Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering https://t-s.today

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 https://t-s.today/issue-2-2024.html

URL: https://t-s.today/PDF/05SATS224.pdf

DOI: 10.15862/05SATS224 (https://doi.org/10.15862/05SATS224)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Применение задачи Буссинеска для определения давления на поверхность грунтозасыпных мостов

[1]Пермикин А.С., [2, 3]Овчинников И.И.

[1]ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
[3]ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пермикин Анатолий Сергеевич, e-mail: prmmost@gmail.com

Аннотация. Данная статья является частью диссертационной работы «Совершенствование методов расчета и конструктивных форм грунтозасыпных мостов и труб из сталефибробетона».

В ходе проведенных ранее исследований на тему аналитического подхода к моделированию распределения давления от временной нагрузки было отмечено, что применение решения задачи Буссинеска для определения давления на несущий элемент конструкции грунтозасыпных мостов и труб из сталефибробетона дает неудовлетворительные погрешности по результатам сравнения полученных прогибов с прогибами, полученными в ходе испытаний моста статической нагрузкой.

В статье предлагается усовершенствовать законы распределения давления и добиться большей сходимости результатов расчета с результатами натурных статических испытаний моста путем введения следующих расчётных положений:

1. Учёт распределения напряжений в толще грунта от статической испытательной нагрузки как по длине так и по ширине свода несущего элемента.

2. Учёт горизонтальной составляющей давления от воздействия статической испытательной нагрузки.

3. Учет совместной работы с грунтом обратной засыпки за счет учета отпора грунтового массива путем введения коэффициента постели.

Для подтверждения состоятельности предложенного авторами способа сбора временных нагрузок на несущий элемент грунтозасыпного моста была проведена корреляция полученных в ходе исследования значений перемещений сечений несущего элемента в характерных точках со значениями, полученными в ходе натурных испытаний автодорожного моста в Вологодской области на 156 км а/д А-114 «Вологда — Новая Ладога».

Ключевые слова: грунтозасыпной мост; водопропускная труба; напряжение в грунте; задача Буссинеска; деформации; обратная засыпка

Boussinesq problem application for determining the surface pressure of soil-backfilled bridges

[1]Anatoliy S. Permikin, [2, 3]Ilya I. Ovchinnikov

[1]Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia
[2]Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
[3]Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Anatoliy S. Permikin, e-mail: prmmost@gmail.com

Abstract. This paper is part of the thesis work «Improvement of calculation methods and structural forms of soil-backfilled bridges and steel-fibre concrete pipes».

In the course of conducted earlier studies on the analytical approach to modelling the pressure distribution from temporary loading it was noted that the application of the Boussinesq problem solution to determine the pressure on the load-bearing element of the structure of soil-backfilled bridges and steel-fibre concrete pipes gives unsatisfactory errors by comparing the deflections obtained with the deflections obtained during static load tests of the bridge.

The paper proposes to improve the pressure distribution laws and to achieve greater convergence of the calculation results with the results of in-situ static bridge tests by introducing the following calculated position:

1. Taking into account stresses distribution in the soil column from the static test load both along the length and width of the load-bearing element vault.

2. Taking into account the horizontal component of pressure from the static test load.

3. Taking into account joint work with the backfill soil by taking into account the ground mass back pressure by introducing the bedding value.

To confirm the validity of the collecting temporary loads method on the bearing element of the soil-backfill bridge proposed by the authors, the values of displacements of the bearing element sections at characteristic points obtained during the research were correlated with the values obtained during field tests of the road bridge in the Vologda region at 156 km of the A-114» Vologda — Novaya Ladoga» road.

Keywords: soil-backfilled bridge; culvert; soil stress; Boussinesq problem; deformations; backfilling

Введение

Introduction

Проблема корректного сбора нагрузок, учитывающего распределение напряжений в грунте, а также учета совместной работы сталефибробетонных водопропускных труб и несущих арочных конструкций грунтозасыпных мостов с грунтом является важной темой в современных исследованиях [1; 2].

Это связано в первую очередь с несколькими важными преимуществами применения сталефибробетона как основного материала для изготовления звеньев водопропускных труб и арок грунтозасыпных мостов перед конструкциями, выполненными из традиционных материалов (бетон, железобетон, стальной прокат, металлические гофрированные конструкции и т. д.).

К преимуществам применения сталефибробетона как конструктивного материала для изготовления звеньев водопропускных труб и арок грунтозасыпных мостов относятся:

- относительно небольшой вес элементов конструкций;
- введение металлической фибры приводит к уменьшению количества и размеров микро- и в большей степени мезопор, повышая эксплуатационную надежность конструкций что выражается в стойкости к воздействию агрессивных сред за счет улучшения поровой структуры бетона [3–5];
- повышенная ударопрочность сталефибробетона по сравнению с железобетоном и тем более металлическими гофрированными конструкциями, что приводит к более мягким требованиям как к технологии обратной засыпки, так и к самим грунтам обратной засыпки, что в свою очередь снижает стоимость технологии строительства, а также уменьшает срок строительства и увеличивает срок эксплуатации [6–8].

Использование сталефибробетонных арок, как несущих элементов грунтозасыпных мостов, позволит в перспективе перекрывать пролеты длиной свыше 60 метров, возводить сооружения для пропуска автомобильных и железных дорог в разных уровнях (путепроводы), тоннели, выполненные открытым способом в плотной городской застройке, а повышенная ударопрочность — веерные сооружения для защиты дорог от камнепадов и другие конструкции. При этом технологичность производства работ, а также сроки их проведения значительно ниже сроков проведения строительно-монтажных работ сооружений, имеющих аналогичную область применения изготовленных из железобетона и металлических гофрированных конструкций.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Однако на пути к применению сталефибробетона, как основного материала при изготовлении звеньев водопропускных труб и арок грунтозасыпных мостов находятся большие трудности, связанные с отсутствием надежных схем сбора нагрузок на заглубленные сооружения и расчетных схем, учитывающих не только усилия от веса грунта обратной засыпки, а также распределение напряжений в теле насыпи от тележек подвижных нагрузок АК и НК.

И даже применение метода конечных элементов не может всеобъемлюще описать распределение напряжений в грунте обратной засыпки.

На каждый тип грунта необходимо создавать свою конечноэлементную модель, на каждое изменение параметра арки (длина, высота, стрела подъема) также необходимо создавать свою конечноэлементную модель, что в итоге приводит к огромным трудозатратам инженеров уже на стадии вариантного проектирования, поэтому сейчас мы видим ограниченное использование грунтозасыпных мостов на сети автомобильных дорог Российской Федерации [9–11].

В настоящее время для проектирования железобетонных водопропускных труб используются следующие нормативные документы: ВСН 81-80 «Инструкция на изготовление, строительство и засыпку сборных бетонных и железобетонных водопропускных труб», СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы.

Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменениями № 1, 2, 3), а также типовые серии». Для проектирования сталефибробетона применяется СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования (с Изменением № 1)».

Данные документы рассматривают железобетонные и бетонные водопропускные трубы и не распространяются на конструкции грунтозасыпных мостов. На данном этапе развития расчетных моделей и конструктивных форм грунтозасыпных мостов в Российской Федерации не созданы нормативные документы, регламентирующие их проектирование и строительство. Это существенно тормозит развитие строительства грунтозасыпных мостов на сети автомобильных и железных дорог, а также для прокладки подземных тоннелей в зоне плотной городской застройки.

Огромным шагом к повсеместному применению грунтозасыпных мостов может стать создание серии типовых проектов грунтозасыпных сталефибробетонных мостов и водопропускных труб, а также описание обобщенной методики их расчета совместно с грунтовой обоймой обратной засыпки.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Исходные данные

Initial data

Физико-механические свойства грунтового массива приняты по результатам лабораторных исследований и полевых испытаний, сохранившимся со времен строительства моста (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические свойства грунтового массива

Physical and mechanical properties of the soil mass

Модуль деформации *E*, МПа *Modulus of deformation E, MPa*	Коэффициент Пуассона ν *Poisson's ratio ν*	Коэффициент сцепления *c*, МПа *Adhesion coefficient c, MPa*	Угол внутреннего трения φ, градусы *Drained angle of internal friction φ, degrees*	Предельное напряжение при растяжении R_t, МПа *Ultimate tensile stress Rt, MPa*
22,6	0,3	0,001	30	0

Для получения перемещений узлов арки в характерных сечениях, предлагается использовать ПК «ЛИРА — САПР».

В качестве исходных данных использованы сосредоточенные нагрузки от колес трехосного автомобиля N_i, координаты точек сил x приложения нагрузок, радиус свода грунтозасыпного моста R, ширина свода по грунту B.

Вертикальное давление от грунта засыпки и собственный вес конструкции не учитываются, так как при натурных испытаниях измерялись именно относительные перемещения сечений от статической испытательной нагрузки.

Построение геометрической схемы

Geometric layout design

В качестве расчетной схемы была принята двухшарнирная один раз статически неопределимая арка круглого очертания с радиусом по нейтральной оси R = 6 м, шириной свода по краю засыпки B = 14 м, общей шириной свода b = 16 м. При построении геометрической схемы криволинейные элементы арки между узлами, заданными формульно (рис. 1) и расположенными на оси арки, заменялись прямолинейными стержнями в силу специфики построения плоских расчетных схем в ПК «Лира».

Шаг расположения узлов с номерами i = 1, 3–49 по оси x в геометрической схеме — 0,5 м. Затем каждый из 24 полученных круговых сегментов был поделен биссектрисой пополам, а точки пересечения

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

биссектрисы и нейтральной оси моделировались узлами с номерами i = 2, 4–48. Количество узлов — 49 шт. Количество стержней — 48 шт.

