и ограждающих конструкций. Шпунты подвергаются различным нагрузкам, включая гидростатическое давление воды, боковое давление грунта и других внешних факторов. Важно точно рассчитывать изгибающий момент и несущую способность в шпунтах, чтобы обеспечить его эксплуатационную надежность.

В качестве бетона был принят тяжелый бетон класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа, $R_{bfn} = 1,75$ МПа, $R_b = 17$ МПа, $R_{bt} = 1,15$ МПа, $E_b = 32\,500$ МПа).

Металл принят класса С355 ($R_y = 355$ МПа, $E = 200\,000$ МПа).

Арматура класса А500С ($R_{sn} = 500$ МПа, $R_s = 450$, $E_s = 200\,000$ МПа).

Для всех расчетных моделей принято продольное рабочее армирование в виде стержней диаметром 25 мм (8 Ø 25).

Расчетная схема представлена на рис. 4.

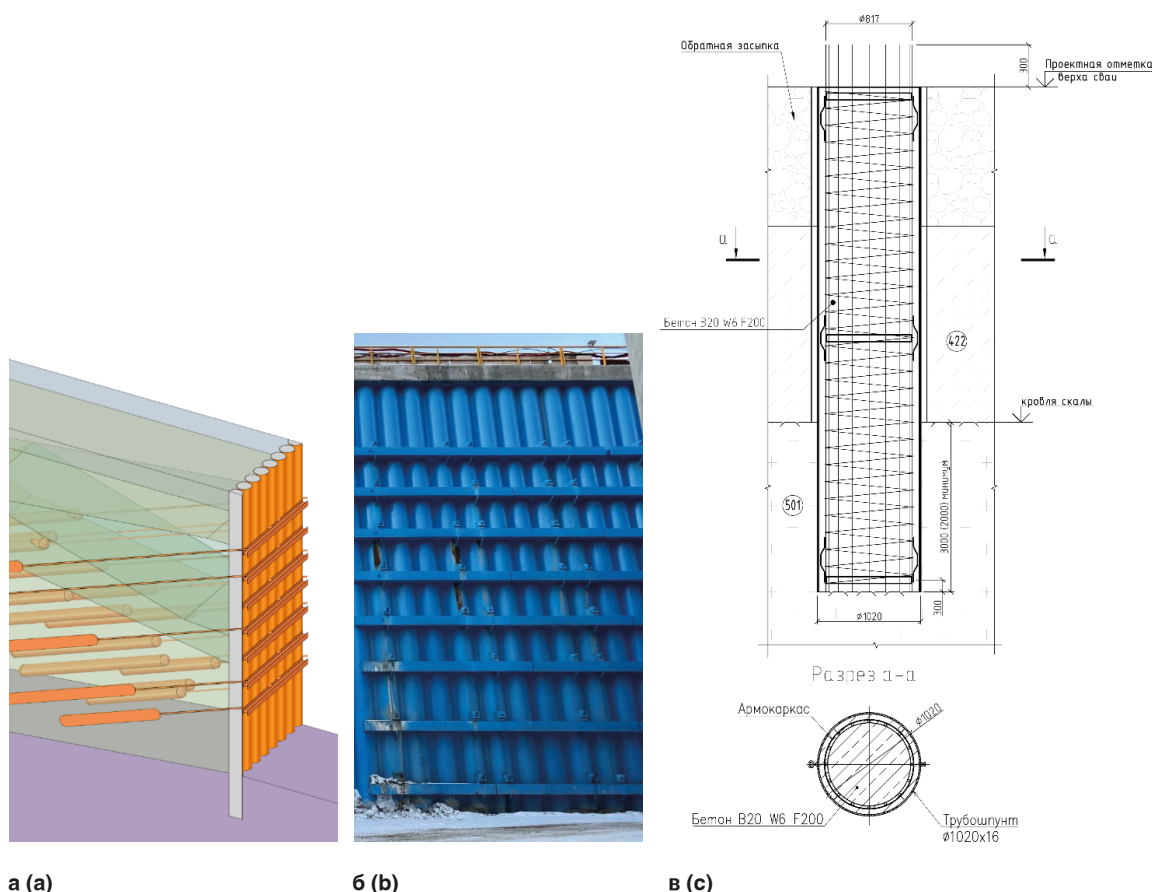


Рис. 3. Шпунтовая стена сухого дока: а – вид модели заанкеренной шпунтовой стены; б – фотография лицевой грани шпунтовой стены; в – конструкция трубошпунта

Fig. 3. Sheet pile wall of the dry dock: а – view of the model of the sheet pile wall; б – photograph of the front face of the sheet pile wall; в – construction of the pipe rod

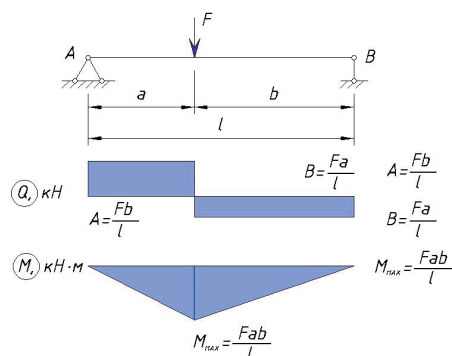


Рис. 4. Расчетная схема

Fig. 4. Calculation scheme

При этом расстояния $a = b = 2,2$ м.

