

**СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА
И КОНСТРУКЦИИ**

Научный журнал

Выпуск № 3 (30), 2021

- Строительная механика и сопротивление материалов
- Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела
- Механика грунтов
- Расчет и проектирование металлических конструкций
- Расчет и проектирование железобетонных конструкций
- Расчет и проектирование конструкций из полимерных материалов
- Расчет и проектирование мостов и транспортных сооружений
- Расчет и проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений
- Прочность соединений элементов строительных конструкций
- Динамическое воздействие подвижной нагрузки на упругие системы
- Экспериментальные и натурные исследования конструкций и материалов

Воронеж

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И КОНСТРУКЦИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2010 г.

Выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».
Территория распространения — Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА:

Главный редактор: Сафронов В. С., д-р техн. наук, проф.,
Воронежский государственный технический университет

Зам. главного редактора: Козлов В. А., д-р физ.-мат. наук, проф.,
Воронежский государственный технический университет

Ответственный секретарь: Габриелян Г. Е., канд. техн. наук, доцент,
Воронежский государственный технический университет

Буренин А. А., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии
Дальневосточного отделения РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Гриднев С. Ю., д-р техн. наук, проф., Воронежский государственный технический университет

Зверев В. В., д-р техн. наук, проф., Липецкий государственный технический университет

Ефрюшин С. В., канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет

Кирсанов М. Н., д-р физ.-мат. наук, проф., Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Колчунов В. И., д-р техн. наук, проф., академик РААСН, Юго-Западный государственный университет

Леденев В. В., д-р техн. наук, проф., Тамбовский государственный технический университет

Михайлов В. В., д-р техн. наук, проф., Липецкий государственный технический университет

Нгуен Динь Хоа, канд. техн. наук, Национальный строительный университет, Вьетнам

Нугужинов Ж. С., д-р техн. наук, проф., Казахстанский многопрофильный институт реконструкции и развития
Карагандинского государственного технического университета, Казахстан

Овчинников И. Г., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет

Пшеничкина В. А., д-р техн. наук, проф., Волгоградский государственный технический университет

Трещев А. А., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, Тульский государственный университет

Турищев Л. С., канд. техн. наук, доцент, Полоцкий государственный университет, Беларусь

Шимановский А. О., д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Беларусь

Шитикова М. В., д-р физ.-мат. наук, проф., советник РААСН, Воронежский государственный технический университет

Журнал «Строительная механика и конструкции» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписной индекс «Объединенный каталог. Пресса России» - 66004

Дата выхода в свет 29.10.2021. Усл. печ. л. 13,0. Формат 60×84/8. Тираж 500 экз. Заказ №.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 72895 от 22.05.2018 г.

Цена свободная

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ: 394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
(строительный факультет, кафедра строительной механики)
тел.: 8(473)271-52-30; e-mail: vss22@mail.ru

ОТПЕЧАТАНО: отдел оперативной полиграфии издательства ФГБОУ ВО «ВГТУ»
394006, Воронежская обл., г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

12+

© ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2021

**STRUCTURAL MECHANICS
AND STRUCTURES**

**Scientific Journal
ISSUE № 3 (30), 2021**

- Structural mechanics and strength of materials
- Applied problems of mechanics of solid body under deformation
- Soil mechanics
- Calculation and design of metal structures
- Calculation and design of reinforced concrete structures
- Calculation and design from polymeric structures
- Calculation and design of bridges and transport structures
- Calculation and design of bases and foundations of buildings and structures
- Strength of joints of building structure units
- Mobile load dynamic effect on elastic systems
- Pilot and field observations of structures and materials

STRUCTURAL MECHANICS AND STRUCTURES

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since 2010

Issued 4 times a year

Founder and publisher – Voronezh State Technical University.
Territory of distribution — Russian Federation.

EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL:

Chief editor: Safronov V. S., Dr. of Tech. Sc., Prof.,
Voronezh State Technical University

The deputy chief editor: Kozlov V. A., Dr. of Physical and Mathematical Sc., Prof.,
Voronezh State Technical University

Executive secretary: Gabrielyan G. E., PhD of Tech. Sc., Associate Prof.,
Voronezh State Technical University

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Burenin A. A., Dr. of Physical and Mathematical Sc., Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Far Eastern Branch of RAS, Komsomolsk on Amur

Gridnev S. Yu., Dr. of Tech. Sc., Prof., Voronezh State Technical University

Zverev V. V., Dr. of Tech. Sc., Prof., Lipetsk State Technical University

Efryushin S. V., PhD of Tech. Sc., Associate Prof., Voronezh State Technical University

Kirsanov M. N., Dr. of Physical and Mathematical Sc., Prof., National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

Kolchunov V. I., Dr. of Tech. Sc., Prof., academician of RAACS, South-West State University

Ledenyov V. V., Dr. of Tech. Sc., Prof., Tambov State Technical University

Mikhailov V. V., Dr. of Tech. Sc., Prof., Lipetsk State Technical University

Nguyen Dinh Hoa, PhD of Tech. Sc., National University of Civil Engineering, Socialist Republic of Vietnam

Nuguxhinov Zh. S., Dr. of Tech. Sc., Prof., Kazakh Multidisciplinary Reconstruction and Development Institute of Karaganda State Technical University, Republic of Kazakhstan

Ovchinnikov I. G., Dr. of Tech. Sc., Prof., Saratov State Technical University

Pshenichkina V. A., Dr. of Tech. Sc., Prof., Volgograd State Technical University

Trechshev A. A., Dr. of Tech. Sc., Prof., Corresponding Member of RAACS, Tula State University

Turichshev L. S., PhD of Tech. Sc., Associate Prof., Polotsk State University, Republic of Belarus

Shimanovsky A. O., Dr. of Tech. Sc., Prof., Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus

Shitikova M. V., Dr. of Physical and Mathematical Sc., Prof., adviser of RAACS, Voronezh State Technical University

The journal "Structural mechanics and structures" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published

Subscription index "United catalog. Press of Russia" - 66004

Publication date 29.10.2021. Conventional printed sheets 13,0. Format 60×84/8. Numbers of copies 500. Order №.

Journal is registered by Federal Service for Supervision of Communications,

Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)

Registration certificate ПИ № ФС 77 - 72895 от 22. 05. 2018 г.

Price is subject to change

ADDRESS OF EDITORIAL AND PUBLISHER OFFICE: 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006, Russian Federation

(Faculty of construction, Department of Structural Mechanics)

Tel.: (473)271-52-30; e-mail: vss22@mail.ru

PRINTED: publishing department of operational printing of Voronezh State Technical University

84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006

12+

© Voronezh State Technical University, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

<i>Курсанов М. Н.</i> Статический и кинематический анализ плоской регулярной балочной фермы с двойной решеткой.....	7
<i>Аверин А. Н., Аверина Т. А.</i> Моделирование схем развития трещин в пологих оболочках на основе траекторий наибольших растягивающих напряжений.....	15
<i>Ефрюшин С. В., Ефанов А. Р.</i> Оценка эффективности применения легких стальных тонкостенных конструкций в башенных сооружениях.....	26

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

<i>Сафронов В. С., Габриелян Г. Е., Киселев Д. А., Антипов А. В.</i> Вероятностный анализ надежности разрезного деревянного автодорожного моста.....	49
<i>Черников А. В., Козлов В. А.</i> Краткий исторический обзор использования гофрированных водопропускных труб и их применение на современном этапе.....	61

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

<i>Перелыгина А. Ю., Дружинина Т. Я., Антипин С. А., Бобылева Ю. А.</i> Механические характеристики материала аддитивных структур при разной методике определения площадей поперечных сечений образцов.....	74
--	----

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

<i>Некрасова Н. Н.</i> Контактная задача для ортотропных плит переменной толщины с пространственно-неоднородным основанием.....	90
--	----