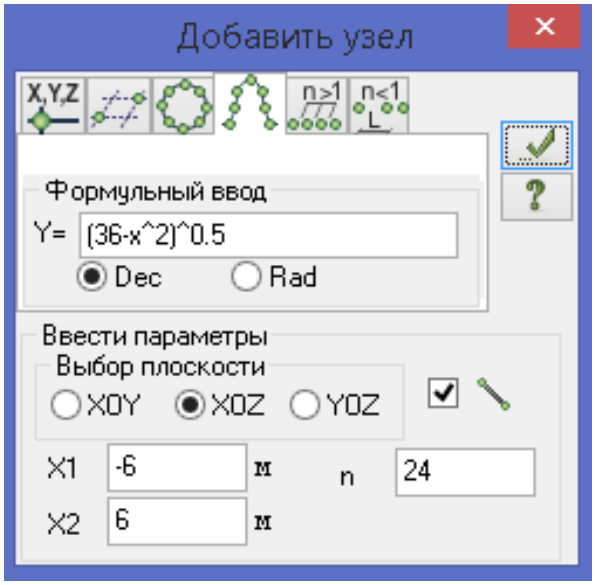
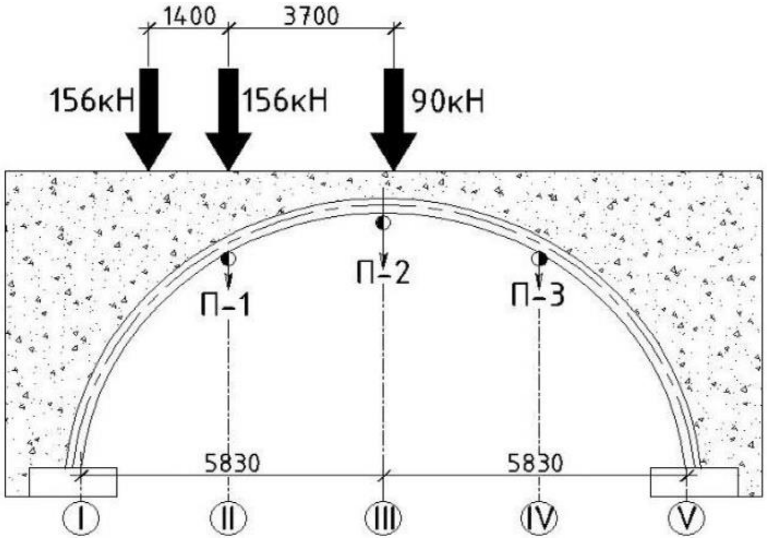


Рисунок 1. *Формульный ввод узлов в ПК «Лира» (составлено авторами)*

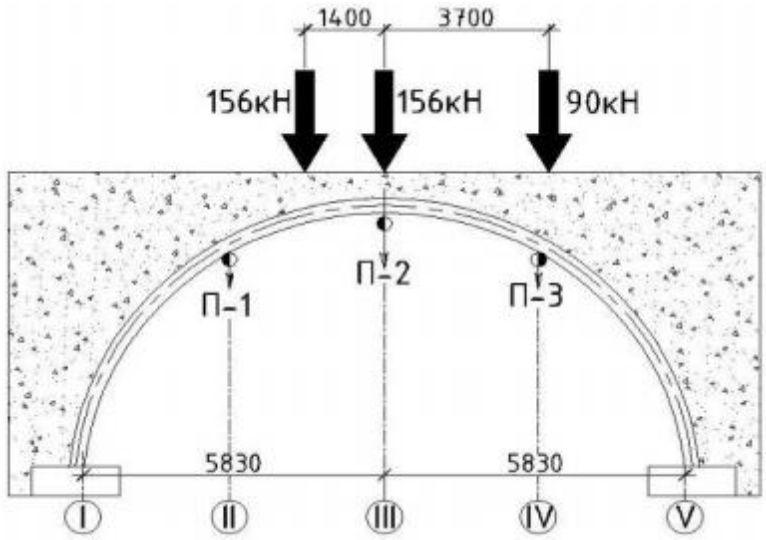
Figure 1. *Formular input of nodes in software package «Lira» (compiled by the authors)*

Нагрузку от трехосного автомобиля VOLVO FM 400 общей массой 41т с нагрузкой на заднюю тележку 312 кН и переднюю ось 90 кН примем как шесть сосредоточенных сил (от каждого колеса в трёх осях) $N_{1,2} = 78$ кН; $N_{3,4} = 78$ кН; $N_{5,6} = 45$ кН и расположим симметрично относительно оси проезжей части с координатами $y = \pm 1{,}05$ *м* , а относительно замка арки — согласно схемам загружения. Схемы загружения на рисунке 2 соответствуют схемам загружения при измерении прогибов в сечениях *n* = II, III, IV [1; 13].

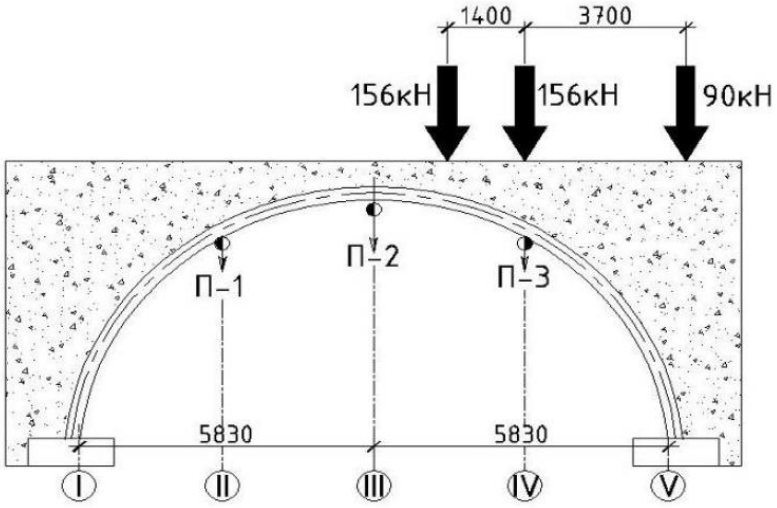


а)

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com



б



в

Рисунок 2. *Схемы загружения моста испытательной нагрузкой при измерении прогибов в сечении: (а) n = II; (б) n = III; (в) n = IV (заимствовано из [1])*

Figure 2. *Bridge loading diagram with test load when measuring deflections in section: (a) n = II; (b) n = III; (c) n = IV (taken from [1])*

Сбор нагрузок на поверхность арки

Load summary on the arch surface

Определение вертикального давления на поверхность арки

Determination of vertical pressure on the arch surface

Закон распределения и передачи вертикального давления в грунтовом массиве по длине пролета арки в общем виде примем в виде задачи Буссинеска [3]:

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

$$p_{jnz} = \frac{3 \cdot N_j \cdot z^3}{2 \cdot \pi \cdot (z^2 + x^2 + y^2)^{2,5}}, \quad (1)$$

где p_{jnz} — величина переданного вертикального давления от силы N_j в точке полупространства в сечении n, кН/м^2 (n = II, III, IV); N_j — величина сосредоточенной нагрузки от колеса , кН (j = 1, 2, 3, 4, 5, 6); z — глубина залегания точки, в которой определяется давление; x — координата горизонтальной проекции точки, в которой определяется давление, относительно замка арки.

Законы изменения вертикального давления $p_{nz}(x, y)$ имеют следующий вид, представленный на рисунках 3–5.

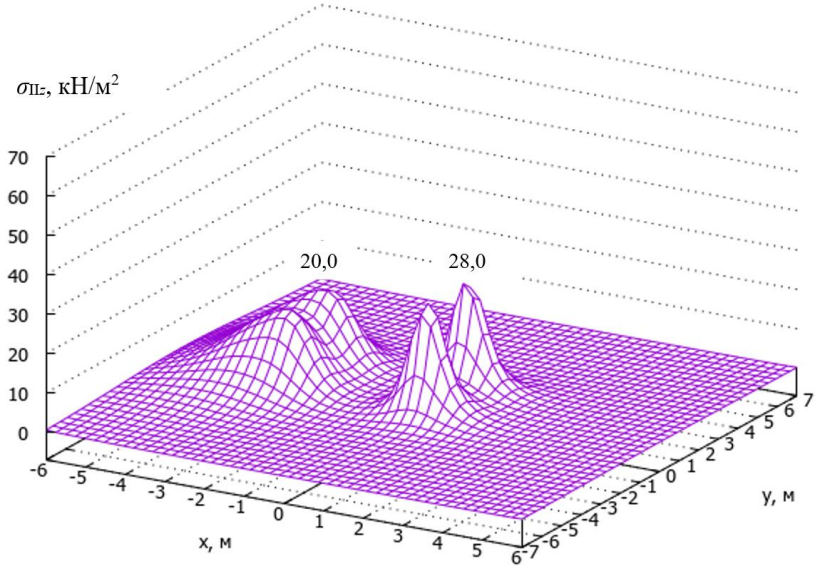


Рисунок 3. *Распределение напряжений $p_{II\,z}$ по поверхности арки (составлено авторами)*

Figure 3. *Stresses distribution pII z on the arch surface (compiled by the authors)*

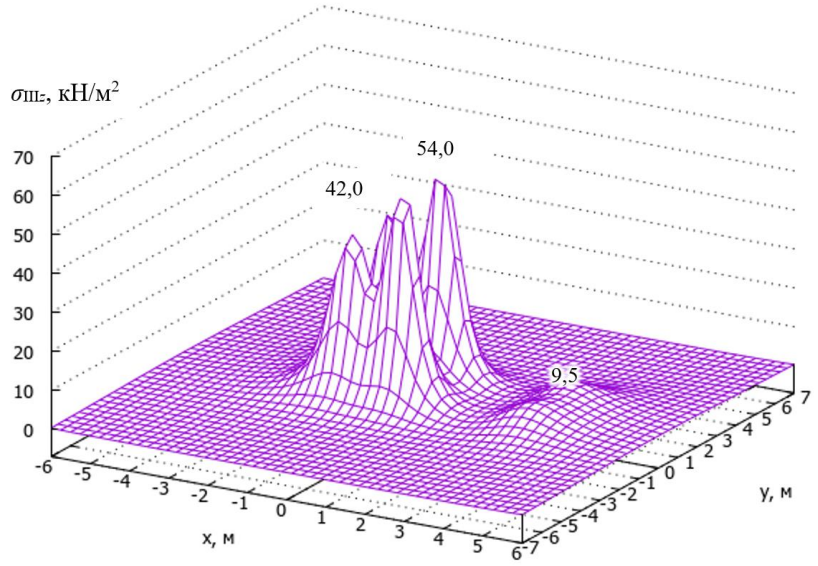


Рисунок 4. *Распределение напряжений $p_{III\,z}$ по поверхности арки (составлено авторами)*

Figure 4. *Stresses distribution pIII z on the arch surface (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