Вариант 1. Стержень сплошного круглого сечения из бетона без арматурного каркаса.

В качестве варианта 1 принят вариант выполнения трубы в виде монолитной конструкции из бетона внешним диаметром 600 мм. Данный вариант выбран для наглядного сравнения армированной и неармированной конструкций.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 5.

Как показали расчеты несущей способности данного бетонного сечения, пиковая несущая способность

в виде максимального момента составляет 56,28 кНм.

Фактически при наступлении момента трещинообразования несущая способность данной конструкции исчерпывается.

Вариант 2. Стержень сплошного круглого сечения из бетона с арматурным каркасом.

Для варианта 2 принята железобетонная конструкция шпунта внешним диаметром 600 мм. Арматурный каркас представлен в виде продольных арматурных стержней диаметром 25 мм в количестве 8 штук.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 6.

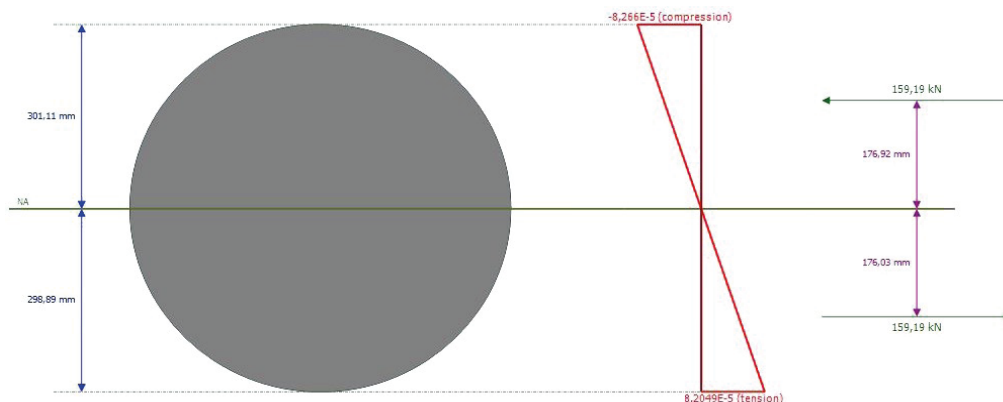


Рис. 5. Вариант 1. Напряжения, МПа, и усилия, кН

Fig. 5. Option 1. Stresses, MPa, and forces, kN

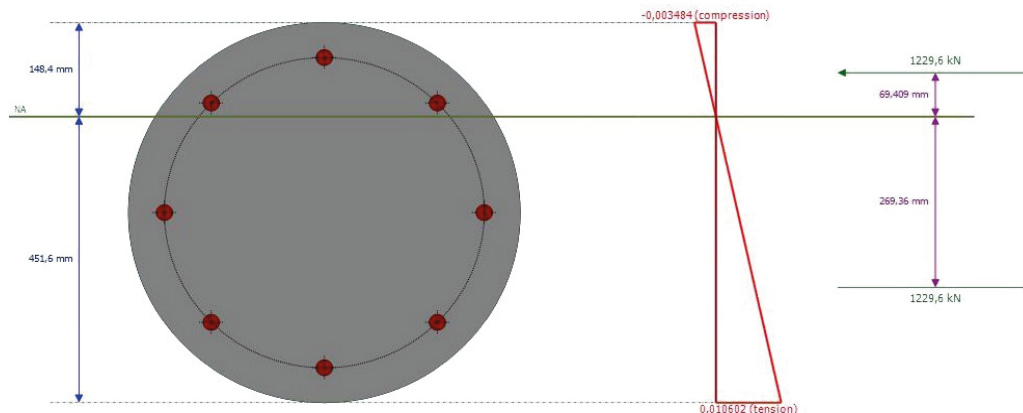


Рис. 6. Вариант 2. Предельные усилия, кН

Fig. 6. Option 2. Ultimate forces, kN

Результаты расчета по варианту 2 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 416,6 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в бетоне представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 22,98 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 2, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 416,6$ кНм.

Полученные расчетом напряжения в арматуре показаны на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что при действующих усилиях в конструкции максимальное растягивающее напряжение составляет 500,62 МПа, что близко к нормативному сопротивлению арматуры класса А500 ($R_s = 500$ МПа). При этом в сжатой зоне бетона напряжения в арматуре составляют до -275,75 МПа.

Таким образом, напряжения в сжатой зоне бетона и напряжения в растянутой арматуре достигли нормативных сопротивлений, т. е. в конструкции достигнуто предельное состояние.

Вариант 3. Металлическая труба.

Для варианта 3 принята металлическая труба внешним диаметром 600 мм и толщиной стенки 10 мм.

Результаты расчета усилий представлены на рис. 9.