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И МАТЕРИАЛОВ

<i>Еремин А. В., Волокитина О. А., Алимova Н. Ю.</i> Проектирование конструкций нежестких дорожных одежд с применением побочных продуктов металлургической промышленности для распределительных автомобильных дорог регионального значения.....	100
Правила оформления статей.....	112

CONTENTS

STRUCTURAL MECHANICS AND STRENGTH OF MATERIALS

<i>Kirsanov M. N.</i> Static and kinematic analysis of a planar regular beam truss with a double lattice.....	7
<i>Averin A. N., Averin T. A.</i> Modeling of schemes of crack development in shape shells based on trajectories of the largest tension stress.....	15
<i>Efrushin S. V., Efanov A. R.</i> Estimation of the efficiency of application of light steel thin-walled structures in tower structures.....	26

CALCULATION AND DESIGN OF BRIDGES AND TRANSPORT STRUCTURES

<i>Safronov V. S., Gabrielyan G. E., Kiselev D. A., Antipov A. V.</i> Probabilistic analysis of reliability sliding wooden road bridge.....	49
<i>Chernikov A. V., Kozlov V. A.</i> Brief historical review of the use of corrugated culverts and their application at the present stage.....	61

CALCULATION AND DESIGN FROM POLYMERIC STRUCTURES

<i>Pereyginina A. Yu., Druzhinina T. Ya., Antipin S. A., Bobyleva Yu. A.</i> Mechanical characteristics of the material of additive structures with different methods for determining the cross-section area of specimens.....	74
---	----

CALCULATION AND DESIGN OF BASES AND FOUNDATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

<i>Nekrasova N. N.</i> Contact problem for orthotropic plates of variable thickness with a spatially inhomogeneous base.....	90
---	----

PILOT AND FIELD OBSERVATIONS OF STRUCTURES AND MATERIALS

<i>Yeremin A. V., Volokitina O. A., Alimova N. Yu.</i> Designing structures of rigid road clothing with the application of metallurgical by-products industry for distribution roads of regional significance.....	100
Requirements for articles to be published.....	112

DOI 10.36622/VSTU.2021.30.3.001

УДК 624.04

СТАТИЧЕСКИЙ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛОСКОЙ РЕГУЛЯРНОЙ БАЛОЧНОЙ ФЕРМЫ С ДВОЙНОЙ РЕШЕТКОЙ

М. Н. Кирсанов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, г. Москва

Д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин,
тел.: +7(495)362-73-14, e-mail: c216@ya.ru

Предлагается схема статически определимой регулярной балочной фермы решетчатого вида. Обнаружен и исследован случай кинематического вырождения конструкции от числа панелей. Для сосредоточенной и распределенной по нижнему поясу нагрузок методом индукции с привлечением системы символьной математики выводится зависимость прогиба фермы от числа ее панелей. Прогиб вычисляется по формуле Максвелла-Мора. Полученная зависимость имеет вид полинома по числу панелей с переменными, зависящими от четности числа панелей. Получена также формула зависимости величины горизонтального сдвига подвижной опоры.

Ключевые слова: ферма, кинематическая изменяемость, прогиб, аналитическое решение, индукция, Maple

Введение. Аналитические зависимости прогиба конструкции от ее геометрии, нагрузок и свойств материала позволяют точнее и проще проектировать новые и рассчитывать существующие фермы без потери точности и увеличения затрат машинного времени при усложнении системы. Одним из самых распространенных методов вывода искомых формул для регулярных ферм (плоских и пространственных) является метод индукции. Метод заключается в последовательном расчете усилий и прогибов конструкции с различным увеличивающимся числом ячеек периодичности. Полученные формулы можно обобщить на произвольный случай с помощью операторов какой-либо компьютерной символьной математики, например, Maple [1]. Некоторые схемы плоских статически определимых регулярных ферм и зависимости прогиба от числа панелей содержатся в справочниках [1, 2].