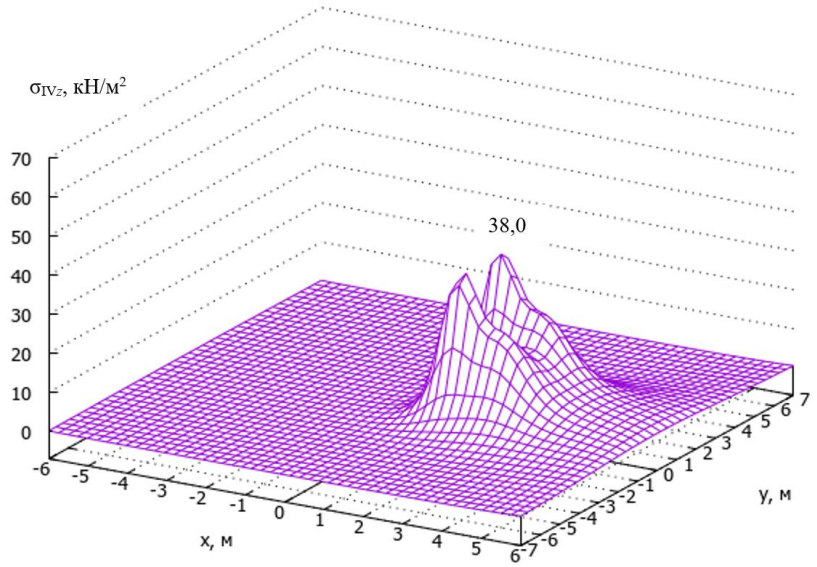


Рисунок 5. *Распределение напряжений $p_{IV\,z}$ по поверхности арки (составлено авторами)*

Figure 5. *Stress distribution pIV z on the arch surface (compiled by the authors)*

Законы изменения вертикальной распределённой силы $P_{j\,II\,z}$, $P_{j\,III\,z}$, $P_{j\,IV\,z}$ (кН/м), позволяющие определить нагрузку в любой точке, расположенной на оси арки, от каждой из сосредоточенных сил N_j имеют вид:

$$P_{1,2\,II\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x + 4,4)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (2)$$

$$P_{3,4\,II\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x + 3)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (3)$$

$$P_{5,6\,II\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 67,5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x - 0,7)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (4)$$

$$P_{1,2\,III\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x + 1,4)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (5)$$

$$P_{3,4\,III\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + x^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (6)$$

$$P_{5,6\,III\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 67,5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x - 3,7)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (7)$$

$$P_{1,2\,IV\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x - 1,6)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (8)$$

$$P_{3,4\,IV\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6,67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6,67)^2 + (x - 3)^2 + (y \pm 1,05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (9)$$

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

$$P_{5,6\,IV\,z}(x) = \int_{-7}^{7} 67{,}5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^3}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 6{,}7)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy. \quad (10)$$

Законы изменения давления составлены с учетом минимальной толщины засыпки по оси дороги 0,67 м [1].

Областью определения законов (2)–(10) по оси *x* являются интервалы, выбранные с учетом возможности передачи давления от сосредоточенной силы. Границами интервалов являются места касания с поверхностью арки радиус — векторов, берущих начало в месте приложения нагрузок N_j (рис. 6–8).

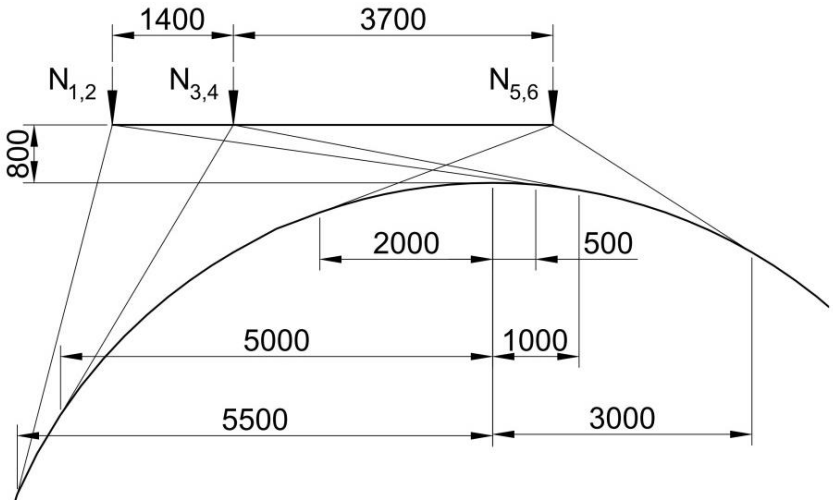


Рисунок 6. *Места касания радиус-векторов с поверхностью арки. Сечение n = II (составлено авторами)*

Figure 6. *Tangency locations of radius vectors with the arch surface. Section n = II (compiled by the authors)*

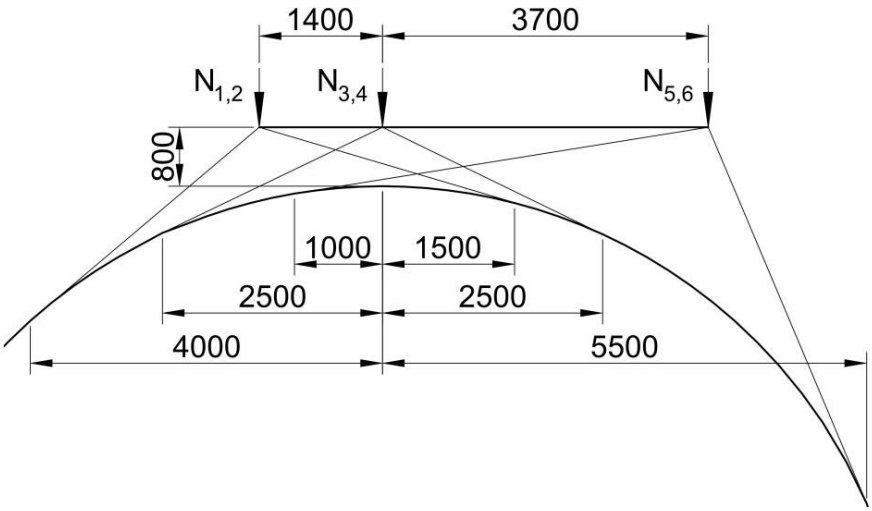


Рисунок 7. *Места касания радиус-векторов с поверхностью арки. Сечение n = III (составлено авторами)*

Figure 7. *Tangency locations of radius vectors with the arch surface. Section n = III (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

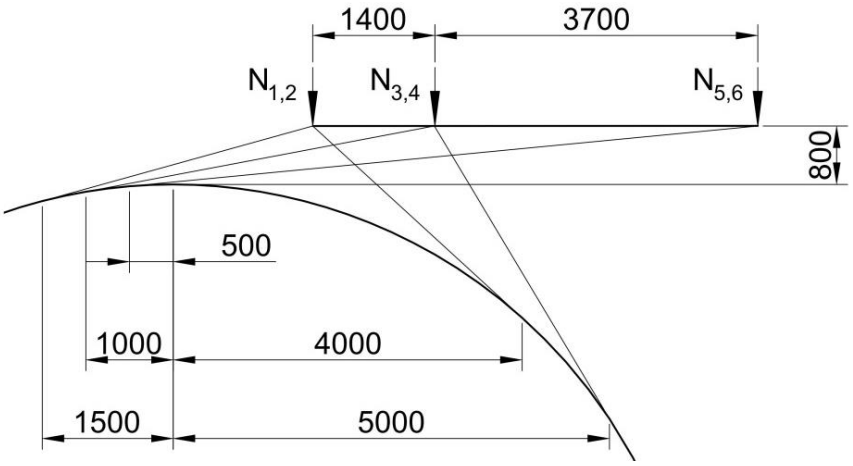


Рисунок 8. *Места касания радиус-векторов с поверхностью арки. Сечение n = III (составлено авторами)*

Figure 8. *Tangency locations of radius vectors with the arch surface. Section n = III (compiled by the authors)*

Суммарные ординаты давления P_{nz} по всему пролету арки для каждого из сечений n найдем по принципу суперпозиции:

$$P_{nz} = \sum_j^{j=6} P_{jnz}. \quad (11)$$

Законы изменения нагрузки $P_{nz}(x)$ имеют следующий вид, представленный на рисунках 9–11.

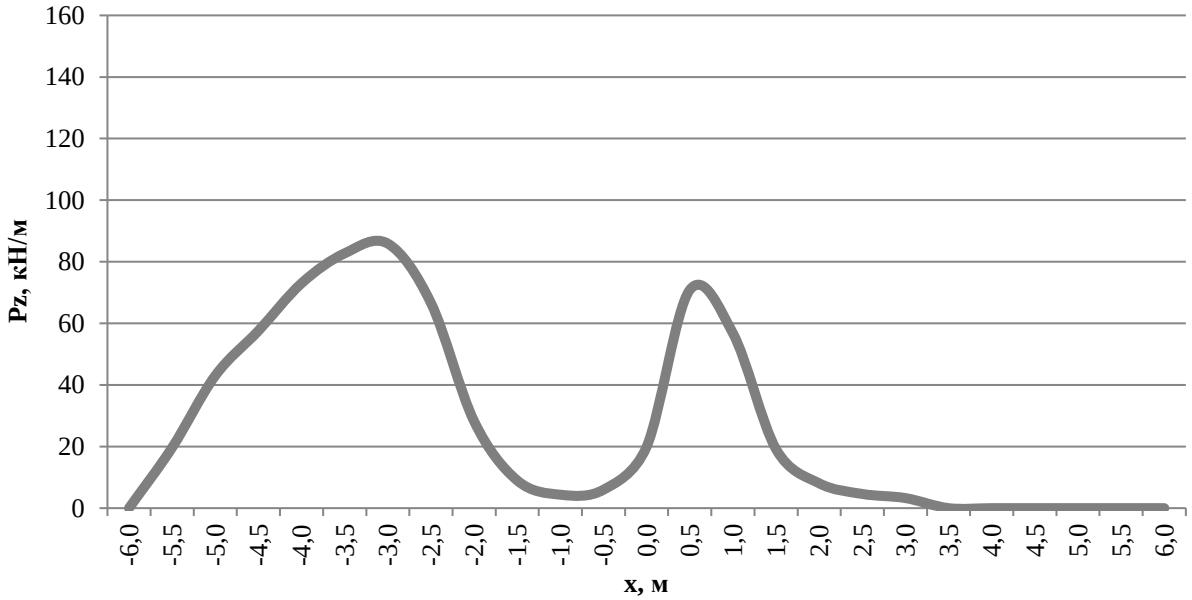


Рисунок 9. *Значения распределенной нагрузки $P_{II\,z}$ вдоль продольной оси арки (составлено авторами)*