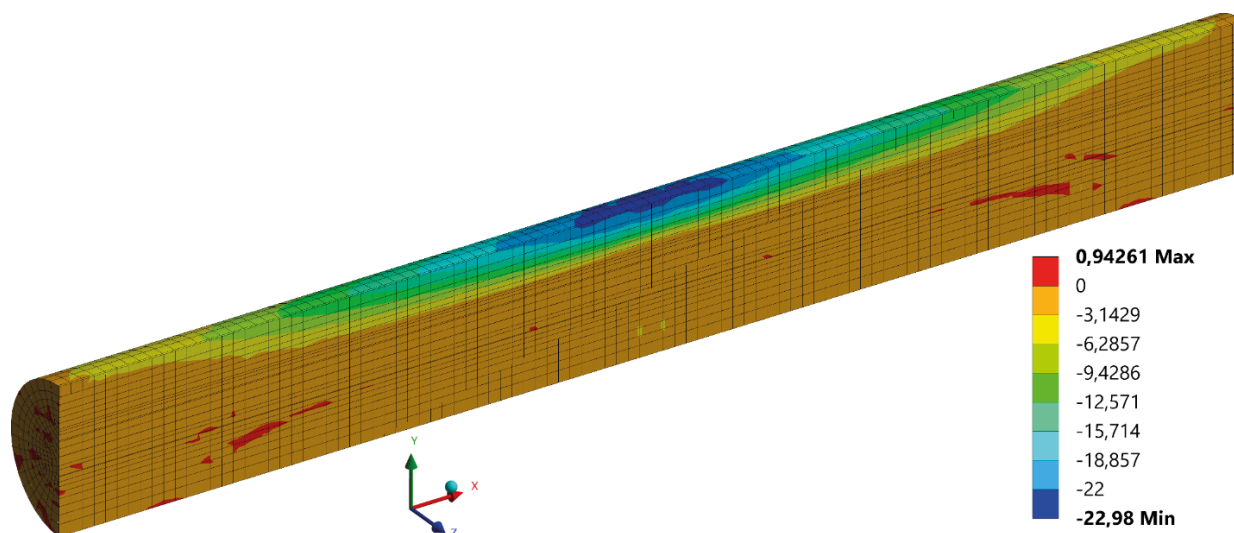


Рис. 7. Вариант 2. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 7. Option 2. Compressive stresses in concrete, MPa

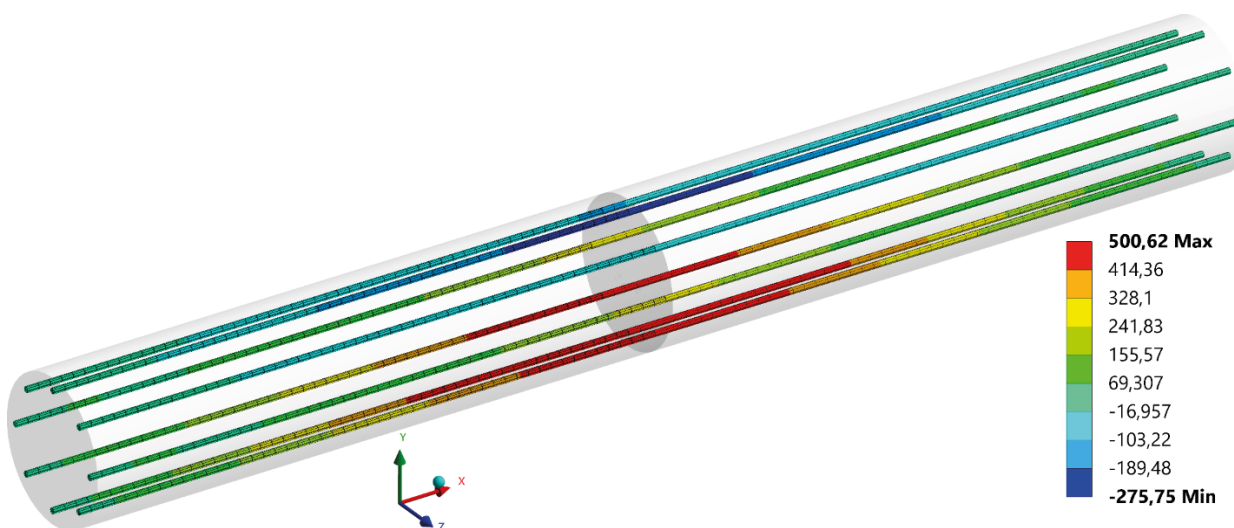


Рис. 8. Вариант 2. Напряжения в арматуре, МПа
Fig. 8. Option 2. Reinforcement, MPa

Результаты расчета по варианту 3 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 639,07 кНм.

Вариант 4. Трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном.

Для варианта 4 принята конструкция трубобетона из металлической трубы внешним диаметром 600 мм и толщиной стенки 10 мм, заполненной бетоном.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 10.

Результаты расчета по варианту 4 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 768,76 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в металлической трубе представлены на рис. 11.