Схема фермы. Постановка задачи. Пролет фермы с $2n$ панелями высотой $2.5h$ равен $L=2na$, где $n=2, 3, 4, \dots$ — число ячеек периодичности в половине пролета. Крайние ячейки имеют высоту $2h$ и содержат по две стойки. Решетка фермы двойная, общая длина всех стержней равна $(10n+8)c+(4n+3)a+4h$, (рис. 1). Здесь обозначено: $c = \sqrt{a^2 + h^2}$. Число стержней в ферме, включая три стержня, моделирующие опоры, равно $n_R = 8n + 10$. Ставится задача вывести формулу для прогиба среднего узла фермы в зависимости от числа панелей. Аналогичные задачи для плоских ферм решались в системе компьютерной математики методом индукции в работах [4-8]. В работах [9] этим же методом дан вывод формул для прогиба пространственных ферм. Собственные частоты плоских ферм в зависимости от числа панелей определялись в [10-11]. Одна из первых работ, в которой приводится аналитически точный вывод формулы для собственных колебаний плоской регулярной стержневой консоли с крестообразной решеткой — это монография профессора В. А. Игнатъева [13]. Решение по-

лучено без использования компьютерной математики. Вопросы существования регулярных статически определимых ферм ставились и частично решались в трудах Hutchinson R.G. и Fleck N. A. [14,15].

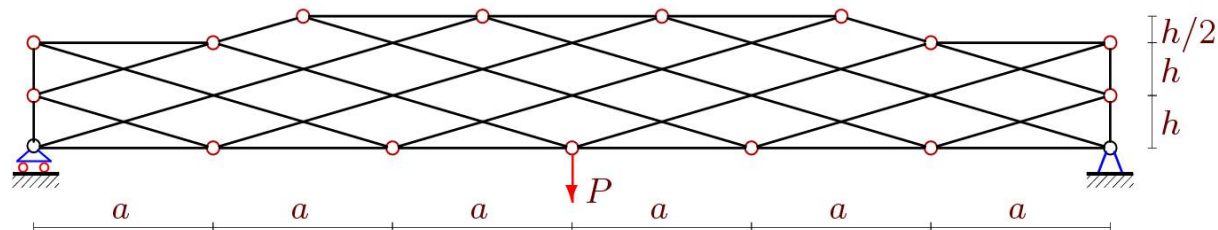


Рис. 1. Ферма, нагруженная силой в среднем узле нижнего пояса, $n = 3$

Схема фермы статически определимая. Кинематическая изменяемость обнаруживается при расчете усилий в стержнях для $n=2, 5, 6, 7, 10, 11, 12\dots$ При таких значениях числа панелей определитель системы линейных уравнений равновесия узлов (включая два опорные узла) обращается в ноль, что соответствует кинематическому вырождению. Подтверждает этот факт схема возможных скоростей узлов на рисунке 2 при $n = 2$. Стержни 1-2, 1-6, 6-8, 2-3, 7-8, 8-9, 9-5 и стержни им симметричные совершают вращательные движения вокруг неподвижных, либо мгновенно неподвижных точек. Стержни 8-4 и 2-11 имеют мгновенно поступательное движение. Соотношение скоростей на диаграмме следует из рассмотрения мгновенных центров скоростей: $v/a = u/h = 2u'/c$. Наиболее простой проверкой картины распределения скоростей является проверка равенства проекций скоростей узлов на отрезок (стержень) их соединяющий. Аналогичные картины распределения скоростей можно построить и для других исключительных случаев, соответствующих обнаруженной кинематической изменяемости.

Для того, чтобы в последовательность рассчитываемых ферм не попали отмеченные значения n , введем функцию $n = (10k - 3(-1)^k - 1) / 4$, принимающую на множестве натуральных k числа 3, 4, 8, 9, 13, 14 ... Это позволяет для разных k возможность получить последовательность решений, обобщить их, и вывести искомую зависимость прогиба от условного числа панелей k .