Figure 9. *Distributed load values PII z along the longitudinal axis of the arch (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

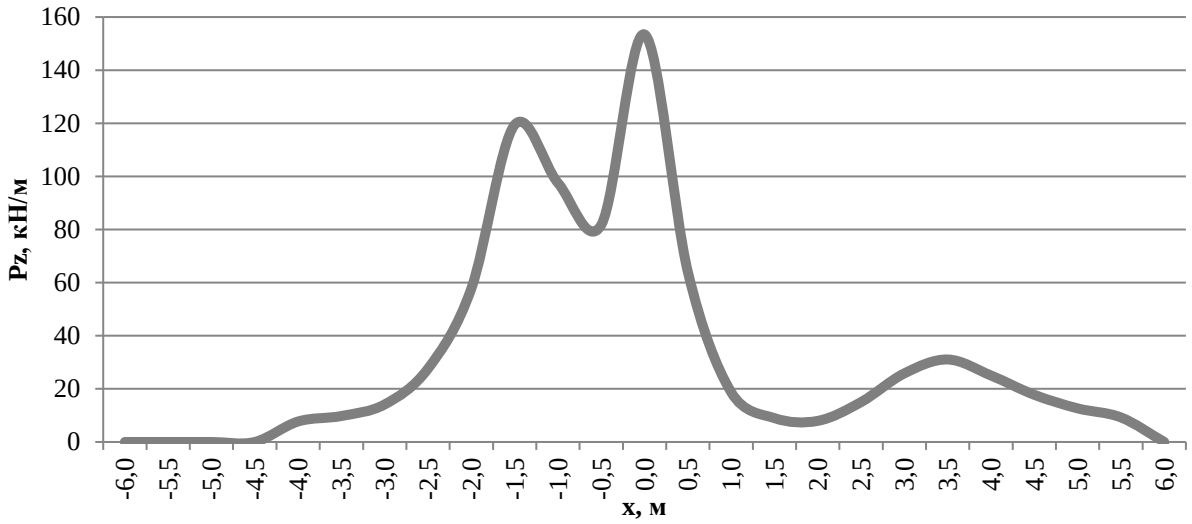


Рисунок 10. *Значения распределенной нагрузки $P_{III\,z}$ вдоль продольной оси арки (составлено авторами)*

Figure 10. *Distributed load values PIII z along the longitudinal axis of the arch (compiled by the authors)*

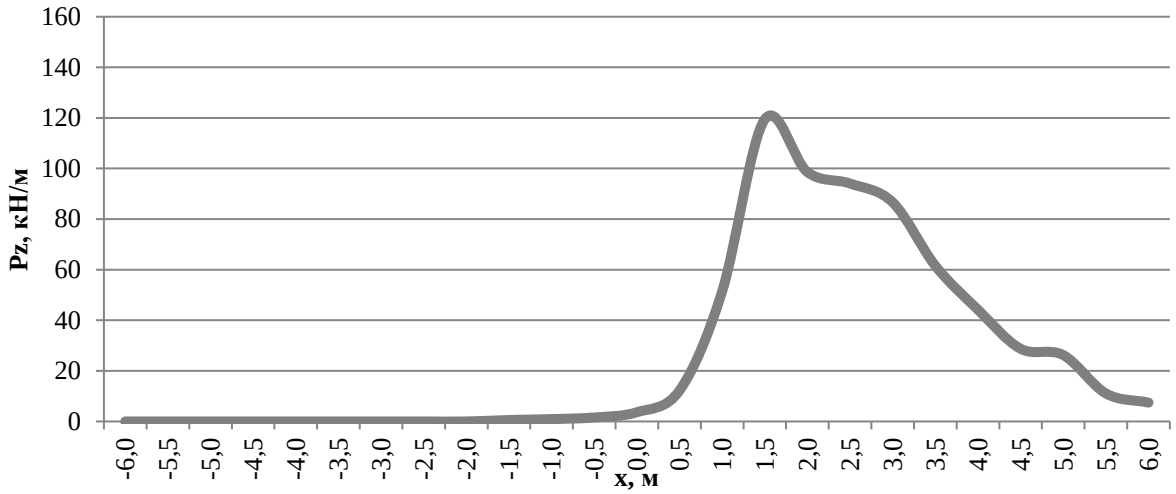


Рисунок 11. *Значения распределенной нагрузки $P_{IV\,z}$ вдоль продольной оси арки (составлено авторами)*

Figure 11. *Distributed load values PIV z along the longitudinal axis of the arch (compiled by the authors)*

Определение горизонтального давления на поверхность арки

Determination of horizontal pressure on the arch surface

Закон распределения и передачи горизонтального давления в грунтовом массиве по длине пролета арки в общем виде примем в виде задачи Буссинеска [3; 12]:

$$p_{jnx} = \frac{3 \cdot N_j \cdot z^2 \cdot x}{2 \cdot \pi \cdot (z^2 + x^2 + y^2)^{2,5}}, \quad (12)$$

где p_{jnx} — величина переданного горизонтального давления от силы N_j в точке полупространства в сечении n, кН/м^2 (n = II, III, IV); N_j — величина сосредоточенной нагрузки от колеса , кН (j = 1, 2, 3, 4, 5, 6); z — глубина залегания точки, в которой определяется давление; x — координата горизонтальной проекции точки, в которой определяется давление, относительно замка арки.

Законы изменения горизонтального давления P_{jnx} от каждой из сосредоточенных сил по длине пролета имеют вид:

$$P_{1,2\ \mathrm{II}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot (x + 4{,}4)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x + 4{,}4)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (13)$$

$$P_{3,4\ \mathrm{II}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot (x + 3{,}0)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x + 3{,}0)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (14)$$

$$P_{5,6\ \mathrm{II}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 67{,}5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^3 \cdot (x - 0{,}7)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 0{,}7)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (15)$$

$$P_{1,2\ \mathrm{III}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot (x + 1{,}4)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x + 1{,}4)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (16)$$

$$P_{3,4\ \mathrm{III}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot x}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + x^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (17)$$

$$P_{5,6\ \mathrm{III}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 67{,}5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^3 \cdot (x - 3{,}7)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 3{,}7)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (18)$$

$$P_{1,2\ \mathrm{IV}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot (x - 1{,}6)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 1{,}6)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (19)$$

$$P_{3,4\ \mathrm{IV}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 117 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^2 \cdot (x - 3{,}0)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 3{,}0)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy, \quad (20)$$

$$P_{5,6\ \mathrm{IV}\ x}(x) = \int_{-7}^{7} 67{,}5 \cdot \frac{\left((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67\right)^3 \cdot (x - 6{,}7)}{\pi \cdot (((36 - x^2)^{0,5} - 6{,}67)^2 + (x - 6{,}7)^2 + (y \pm 1{,}05)^2)^{2,5}}\, dy. \quad (21)$$

Областью определения законов (13)–(21) по оси x являются интервалы, выбранные с учетом возможности передачи давления от сосредоточенной силы (рис. 6–8).

Суммарные ординаты давления P_{nx} по всему пролету арки для каждого из сечений n найдем по принципу суперпозиции:

$$P_{nx} = \sum_j^{j=6} P_{jnx}. \quad (22)$$

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Стоит отметить, что стержням с номерами узлов 1–25 задаются только те нагрузки P_{nx}, которые имеют положительное направление относительно оси *x*, то есть с положительным знаком перед ординатами. Стержням с номерами узлов 25–49 задаются только те нагрузки P_{nx}, которые имеют отрицательное направление относительно оси *x*, то есть с отрицательным знаком перед ординатами.

Значения ординат распределенных нагрузок $P_{\text{II }z}$, $P_{\text{III }z}$, $P_{\text{IV }z}$, $P_{\text{II }x}$, $P_{\text{III }x}$, $P_{\text{IV }x}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Значения ординат распределенных нагрузок

Ordinate value of distributed loads

x, м	i		P II z, кН/м	P III z, кН/м	P IV z, кН/м	P II x, кН/м	P III x, кН/м	P IV x, кН/м
-6,0	1		-	-	-	-	-	-
-5,5	3		19,67	-	-	-5,06	-	-
-5,0	5		43,02	-	-	-14,25	-	-
-4,5	7		57,59	-	-	-13,13	-	-
-4,0	9		73,02	7,72	-	-6,36	-9,13	-
-3,5	11		82,75	9,79	-	4,42	-11,44	-
-3,0	13		85,90	14,15	-	17,64	-15,36	-
-2,5	15		66,60	27,63	-	35,30	-28,42	-
-2,0	17		28,21	57,78	-	27,81	-39,85	-
-1,5	19		8,98	119,41	0,58	11,85	-25,37	-2,10
-1,0	21		4,36	97,55	0,94	2,05	19,33	-3,51
-0,5	23		5,99	81,72	1,57	-5,59	-19,41	-5,22
0,0	25		19,95	153,44	3,64	-18,46	10,28	-9,42
0,5	27		70,85	64,02	12,23	-19,07	49,43	-21,01
1,0	29		56,79	18,75	51,42	23,34	24,89	-44,84
1,5	31		19,15	8,99	119,45	17,81	11,85	-25,64
2,0	33		8,07	7,95	98,59	10,35	1,54	3,66
2,5	35		4,61	15,03	94,06	6,83	-5,82	-0,30
3,0	37		3,27	25,85	86,60	5,10	-12,28	15,86
3,5	39		-	31,06	61,54	-	-3,46	22,97
4,0	41		-	25,03	44,18	-	3,42	19,16
4,5	43		-	17,77	28,74	-	5,26	5,65
5,0	45		-	12,65	26,25	-	4,90	4,00
5,5	47		-	9,25	11,08	-	3,90	-3,11
6,0	49		-	-	7,46	-	-	-0,78

Составлено авторами / Compiled by the authors

Определение коэффициентов постели

Bedding values determination

Коэффициенты постели c_1 для каждого стержня посчитаны в соответствии с приложением В.[1] Коэффициент постели в ПК «Лира»

[1] СП 24.13330.2011 с изм. № 1, 2, 3. Свайные фундаменты = Pile foundations: свод правил: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря 2010 г. N 786: актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85: дата введения 20-05-2011 / Разработан НИИОСП имени Н.М. Герсеванова — институтом ОАО "НИЦ "Строительство" — Москва: Стандартинформ, 2019. — Текст: электронный.