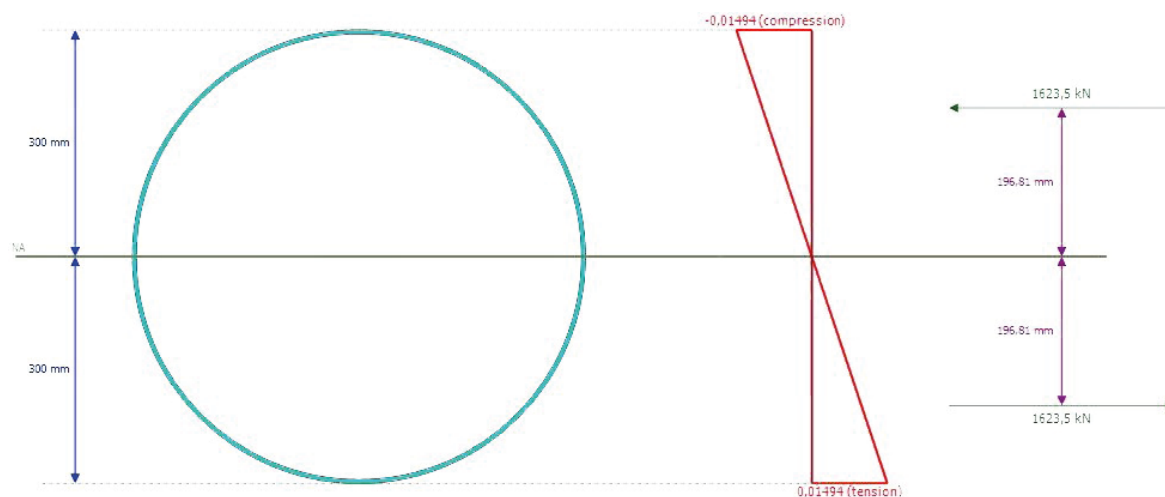


Рис. 9. Вариант 3. Предельные усилия, кН
Fig. 9. Option 3. Ultimate forces, kN

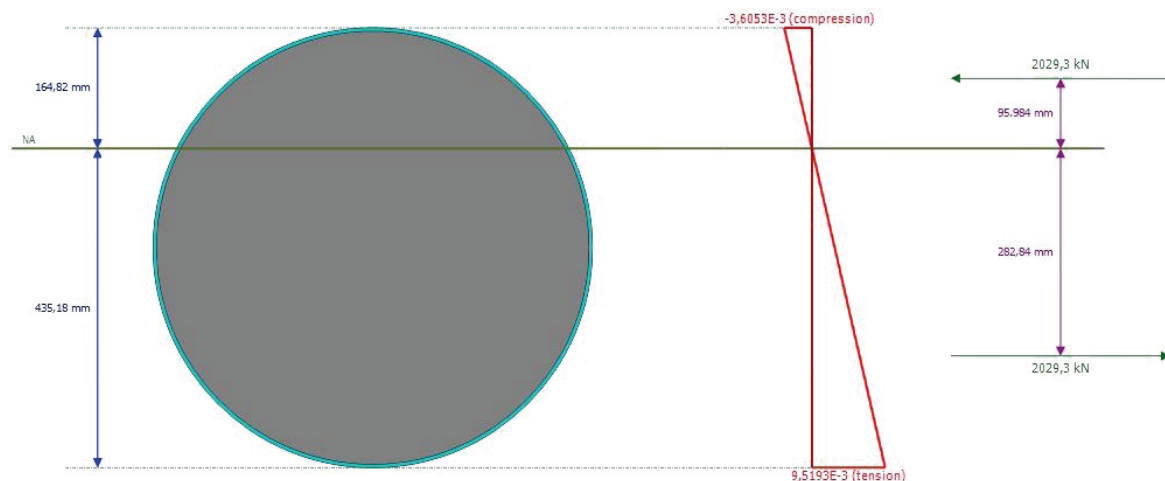


Рис. 10. Вариант 4. Предельные усилия, кН
Fig. 10. Option 4. Ultimate forces, kN

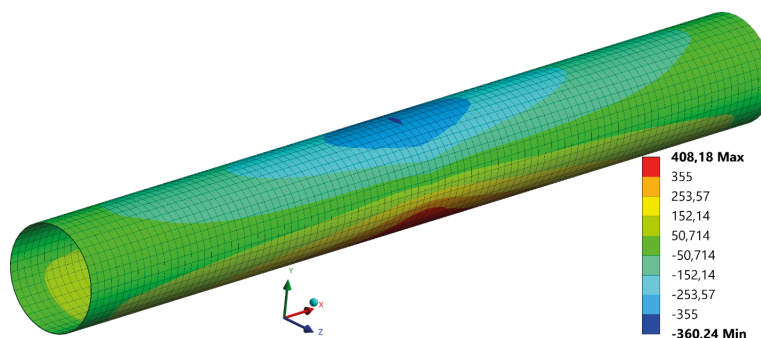


Рис. 11. Вариант 4. Напряжения в металлической трубе, МПа
Fig. 11. Option 4. Stresses in a metal pipe, MPa

Из рис. 11 видно, что максимальные напряжения в металлической трубе в области растяжения и сжатия близки к напряжениям текучести металла $R_y = 355$ МПа.

На рис. 12 представлены напряжения в бетоне.

Из рис. 12 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 26,1 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 4, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 768,76$ кНм.

Вариант 5. Армированный трубобетон, выполненный из металлической трубы с заполнением бетоном с установкой арматурного каркаса.

Для варианта 5 принята конструкция трубобетона из металлической трубы внешним диаметром 600 мм, толщиной стенки 10 мм, заполненной бетоном, и установкой арматурного каркаса в виде продольных арматурных стержней диаметром 25 мм в количестве 8 штук.

Результаты расчета напряжений и усилий представлены на рис. 13.

Результаты расчета по варианту 5 показали, что несущая способность такого шпунта увеличилась до 1085,5 кНм.

Результаты расчета сжимающих напряжений в бетоне представлены на рис. 14.