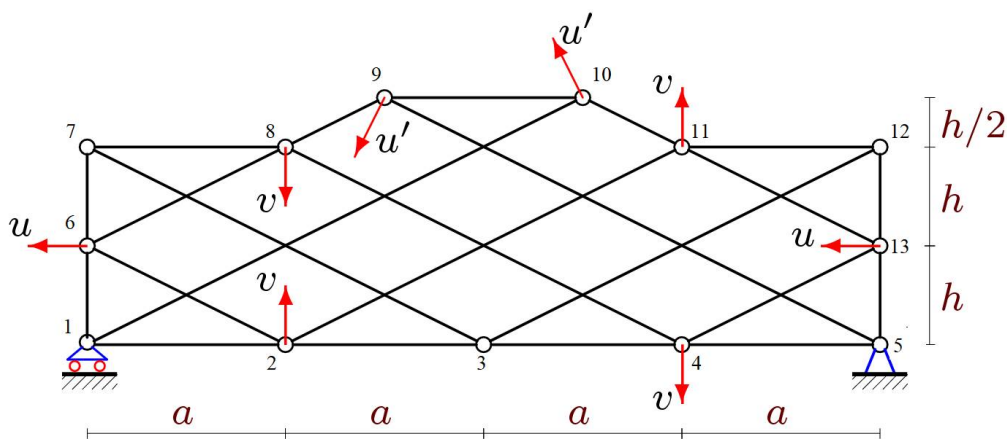


Рис. 2. Кинематически изменяемый вариант схемы, $n = 4$

Расчет усилий. Усилия в стержнях для получения искомой аналитической зависимости можно определить в системе Maple, пользуясь программой [14]. Алгебраическая система уравнений равновесия узлов записывается и решается в матричном виде $\mathbf{G} \bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{B}}$ с помощью встроенных операторов системы Maple. Элементы матрицы \mathbf{G} — это направляющие косинусы усилий, рассчитываемые по координатам узлов; $\bar{\mathbf{B}}$ — вектор нагрузок, $\bar{\mathbf{S}}$ вектор уси-

лий в стержнях. Нечетные номера элементов вектора нагрузок соответствуют вертикальным нагрузкам, четные — горизонтальным. Решение в символьной форме находится в виде: $\bar{S} = \mathbf{G}^{-1}\bar{B}$. Смещение узла C по вертикали определяется по формуле Максвелла - Мора в предположении о равенстве жесткостей стержней:

$$\Delta = \sum_{j=1}^{n_R-3} \frac{S_j s_j l_j}{EF}. \quad (1)$$

Приняты следующие обозначения: s_j — усилие в этом же стержне от действия единичной вертикальной силы, приложенной к шарниру C в середине пролета, S_j — усилие в стержне j фермы от действия внешней нагрузки, l_j — длина стержня j .

Прогиб. Рассмотрим случай загрузки нижнего пояса (рис. 3).

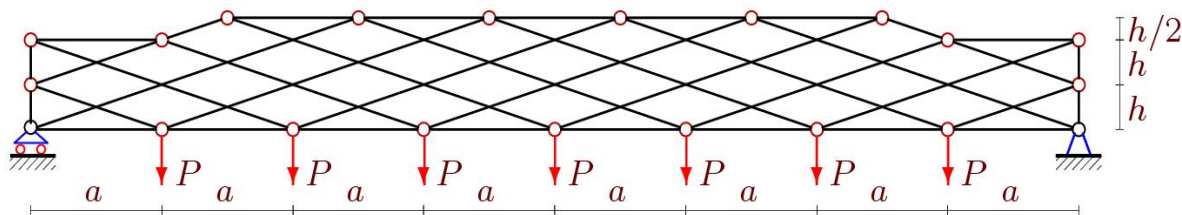


Рис. 3. Ферма, нагруженная силой в среднем узле нижнего пояса, $n = 4$

Последовательно решая задачу о прогибе фермы с $n=1, 2, 3, \dots$ панелями в случае действия сосредоточенной нагрузки в середине пролета (рис. 1), получаем серию решений:

$$\begin{aligned} \Delta(1) &= P(59a^3 + 109c^3 + 36h^3) / (2h^2 EF), \\ \Delta(2) &= -2P(4a^3 + 25c^3 + 2h^3) / (h^2 EF), \\ \Delta(3) &= 2P(228a^3 + 218c^3 + 27h^3) / (h^2 EF), \\ \Delta(4) &= P(691a^3 - 359c^3 - 8h^3) / (2h^2 EF), \\ \Delta(5) &= 5P(959a^3 + 473c^3 + 36h^3) / (2h^2 EF), \\ &\dots \end{aligned} \quad (2)$$

Общий вид прогиба фермы под действием равномерной нагрузки по нижнему поясу имеет вид

$$\Delta(n) = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3) / (h^2 EF). \quad (3)$$

Коэффициенты в этом выражении находятся как общие члены последовательностей сомножителей при a^3, c^3, h^3 решений (2):

$$\begin{aligned} C_1 &= (250k^4 - 100(3(-1)^k + 1)k^3 + 2(409 - 531(-1)^k)k^2 - 8(45(-1)^k + 1)k - 3(-1)^k + 147) / 96, \\ C_2 &= (30(29 - 44(-1)^k)k^2 - 6(67(-1)^k + 1)k + 93(-1)^k + 123) / 48, \\ C_3 &= 9(1 - (-1)^k)k - 2(-1)^k - 2. \end{aligned} \quad (4)$$

Порядок определения общих членов в системе Maple следующий. Сначала по числовым значениям элементов последовательностей составляется соответствующее рекуррентное уравнение. Затем с помощью оператора `rsolve` находится искомым общий член. Для коэффициента C_1 уравнение получается девятого порядка

$$C_{1,k} = C_{1,k-1} + 4C_{1,k-2} - 4C_{1,k-3} - 6C_{1,k-4} + 6C_{1,k-5} + 4C_{1,k-6} - 4C_{1,k-7} - C_{1,k-8} + C_{1,k-9}.$$

Выражения для коэффициентов в (3) в случае сосредоточенной нагрузки (рис. 1) имеют вид

$$\begin{aligned} C_1 &= (20k^3 - 6(3(-1)^k + 1)k^2 + 2(128 - 51(-1)^k)k - 69(-1)^k + 33) / 24, \\ C_2 &= (10(19 - 8(-1)^k)k - 53(-1)^k + 17) / 8, \\ C_3 &= 7 - 3(-1)^k. \end{aligned} \quad (5)$$

Рекуррентные уравнения для других коэффициентов получаются несколько проще. Таким образом, формула (3) с коэффициентами (4) или (5) дает искомое решение для двух вариантов нагружения.

Смещение подвижной опоры. Под действием вертикальной нагрузки подвижная опора смещается. Смещение для случая равномерной нагрузки находится по той же формуле Максвелла – Мора (1), где s_j – усилия от действия единичной горизонтальной силы, приложенной к левой опоре. Приведем окончательную формулу:

$$\delta = Pa^2(50k^3 - 15(3(-1)^k + 1)k^2 + (33(-1)^k - 35)k + 6(-1)^k + 6) / (12hEF).$$

Распределение усилий в стержнях конструкции. Графические возможности системы Maple позволяют получить картину распределения усилий по стержням фермы. Рассмотрим случай нагрузки по нижнему поясу. Синим цветом обозначены сжатые стержни, $S_i < 0, i = 1, 2, \dots, n_R$, красным — растянутые (рис. 4). Усилия относятся к силе P и округлены до десятых долей. Наибольшие сжимающие усилия оказываются в крайних стержнях средней части верхнего пояса, растянутые — в стержнях решетки и в стержнях нижнего пояса. Характерно то, что, как и в нижнем, так и в верхнем поясах есть и растянутые и сжатые стержни. Это, как правило, наблюдается в фермах с двойными крестообразными решетками, в которых стержни решетки перераспределяют усилия между поясами фермы. В простых балочных фермах с такой же нагрузкой все стержни поясов либо сжаты, либо растянуты. Такой же эффект, но выраженный не так ярко, наблюдается для фермы с большим числом панелей (рис. 5).