действует по направлению местной оси стержня z. Расчетное значение коэффициента постели найдем по формуле:

$$c_z = c_1 / sin\ \varepsilon\ . \quad (23)$$

Коэффициент постели задается только тем стержням, перемещение которых происходит «за» контур недеформированной схемы.

Значения коэффициентов постели для левой половины арки приведены в таблице 3. Значения коэффициентов постели для правой половины арки аналогичны приведенным.

Таблица 3 / Table 3

Расчет коэффициентов постели

Bedding values calculation

i	Глубина расположения центра тяжести стержня, м *Gravity center position depth of the rod, m*	Коэффициент пропорциональности, кН/м^4 *Proportionality coefficient, kN/m^4*	Коэффициент постели грунта c_1, кН/м^3 *Soil bedding value c_1, kN/m^3*	α	Коэффициент постели грунта c_z, кН/м^3 *Soil bedding value c_z, kN/m^3*
24 25	0,67	6 000	4 020	0,017	230 341
23 24	0,68		4 080	0,070	58 489
22 23	0,7		4 200	0,105	40 180
21 22	0,74		4 440	0,139	31 903
20 21	0,78		4 680	0,191	24 527
19 20	0,83		4 980	0,225	22 138
18 19	0,9		5 400	0,276	19 591
17 18	0,97		5 820	0,309	18 834
16 17	1,06		6 360	0,358	17 747
15 16	1,16		6 960	0,342	20 350
14 15	1,27		7 620	0,485	15 718
13 14	1,41		8 460	0,485	17 450
12 13	1,55		9 300	0,515	18 057
11 12	1,71		10 260	0,559	18 348
10 11	1,9		11 400	0,602	18 943
9 10	2,09		12 540	0,643	19 509
8 9	2,32		13 920	0,695	20 039
7 8	2,57		15 420	0,731	21 084
6 7	2,86		17 160	0,777	22 081
5 6	3,19		19 140	0,805	23 780
4 5	3,58		21 480	0,865	24 821
3 4	4,04		24 240	0,904	26 819
2 3	4,86		29 160	0,951	30 655
1 2	6,06		36 360	0,992	36 658

Составлено авторами / Compiled by the authors

Загружения модели

Model load testing

Модели арки с заданными вертикальными $P_{n\,z}\,, кН/м$ и горизонтальными $P_{n\,x}\,, кН/м$ нагрузками показаны на рисунках 12–17.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

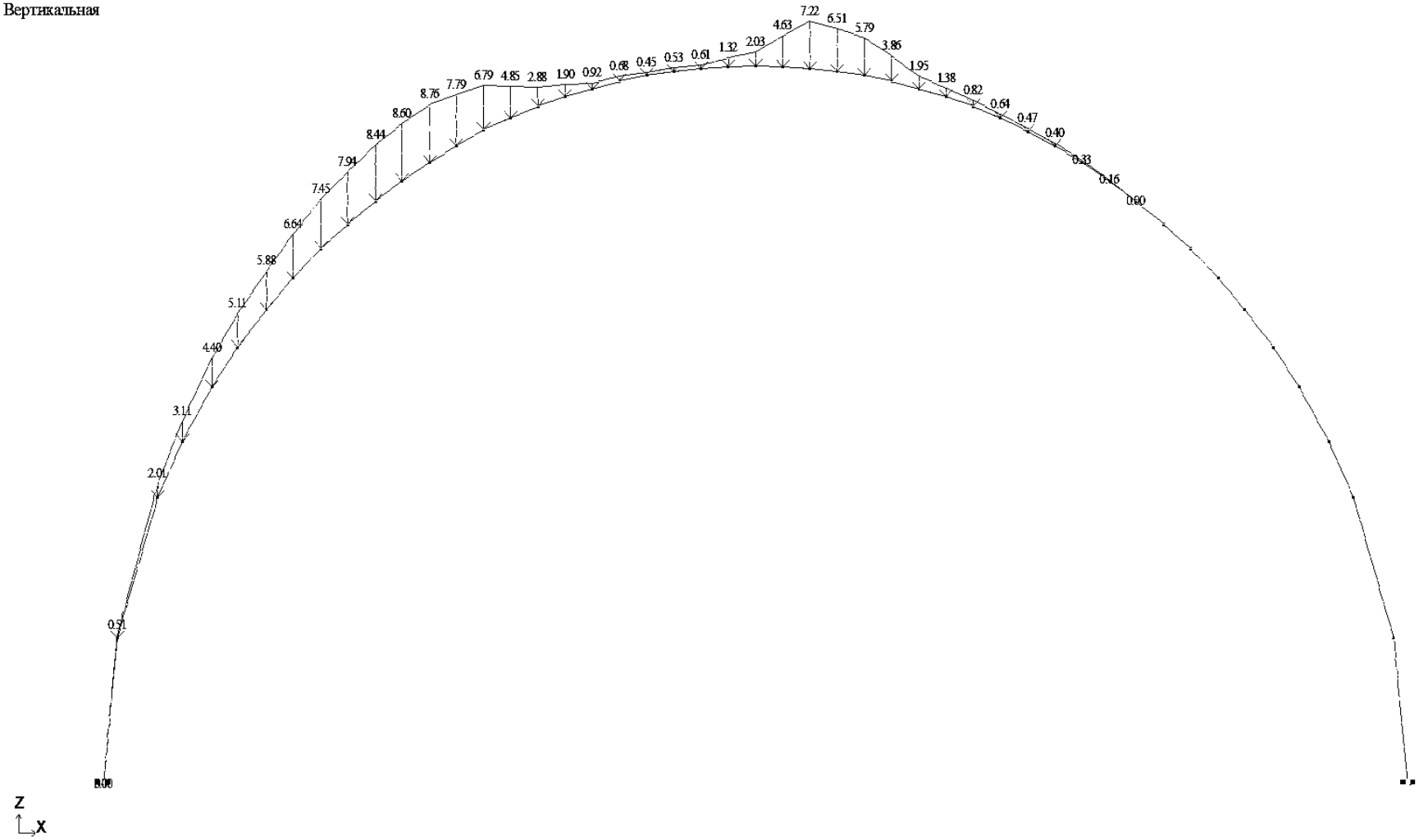


Рисунок 12. *Модель арки с нагрузкой* $P_{II\,z}$ *,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 12. *Arch model with PII load z, kN/m (compiled by the authors)*

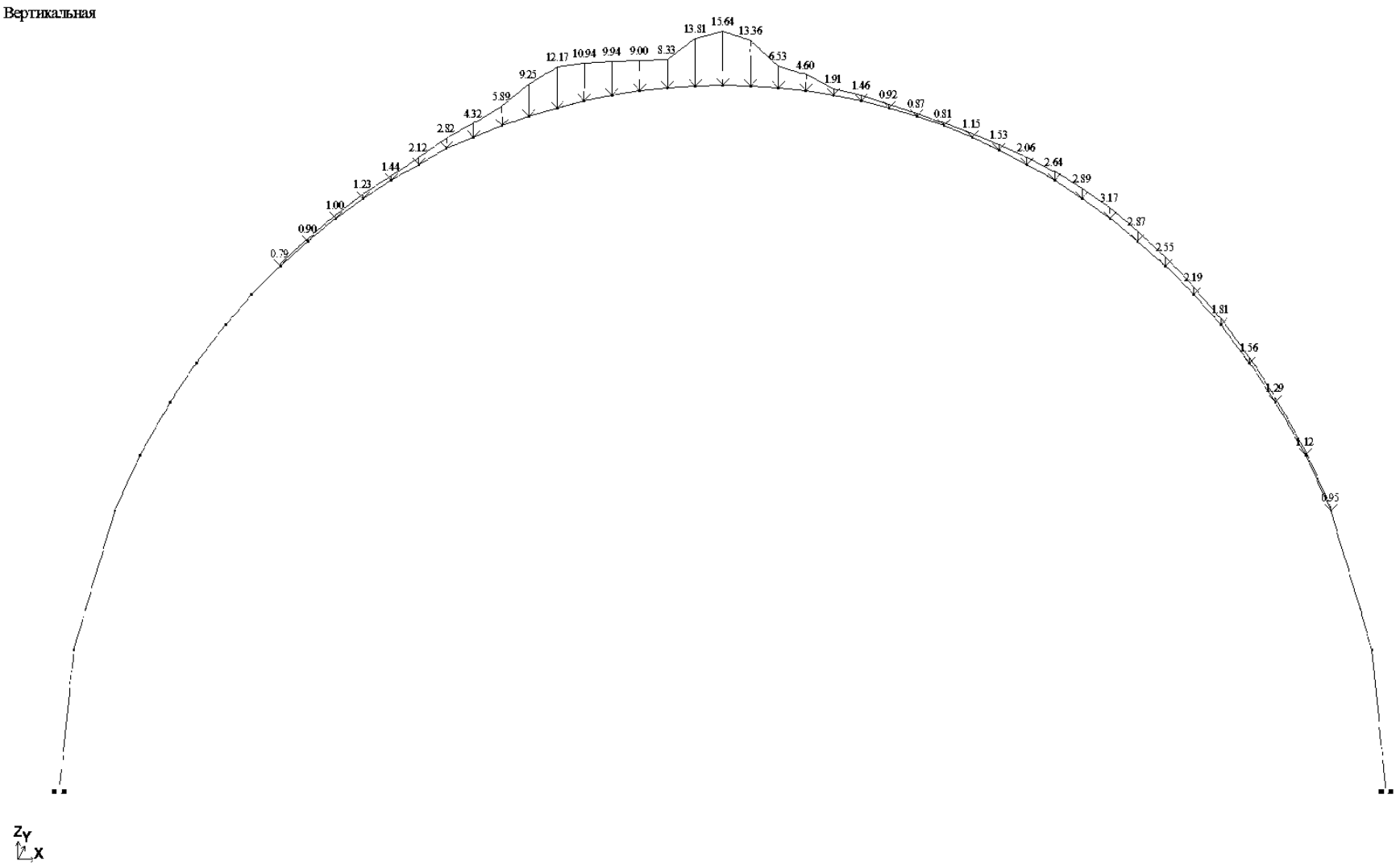


Рисунок 13. *Модель арки с нагрузкой* $P_{III\ z}$ *,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 13. *Arch model with load PIII z, kN/m (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