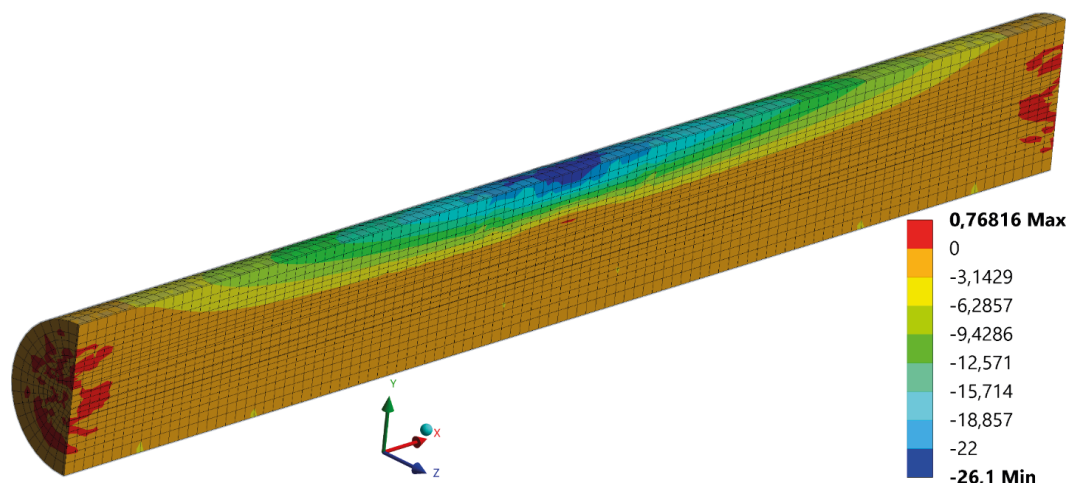


Рис. 12. Вариант 4. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 12. Option 4. Compressive stresses in concrete, MPa

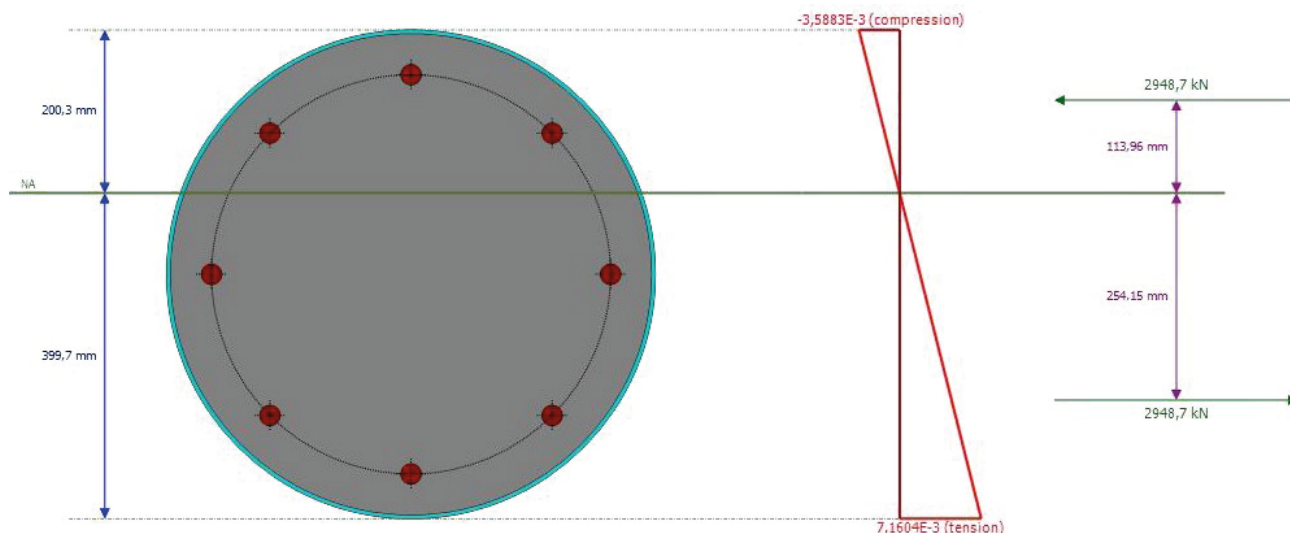


Рис. 13. Вариант 5. Предельные усилия, кН
Fig. 13. Option 5. Ultimate forces, kN

Из рис. 14 видно, что максимальное сжимающее напряжение составляет 29,54 МПа, что близко к нормативному сопротивлению бетона класса В30 ($R_{bn} = 22$ МПа).

По результатам расчета НДС предельный момент для варианта 5, вычисленный путем интегрирования горизонтальных напряжений, составляет $M_{ult} = 1085,5$ кНм.

Полученные расчетом напряжения в арматуре показаны на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что при действующих усилиях в конструкции максимальное растягивающее напряжение составляет 500,57 МПа, что близко к нормативному сопротивлению арматуры класса А500 ($R_s = 500$ МПа). При этом в сжатой зоне бетона напряжения в арматуре составляют до -330,34 МПа.

Результаты расчета сжимающих напряжений в металлической трубе представлены на рис. 16.