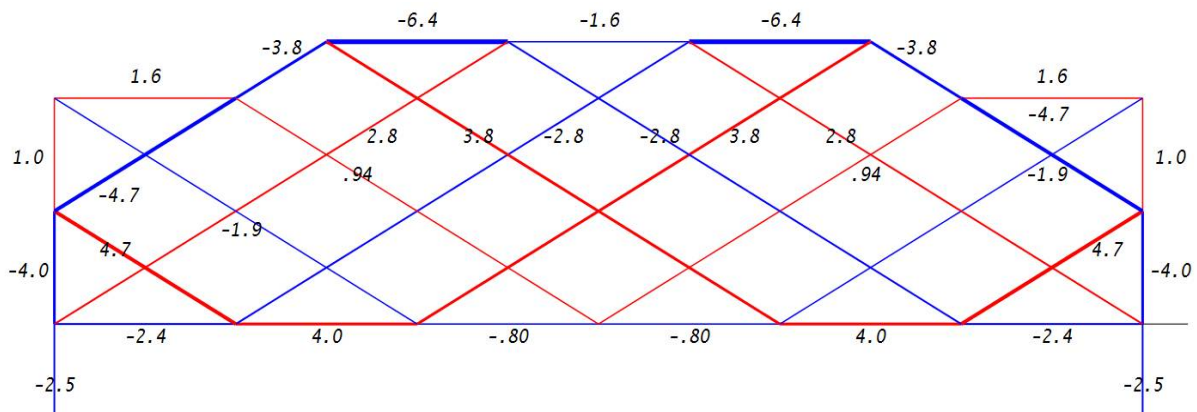


Рис. 4. Распределение усилий в стержнях фермы при загрузении нижнего пояса, $n=3, a=8\text{м}, h=5\text{ м}$

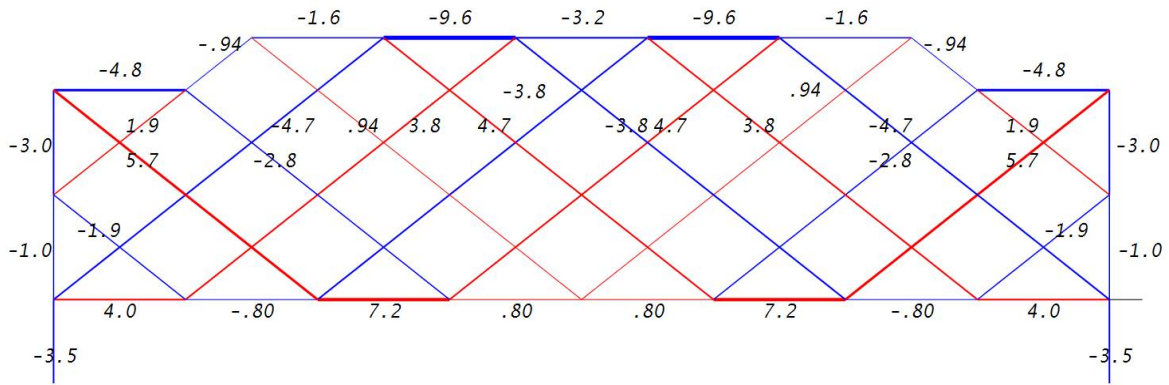


Рис. 5. Распределение усилий в стержнях фермы при загрузении нижнего пояса, $n=4$, $a=8\text{м}$, $h=5\text{ м}$