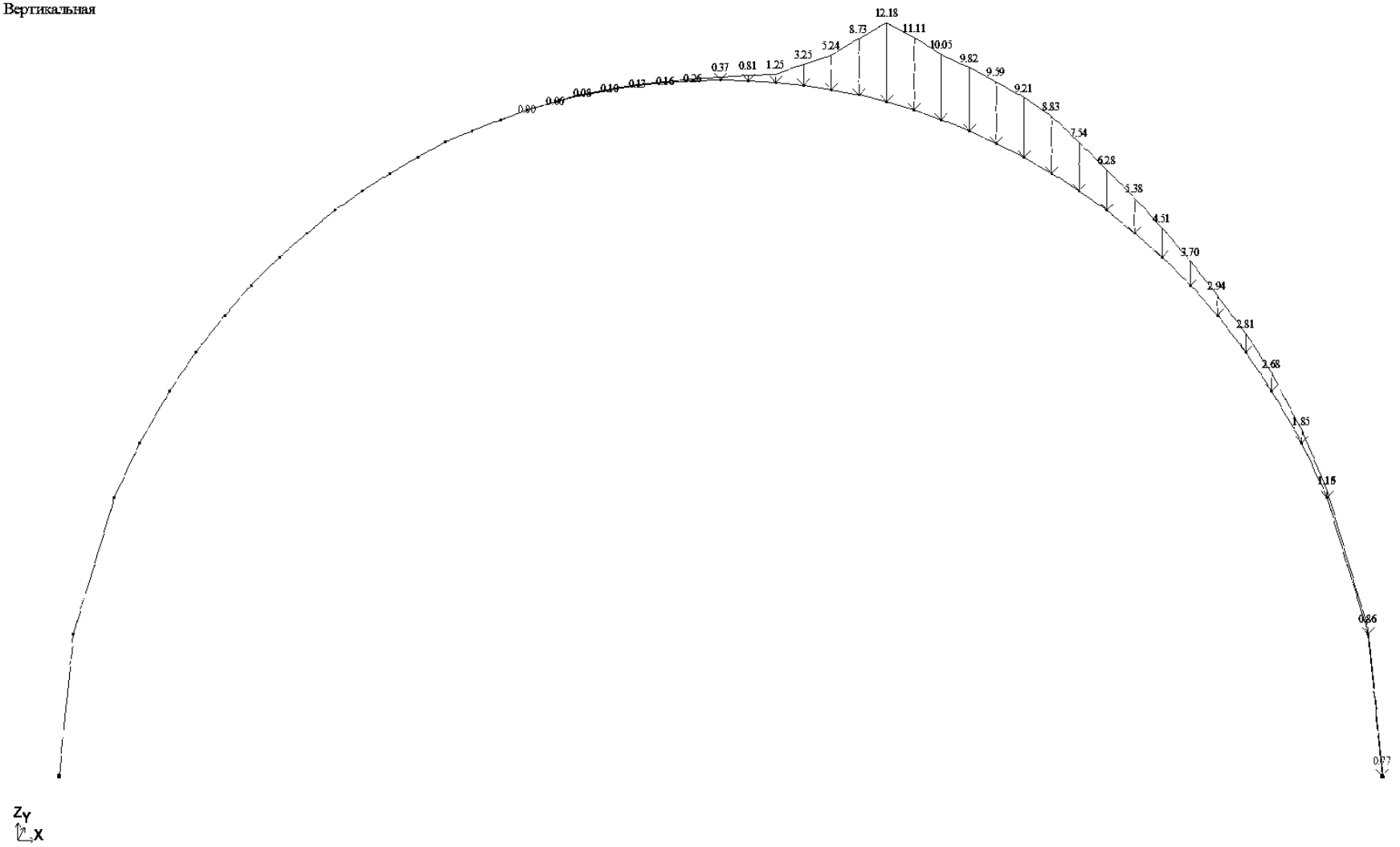


Рисунок 14. *Модель арки с нагрузкой* $P_{IV\ z}$ *,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 14. *Arch model with load PIV z, kN/m (compiled by the authors)*

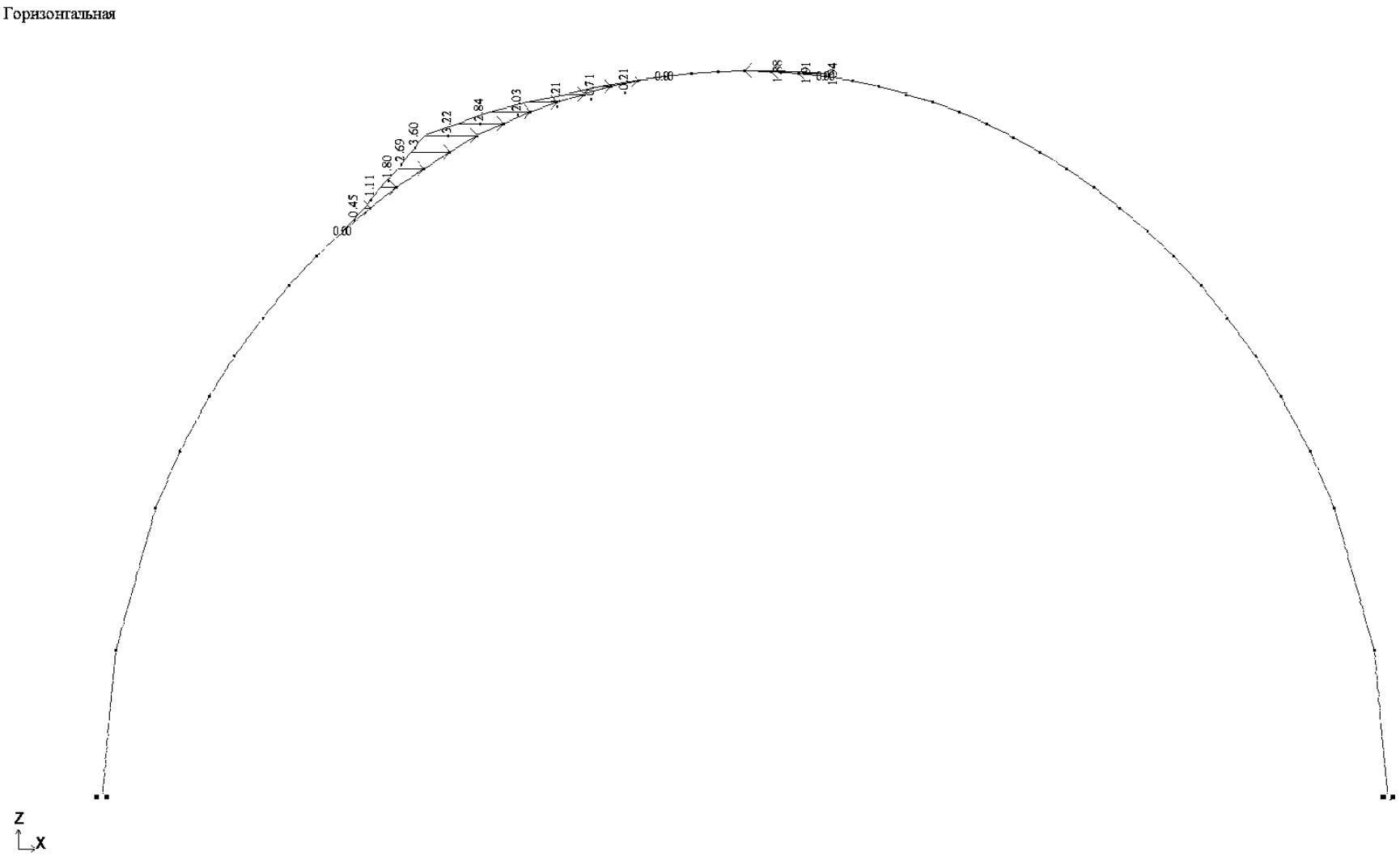


Рисунок 15. *Модель арки с нагрузкой* $P_{II\,x}$ *,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 15. *Arch model with load PII x, kN/m (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