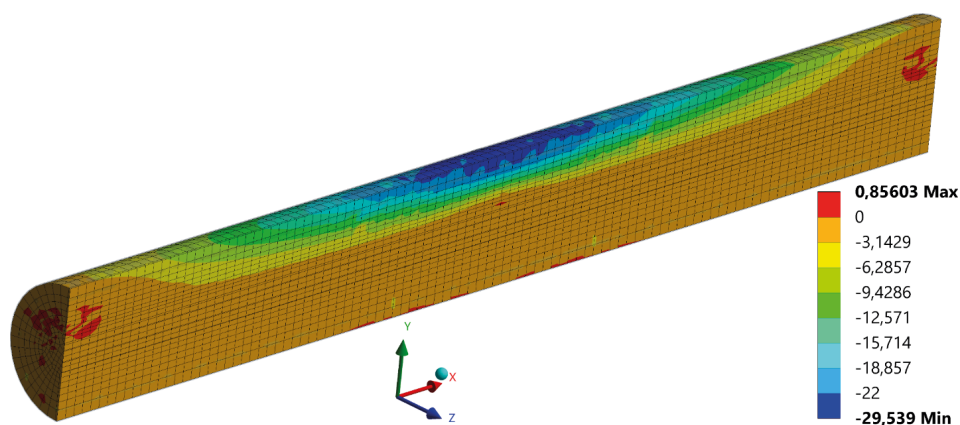


Рис. 14. Вариант 5. Сжимающие напряжения в бетоне, МПа
Fig. 14. Option 5. Compressive stresses in concrete, MPa

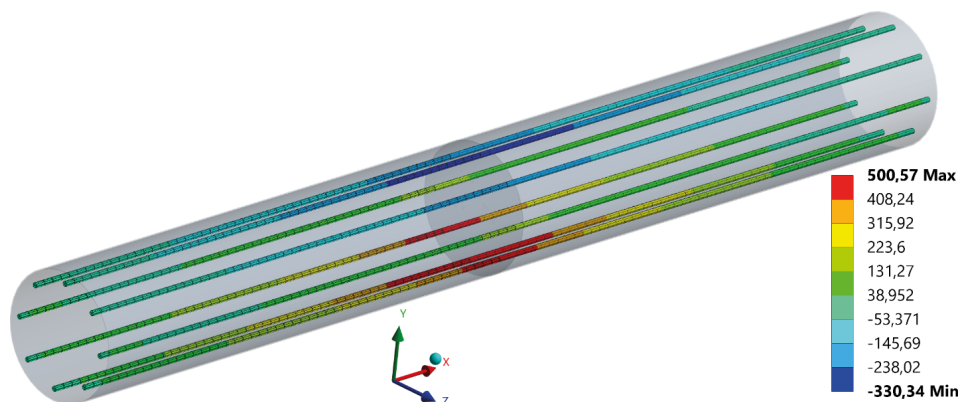


Рис. 15. Вариант 5. Напряжения в арматуре, МПа
Fig. 15. Option 5. Reinforcement stresses, MPa

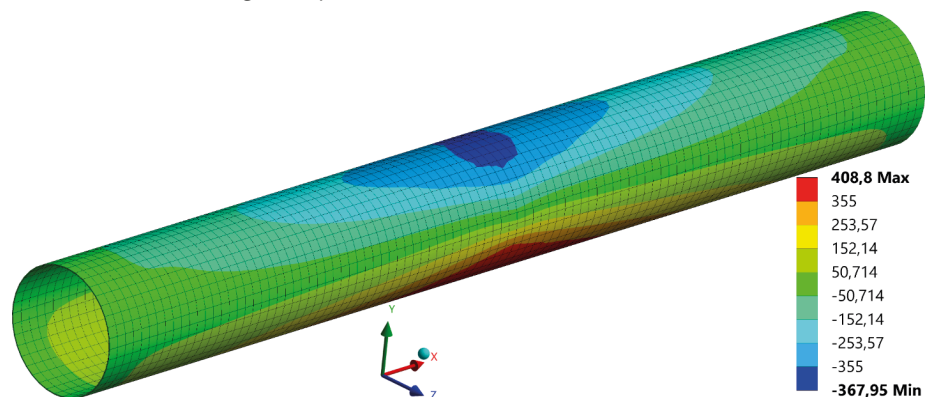


Рис. 16. Вариант 5. Напряжения в металлической трубе, МПа
Fig. 16. Option 5. Stresses in a metal pipe, MPa

Из рис. 16 видно, что максимальные напряжения в металлической трубе в области растяжения и сжатия близки к напряжениям текучести металла $R_y = 355$ МПа.

Таким образом, напряжения в сжатой зоне бетона и напряжения в растянутой арматуре достигли нормативных сопротивлений, т. е. в конструкции достигнуто предельное состояние.

Результаты сравнительных расчетов сведены в табл. 1.

Результаты сводной таблицы также представлены на рис. 17.

Как видно из рис. 17, максимальная несущая способность обнаружилась у армированного трубобетона.

На рис. 18 представлен график изменения момента при его увеличении, максимальная величина является несущей способностью.

Таблица 1
Table 1

Сводная таблица полученных результатов расчета несущей способности
Summary table of the results of the calculation of the load-bearing capacity

№ варианта	Модель	M_{ult} , кНм
1	Бетон	56,28
2	Железобетон (8 Ø 25)	416,60
3	Труба	639,07
4	Трубобетон	768,76
5	Армированный трубобетон (8 Ø 25)	1085,50