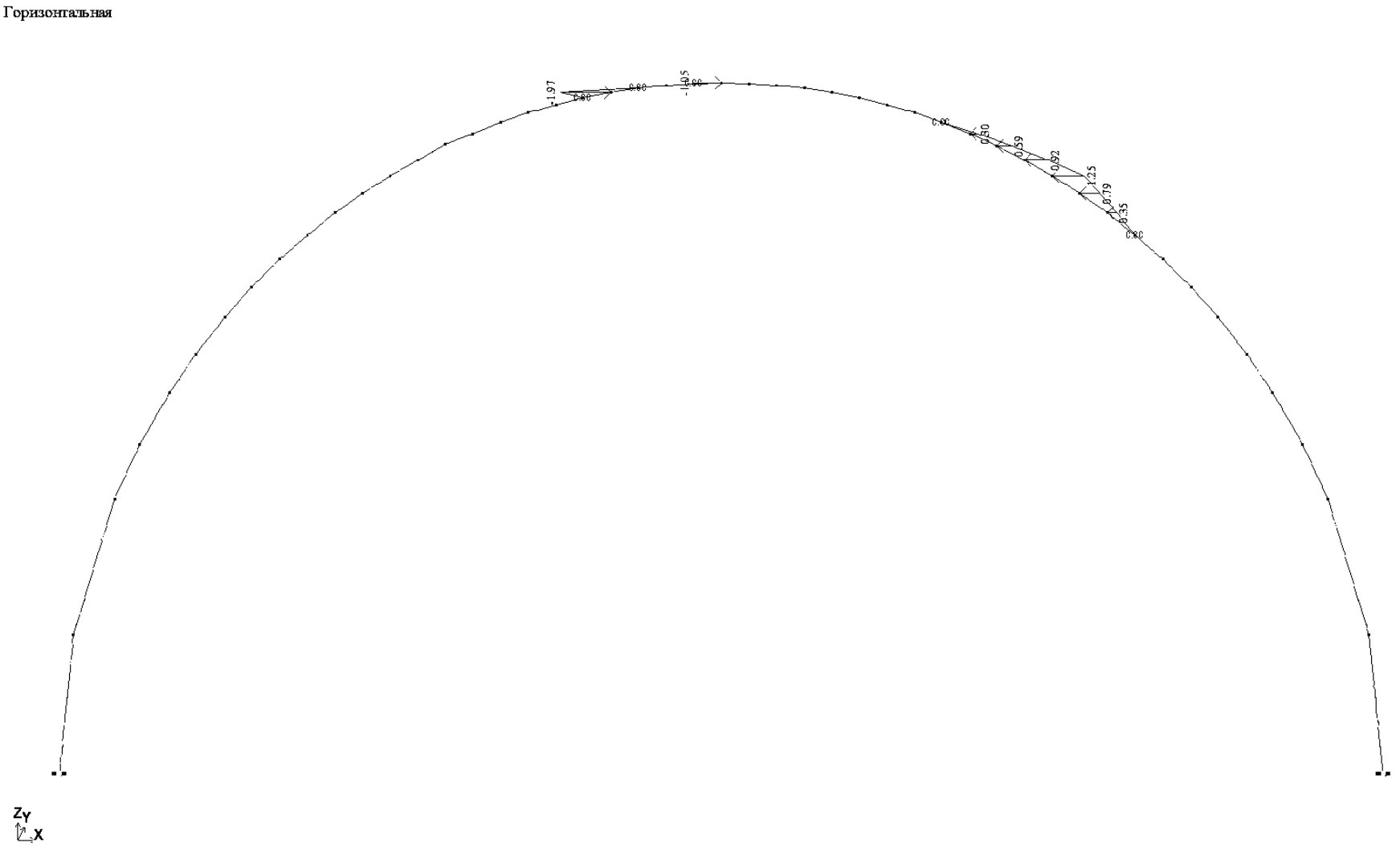


Рисунок 16. *Модель арки с нагрузкой $P_{III\ x}$,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 16. *Arch model with load PIII x, kN/m (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

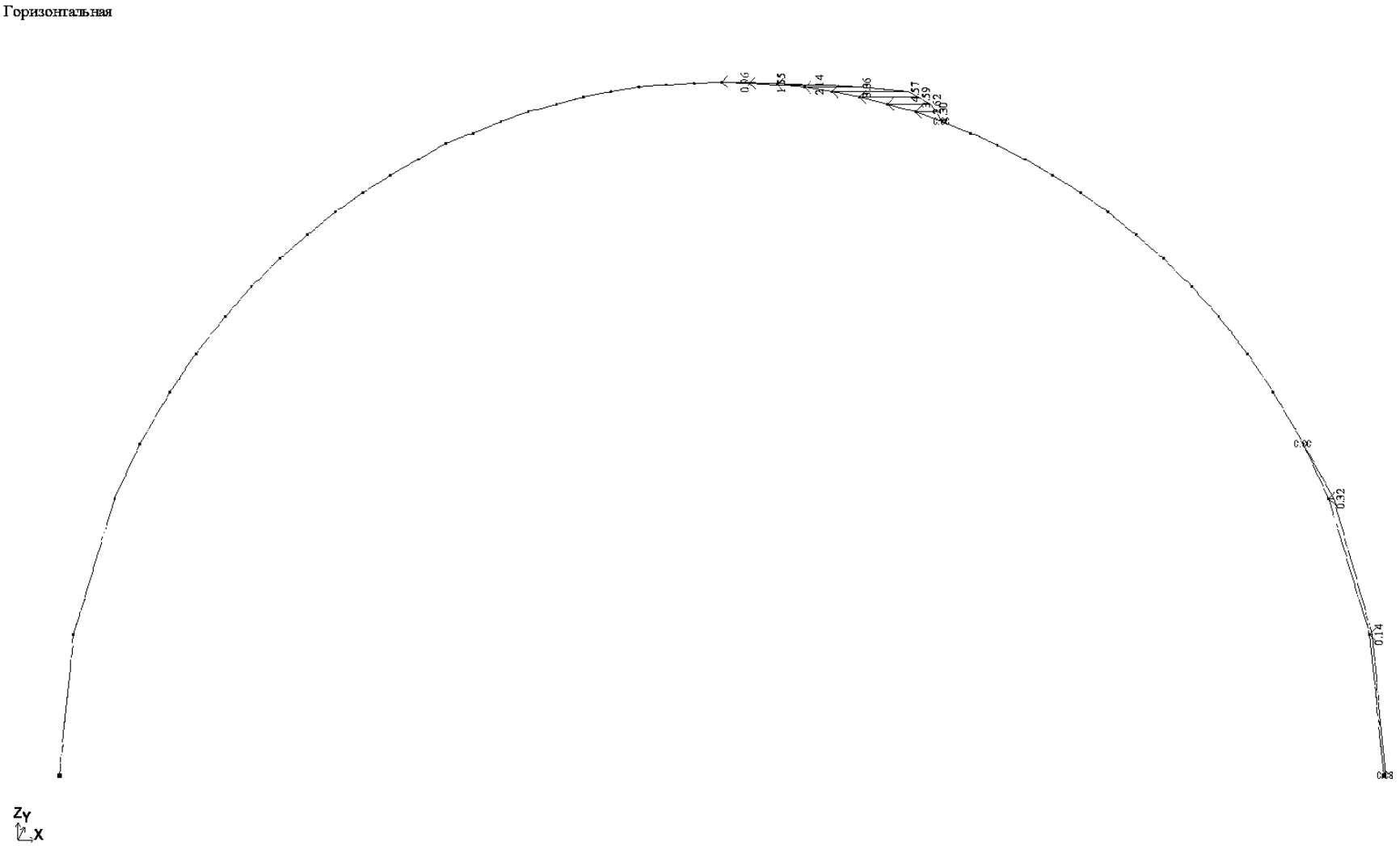


Рисунок 17. *Модель арки с нагрузкой $P_{IV\ x}$,* кН/м *(составлено авторами)*

Figure 17. *Arch model with load P_{IV} x, kN/m (compiled by the authors)*

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Определение перемещений

Determination of displacements

Для определения перемещений искомых сечений z_k авторами было предложено использовать метод Мора с применением правила А.К. Верещагина [2; 14].

Вычисление перемещений производилось с учетом влияния продольных усилий и перерезывающих сил, возникающих в стержнях по формулам [15]:

$$Z_{nk} = \sum \int \frac{M_{nz}M_{kz}}{EI_{\text{red}}} dx + \sum \int \frac{N_{nz}N_{kz}}{EA_{\text{red}}} dx + \sum \int \frac{Q_{nz}Q_{kz}}{GA_{\text{red}}} dx, \quad (24)$$

$$X_{nk} = \sum \int \frac{M_{nz}M_{kx}}{EI_{\text{red}}} dx + \sum \int \frac{N_{nz}N_{kx}}{EA_{\text{red}}} dx + \sum \int \frac{Q_{nz}Q_{kx}}{GA_{\text{red}}} dx, \quad (25)$$

где M_{nz}, Q_{nz}, N_{nz} — эпюры изгибающих моментов, продольных сил и перерезывающих сил от действия испытательной нагрузки в сечениях n; M_{kz}, Q_{kz}, N_{kz} — эпюры изгибающих моментов, продольных сил и перерезывающих сил от действия единичной нагрузки по направлению оси z в узле k; M_{kx}, Q_{kx}, N_{kx} — эпюры изгибающих моментов, продольных сил и перерезывающих сил от действия единичной нагрузки по направлению оси x в узле k; E — модуль упругости материала конструкции; G — модуль сдвига материала конструкции; I_{red} — осевой момент инерции приведённого сечения; A_{red} — площадь приведённого сечения.

Целесообразно сравнивать с результатами натурных испытаний перемещения из ПК «Лира», вычисленные по формуле:

$$\Delta_{nk} = \sqrt{{X_{nk}}^2 + {Z_{nk}}^2}, \quad (26)$$

где X_{nk} — горизонтальное перемещение k-го характерного сечения арки; Z_{nk} — вертикальное перемещение k-го характерного сечения арки; Δ_{nk} — суммарное перемещение k-го характерного сечения арки.

Перемещения X_{nk} и Z_{nk} — полные перемещения характерных сечений арки Δ_{nk}, мм, расположенных в $0{,}25L$, $0{,}5L$ и $0{,}75L$ пролета приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

Вычисленные перемещения характерных сечений

Calculated displacements of characteristic sections

k	x_k,м	Δ_{IIk}, мм	Δ_{IIIk}, мм	Δ_{IVk}, мм
1	-3	-0,16	-0,13	0,14
2	0	-0,14	-0,36	-0,17
3	3	0,10	-0,07	-0,22

Составлено авторами / Compiled by the authors

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Сравнение полученных результатов с результатами натурного эксперимента

Comparison of the obtained results with the field experiment results

Для удобства сравнения уже имеющихся результатов с полученными результатами, сведены в таблицу 5.

Таблица 5 / Table 5

Сравнение результатов расчета

Comparison of calculation results

Перемещения в расчётных сечениях *Displacements in calculated sections*		Расчетные сечения, *k* *Design sections, k*		
		1	2	3
Измеренные при натурных испытаниях $z_{пэ}$, мм *Measured during in-situ tests znee, mm*	$z_{II\,э}$, мм	-0,33	-0,10	0,08
	$z_{III\,э}$, мм	-0,12	-0,41	-0,06
	$z_{IV\,э}$, мм	0,10	-0,20	-0,30
Вычисленные в статье [2] z_{nk}, мм *Calculated in the article [2] znk, mm*	$z_{II\,k}$, мм	–	–	–
	$z_{III\,k}$, мм	-0,14	-0,78	-0,36
	$z_{IV\,k}$, мм	–	–	–
Вычисленные усовершенствованным методом Δ_{nk}, мм *Calculated by the improved method Δnk, mm*	$\Delta_{II\,k}$, мм	-0,26	-0,14	0,10
	$\Delta_{III\,k}$, мм	-0,13	-0,36	-0,07
	$\Delta_{IV\,k}$, мм	0,14	-0,17	-0,22

Составлено авторами / Compiled by the authors

Выводы

Conclusions

Сравнивая вычисленные значения Δ_k с вычисленными значениями, полученными путем моделирования сооружения в ПК «Лира» z_k, а также с перемещениями, полученными в ходе натурных испытаний $z_э$, можно отметить, что вычисленные по предложенному методу значения имеют отклонения до 21 процента от значений, полученных в ходе натурных испытаний. Также стоит отметить, что отклонения полученных в ходе исследования результатов в пять раз меньше отклонений, полученных при расчете в [2], при сравнении с результатами натурных испытаний. Данные результаты были получены введением следующих расчётных положений:

- для построения расчетной модели необходим учет распределения, в толще грунта обратной засыпки, давления от временной подвижной нагрузки АК и НК по ширине свода несущего элемента;
- необходим учёт горизонтальной составляющей давления от временной подвижной нагрузки АК и НК;
- необходим учет отпора грунтового массива обратной засыпки путем введения коэффициента постели.