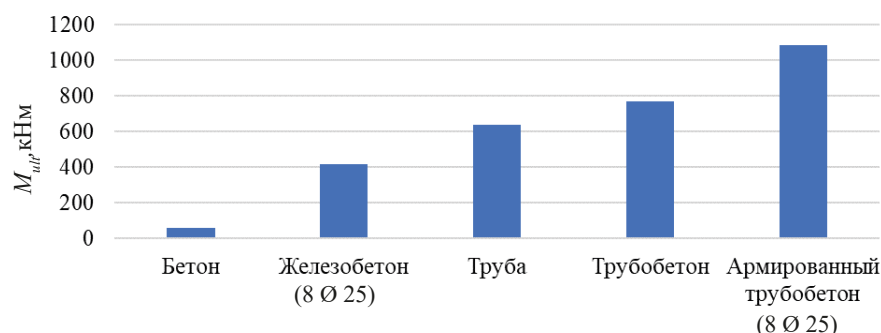


Рис. 17. Сравнение вариантов конструкции шпунта
Fig. 17. Comparison of sheet pile construction options

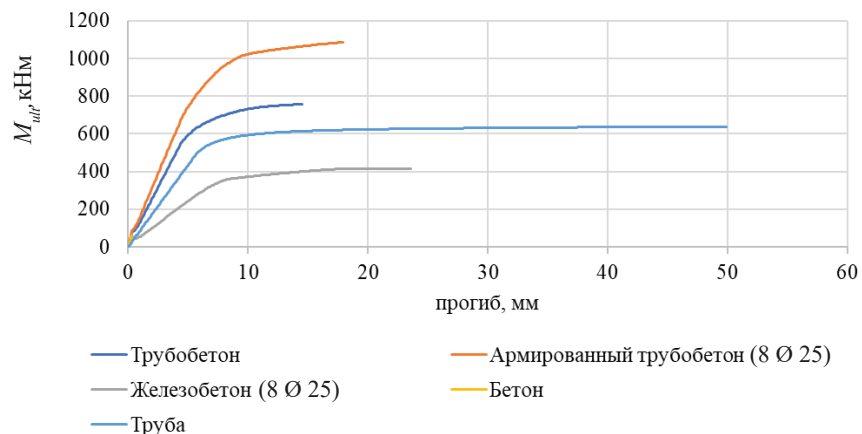


Рис. 18. Изменение момента и определение несущей способности
Fig. 18. Moment change and determination of load-bearing capacity

Таблица 2
Table 2Общая стоимость материалов для изготовления конструкций
Total cost of materials for the manufacture of structures

№ варианта	Модель	M_{ult} , кНм	Стоимость, руб.	Стоимость, руб./кНм
1	Бетон	56,28	1413,50	25,11
2	Железобетон (8 Ø 25)	416,60	3251,90	7,81
3	Труба	639,07	8658,00	13,55
4	Трубобетон	768,76	10025,00	13,04
5	Армированный трубобетон (8 Ø 25)	1085,50	11863,40	10,93

Далее оценим приблизительно стоимость материалов для изготовления конструкций, которые приведены в табл. 2.

Оценка удельной стоимости, кНм, определена делением стоимости материалов на несущую способность конструкции.

Как видно из табл. 2, минимальная стоимость удельной несущей способности у конструкции из железобетона, она составляет 7,81 руб./кНм. Далее по стоимости идет армированный трубобетон с 10,93 руб./кНм. Отношение между данными вариантами по стоимости несущей способности составляет 1,4, при этом увеличивается несущая способность в 2,61 раза.

Выводы

Трубобетон представляет собой бетон, который заливается внутри металлических труб, образующих опалубку. Этот материал используется в различных областях строительства, включая гидротехнические объекты, мосты, трубы, свайные и фундаментные конструкции. Особенность трубобетона – высокая несущая способность, устойчивость к внешним воздействиям, особенно в условиях воздействия воды, что делает его идеальным для гидротехнических сооружений.

Трубобетон обладает рядом важных преимуществ:

- высокая несущая способность;
- устойчивость к воздействию воды, что важно для гидротехнических объектов;
- удобство и скорость монтажа, что снижает время и затраты на строительство.

Для расчета напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций использовались нелинейные модели, такие как модель разрушения бетона Menetrey – Willam и модель для металла с билинейным изотропным упрочнением. Эти методы позволяют более точно моделировать поведение материалов под нагрузкой.

В статье рассмотрены различные варианты конструкций, включая:

- монолитные бетонные и железобетонные стержни;

– металлическую трубу;

– трубобетонные конструкции с использованием металлических труб и бетона (как с армированием, так и без него).

Каждая из этих конструкций была исследована с точки зрения ее несущей способности.

Результаты расчетов. Для монолитных бетонных стержней (без арматуры) несущая способность составила 56,28 кНм. Железобетонный стержень продемонстрировал несущую способность 416,6 кНм. Для металлической трубы – 639,07 кНм. Трубобетон продемонстрировал увеличение несущей способности до 768,76 кНм. Армированный трубобетон показал наибольшую несущую способность – 1085,5 кНм.

Оценка стоимости материалов показала, что минимальная стоимость несущей способности на кНм достигается при использовании железобетона (7,81 руб./кНм). Армированный трубобетон оказался дороже (10,93 руб./кНм), но с увеличением несущей способности в 2,61 раза по сравнению с железобетоном.

Результаты расчетов и сравнительного анализа показывают, что армированный трубобетон является наиболее эффективным с точки зрения несущей способности при действии изгибающего момента, хотя и имеет более высокую стоимость. В то же время железобетон и металлические трубы предлагают более экономичный вариант, но с меньшей несущей способностью. Выбор материала зависит от конкретных требований проекта, включая нагрузки, стоимость и условия эксплуатации.