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Расчетная модель, использующая теорию линейно деформируемого полупространства, предложенная в настоящей статье достоверно отражает работу грунтозасыпных конструкций при определении давления, действующего от временных подвижных сосредоточенных нагрузок, что позволяет с достаточной степенью точности применять задачи теории упругости для описания распределения напряжений в грунте от временных нагрузок при сборе нагрузок на несущие элементы грунтозасыпных мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сафронов, В.С.** Натурные статические испытания грунтозасыпного автодорожного моста со сводчатым пролетным строением из монолитного железобетона / В.С. Сафронов, В.В. Зазвонов // Строительная механика и конструкции. — 2010. — № 1. — С. 31–40. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15722654. — EDN NGBNQP. (дата обращения: 02.02.2024).
2. **Овчинников, И.Г.** Применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова к расчету фибробетонных арочных конструкций и труб / И.Г. Овчинников, А.С. Пермикин. — DOI https://doi.org/10.15862/05KO615 // Интернет-журнал Науковедение. — 2019. — Т 7. — № 6. — С. 05KO615. — URL: https://naukovedenie.ru/PDF/05KO615.pdf. — EDN VOBHSN. (дата обращения: 02.02.2024).
3. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др. — под ред. ред. Е.А. Сорочана, Ю.Г. Трофименкова. — Москва: Стройиздат, 1985. — 479 с. — URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001286255 (дата обращения: 02.02.2024).
4. **Shamshina, K.V.** Influence of corrosion longitudinal cracks on rigidity and strength of reinforced concrete structures / K.V. Shamshina, V.N. Migunov, I.G. Ovchinnikov. — DOI https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012058 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Т 451. — С. 12058. — URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/451/1/012058. (дата обращения: 02.02.2024).
5. **Gricuk, A.I.** Calculation of soil pressure on culverts according to Russian and foreign standards / A.I. Gricuk, A.S. Permikin, I.G. Ovchinnikov, A.S. Demidov. — DOI https://doi.org/10.1063/5.0063651 // AIP Conference Proceedings. — 2021. — Т 2389. — № 1. — С. 60003. — URL: https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2389/1/060003/756658/Calculation-of-soil-pressure-on-culverts-according?redirectedFrom=fulltext. (дата обращения: 02.02.2024).
6. **Spangler, M.G.** Soil engineering. 2d ed. / M.G. Spangler. — Скрэнтон: International textbook company, 1960. — 483 с. — URL: https://openlibrary.org/books/OL5796790M/Soil_engineering. (дата обращения: 02.02.2024).
7. **Heger, F.J.** Structural Design Method for Precast Reinforced-Concrete Pipe / F.J. Heger // Transportation Research Board. — 1982. — Т 878. — С. 93–100. — URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1982/878/878-013.pdf. (дата обращения: 02.02.2024).
8. **Пермикин, А.С.** Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментов дорожно-транспортных сооружений на сезоннопромерзающих грунтах / А.С. Пермикин, И.Г. Овчинников, А.И. Грицук. — DOI https://doi.org/10.15862/03SATS420 // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 4. — С. 03SATS420. — URL: https://t-s.today/03sats420.html. — EDN XCTOJC. (дата обращения: 23.02.2024).
9. **Пермикин, А.С.** Влияние геометрических параметров фибр на приготовление и удобоукладываемость сталефибробетона / А.С. Пермикин, И.Г. Овчинников // Бетон и железобетон в Украине. — 2012. — 6. — С. 34–36.
10. **Добрынин, А.О.** Повышение эффективности свайных фундаментов, устраиваемых в пучинистых грунтах / А.О. Добрынин. — DOI https://doi.org/10.15862/09KO615 // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т 7. — № 6. — С. 09KO615. — URL: https://naukovedenie.ru/PDF/09KO615.pdf. — EDN VOBHRT. (дата обращения: 23.02.2024).

11. **Arp, K.L.** A Review of Depth of Cover Tables for Concrete and Corrugated Metal Pipe for the Iowa Department of Transportation / K.L. Arp. — Эймс: Iowa Highway Research Board, 2016. — 45 с. — URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/66989 (дата обращения: 23.02.2024).
12. **Erdogmus, E.** Recommendations for Design of Reinforced Concrete Pipe / E. Erdogmus, B.N. Skourup, M. Tadros. — DOI https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000039 // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. — 2010. — Т 1. — № 1. — С. 25–32. — URL: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000039. (дата обращения: 23.02.2024).
13. **Хан Х.** Теория упругости. Основы линейной теории и ее применения / Х. Хан. — перевод с немецкого Е.А. Когана под редакцией Э.И. Григолюка. — Москва: Мир, 1988. — 343 с. — URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001413207 (дата обращения: 23.02.2024).
14. **Пермикин, А.С.** Анализ методики расчета предельных деформаций поперечного сечения на примере эксплуатации гофрированных водопропускных труб уральского региона / А.С. Пермикин, И.А. Осокин // Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. — 2011. — 30/2. — С. 224–23.
15. **Рубин, О.Д.** Особенности математического конечно-элементного моделирования систем "Строящееся бетонное сооружение — нескальное основание" / О.Д. Рубин, П.В. Шестопалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2016. — № 2. — С. 63–67. — URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25515216. — EDN VMJCAP. (дата обращения: 23.02.2024).

Сведения об авторах:

Пермикин Анатолий Сергеевич — доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, e-mail: prmmost@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6162-156X
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1223686

Овчинников Илья Игоревич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, доцент базовой кафедры «АО Мостострой-11», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: bridgeart@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8370-297X
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104

Статья получена: 24.04.2024. Принята к публикации: 28.06.2024. Опубликована онлайн: 13.07.2024.

REFERENCES

1. Safronov V.S., Zazvonov V.V. The Full-Scale Static Examinations of Highway Filled in With Bridge With the Bridge Arched Span From the Monolithic Reinforced Concrete. *Structural Mechanics and Structures*. 2010;(1): 31–40. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15722654 (accessed 2nd March 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Ovchinnikov I.G., Permikin A.S. Application of the V.Z. Vlasov theory of the shells to the analysis of fiber concretes arched structures and culverts. *Naukovedenie*. 2019;7(6): 05KO615. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/05KO615.
3. Gorbunov-Posadov M.I., Il'ichev V.A., Krutov V.I. et al. [Foundations, foundations and underground structures]. Moscow: Stroyizdat; 1985. Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01001286255 (accessed 2nd March 2024). (In Russ.).
4. Shamshina K.V., Migunov V.N., Ovchinnikov I.G. Influence of corrosion longitudinal cracks on rigidity and strength of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451: 12058. (In Eng.) DOI: https://www.doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012058.
5. Gricuk A.I., Permikin A.S., Ovchinnikov I.G., Demidov A.S. Calculation of soil pressure on culverts according to Russian and foreign standards. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2389(1): 60003. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1063/5.0063651.

6. Spangler M.G. Soil engineering. 2d ed. Scranton: International textbook company; 1960. Available at: https://openlibrary.org/books/OL5796790M/Soil_engineering. (accessed 2nd March 2024). (In Eng.).
7. Heger F.J. Structural Design Method for Precast Reinforced-Concrete Pipe. *Transportation Research Board*. 1982;878: 93–100. Available at: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1982/878/878-013.pdf (accessed 2nd March 2024). (In Eng.).
8. Permikin A.S., Ovchinnikov I.G., Gricuk A.I. A stress-strain state analysis of the road transport works foundations on seasonally freezing soils. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(4): 03SATS420. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/03SATS420.
9. Permikin A.S., Ovchinnikov I.G. Vliyaniye geometricheskikh parametrov fibr na prigotovleniye i udoboukladyvayemost' stalefibrobetona [The influence of geometric parameters of fibers on the preparation and workability of steel fiber reinforced concrete]. *Beton i zhelezobeton v Ukraine* [*Concrete and reinforced concrete in Ukraine*]. 2012;(6): 34–36. (In Russ.).
10. Dobrynin A.O. Improving the efficiency of pile foundations, organized in heaving soils. *Naukovedenie*. 2015;7(6): 09KO615. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.15862/09KO615.
11. Arp K.L. A Review of Depth of Cover Tables for Concrete and Corrugated Metal Pipe for the Iowa Department of Transportation. Ames: Iowa Highway Research Board; 2016. Available at: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/66989 (accessed 23rd March 2024). (In Eng.).
12. Erdogmus E., Skourup B.N., Tadros M. Recommendations for Design of Reinforced Concrete Pipe. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2010;1(1): 25–32. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000039.
13. Hahn H. [Theory of elasticity. Basics of linear theory and its applications]. Moscow: Mir; 1988. Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01001413207 (accessed 23rd March 2024). (In Russ.).
14. Permikin A.S., Osokin. I.A. Analiz metodiki rascheta predel'nykh deformatsiy poperechnogo secheniya na primere ekspluatatsii gofrirovannykh vodopropusknykh trub ural'skogo regiona [Analysis of the methodology for calculating the limiting deformations of the cross section using the example of the operation of corrugated culverts in the Ural region]. *Dorogi i mosty. Sbornik statey FGUP RosdorNII* [*Roads and bridges. Collection of articles by FSUE RosdorNII*]. 2011;(30/2): 224–234. (In Russ.).
15. Rubin O.D., Shestopalov P.V. The Features of Mathematical Finite-Element Modeling of The System "Newly Built Concrete Structures — Non Rock Foundation". *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016;(2): 63–67. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25515216 (accessed 23rd March 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Anatoliy S. Permikin — Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: prmmost@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6162-156X
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1223686

Ilya I. Ovchinnikov — Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: bridgeart@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8370-297X
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104

Submitted: 24th April 2024. Revised: 28th June 2024. Published online: 13th July 2024.