Список литературы

1. Menetrey P.H., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995, vol. 92, pp. 311–318.
2. Баклыков И.В. Результаты расчетных исследований железобетонных конструкций с использованием системы внешнего усиления на основе композитных материалов // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 22–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH.

3. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Кузнецов С.Ю., Балагуров В.Б., Баклыков И.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций из легкого высокопрочного бетона (применительно к конструкции батопорта сухого дока) // *Природообустройство*. 2021. № 4. С. 58–66. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-58-66>. EDN: EFOLES.
4. Баклыков И.В. Численный анализ поведения изгибаемых железобетонных балок, изготовленных из легкого высокопрочного бетона, с разным коэффициентом армирования // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-84-89>. EDN: PZPVAI.
5. Rubin O., Bellendir E., Antonov A., Baklykov I. Computational and experimental substantiation of strengthening reinforced concrete structures with composite materials of power plants under seismic action. *Buildings*. 2024, vol. 14, issue 7, 1971. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14071971>.
6. Ляпкало А.С. Сравнение несущей способности трубобетонных колонн круглого и квадратного сечения // *Молодой ученый*. 2024. № 48 (547). С. 17–22. URL: <https://moluch.ru/archive/547/119756/>.
7. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. Москва, 2016.
8. Колмогоров Г.Л., Акулова А.А. Прочность и предельная несущая способность трубобетонных колонн // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2016. № 2 (45). С. 29–33.
9. Shi You Zhang, Kun-Peng Miao, Yang Wei, Xiaoming Xu, Bing Luo, Weizhou Shi. Experimental and Theoretical Study of Concrete-Filled Steel Tube Columns Strengthened by FRP/Steel Strips Under Axial Compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023, vol. 17, issue 1, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00556-2>.
10. Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. *Thin-Walled Structures*. 2012, vol. 56, pp. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.008>.
11. SANS 10162-1:2011. The structural use of steel. Part 1: Limit-states design of hot-rolled steelwork. SABS Standards Division.
12. EN 1994-1-1:2004 (English). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete. European Committee for Standardization.
13. Крылов С.Б., Корнюшина М.П. Численно-экспериментальные исследования прочности сжатых сталежелезобетонных элементов, выполненных с использованием высокопрочного бетона и труб квадратного сечения из стали класса С345 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 6. С. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-63>.

References

1. Menetrey P.H., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995, vol. 92, pp. 311–318.
2. Baklykov I.V. Results of computational studies of reinforced concrete structures using an external reinforcement system based on composite materials. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2024, no. 5 (624), pp. 22–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH.
3. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Kuznetsov S.Yu., Balagurov V.B., Baklykov I.V. Experimental studies of reinforced concrete structures made of light high-strength concrete (applicable to the design of the dry floating bulkhead). *Prirodoobustroystvo*. 2021, no. 4, pp. 58–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-58-66>. EDN: EFOLES.
4. Baklykov I.V. Numerical analysis of the behavior of bendable reinforced concrete beams made of lightweight high strength concrete with different reinforcement coefficients. *Prirodoobustroystvo*. 2022, no. 4, pp. 84–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2022-4-84-89>. EDN: PZPVAI.
5. Rubin O., Bellendir E., Antonov A., Baklykov I. Computational and experimental substantiation of strengthening reinforced concrete structures with composite materials of power plants under seismic action. *Buildings*. 2024, vol. 14, issue 7, 1971. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14071971>.
6. Lyapkalo A.S. Comparison of the load-bearing capacity of round and square section tubular concrete columns *Young Scientist*. 2024, no. 48 (547), pp. 17–22. URL: <https://moluch.ru/archive/547/119756/> (In Russian).
7. СП 266.1325800.2016. Composite steel and concrete structures. Design rules. Moscow, 2016. (In Russian).
8. Kolmogorov G.L., Akulova A.A. Strength and ultimate bearing capacity of tubular concrete columns. *Processing of continuous and layered materials*. 2016, no. 2 (45). pp. 29–33. (In Russian).
9. Shi You Zhang, Kun-Peng Miao, Yang Wei, Xiaoming Xu, Bing Luo, Weizhou Shi. Experimental and Theoretical Study of Concrete-Filled Steel Tube Columns Strengthened by FRP/Steel Strips Under Axial Compression. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023, vol. 17, issue 1, pp. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00556-2>.
10. Dundu M. Compressive strength of circular concrete filled steel tube columns. *Thin-Walled Structures*. 2012, vol. 56, pp. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.008>.
11. SANS 10162-1:2011. The structural use of steel. Part 1: Limit-states design of hot-rolled steelwork. SABS Standards Division.

12. EN 1994-1-1:2004 (English). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. . European Committee for Standardization.
13. Krylov S.B., Korniyushina M.P. Numerical and experimental studies of the strength of compressed steel-reinforced concrete elements made using high-strength concrete and square steel pipes of class C345. *Seismostoikoe Stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 6, pp. 53–63. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-5-53-63>.

**Информация об авторе /
Information about the author**

Игорь Вячеславович Баклыков, канд. техн. наук, главный специалист отдела расчетных исследований гидротехнических сооружений, АО «Институт Гидропроект», Москва
e-mail: moscow_igor88@mail.ru
Igor V. Baklykov, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist of the Department of Computational Studies of Hydraulic Structures, Hydroproject Institute JSC, Moscow
e-mail: moscow_igor88@mail.ru