Анализ полученных результатов. Построим графики найденной зависимости (3) с коэффициентами (4). Рассмотрим случай постоянного, не зависящего от числа панелей, пролета: $L = 2an = 100\text{м}$. Фиксируем также суммарную величину нагрузки, введя безразмерный относительный прогиб: $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$, где $P_0 = (2n - 1)P$. Зависимость обнаруживает существенную нелинейность и большие скачки по числу панелей (рис. 6). Рисунки кривых выполнены условно. В действительности, решение представлено отдельными точками, соответствующими целым значениям k , а отрезки, соединяющие эти точки, даны только для наглядности. Несмотря на это видно, что с увеличением числа панелей прогибы растут, при этом для четных k рост монотонный, а для нечетных сначала прогиб убывает, затем растет. При этом скачки относительного прогиба весьма существенные. Наибольший скачок (в 8 раз) наблюдается от $k=4$ до $k=5$ при малой высоте фермы ($h=2\text{м}$).

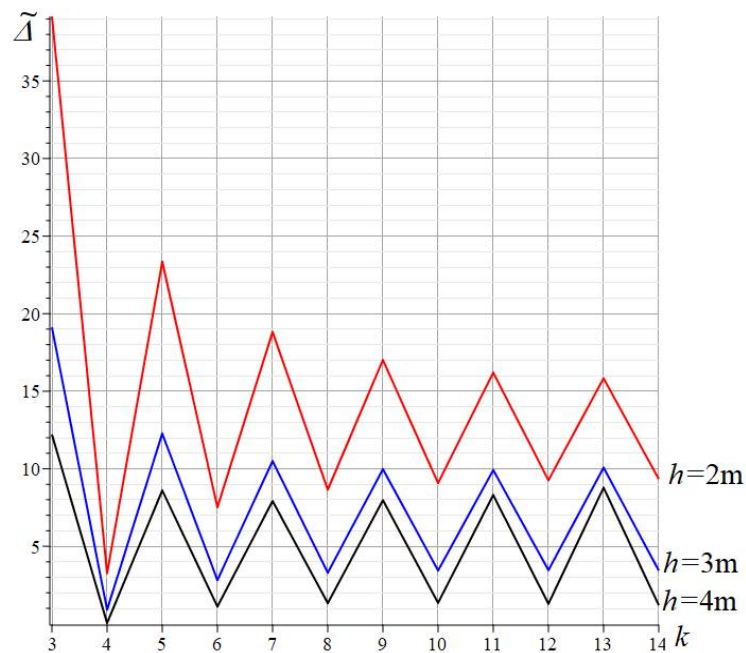


Рис. 6. Зависимость относительного прогиба от числа панелей $n=2k$ для распределенной по нижнему поясу нагрузки

Аналогичные кривые обнаруживает и зависимость прогиба от числа панелей при действии на ферму сосредоточенной нагрузки (рис. 1).

Заключение. Рассмотрена плоская схема статически определимой балочной фермы решетчатого типа. Обнаружено кинематическое вырождение конструкции при определенном числе панелей. Особенностью этой конструкции является уменьшение высоты фермы по ее концам в области опорной части. Получены аналитические зависимости прогиба от числа панелей для равномерной и сосредоточенной нагрузки и величина сдвига подвижной опоры. Зависимости имеют вид полиномов четвертой и второй степеней с коэффициентами, зависящими от четности числа панелей.

Графики полученных решений имеют резкие скачки зависимости прогиба от числа панелей. Полученные формулы могут быть полезны в инженерной практике, а скачкообразный характер решения позволяет оптимизировать по жесткости конструкцию выбором подходящего числа панелей.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Библиографический список

1. Kirsanov M. Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas. – Cambridge Scholars Publishing UK, 2020.
2. Осадченко Н.В. Аналитические решения задач о прогибе плоских ферм арочного типа // *Строительная механика и конструкции*. – 2018. – №1 (16). – С.12–33.
3. Тиньков Д.В. Формулы для расчёта прогиба вспарушенной балочной раскосной фермы с произвольным числом панелей // *Строительная механика и конструкции*. – 2016. – № 2 (13). – С. 10–14.
4. Суд И. Б. Формулы для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей // *Строительная механика и конструкции*. – 2020. – №2 (25). – С. 25–32.
5. Овсянникова В.М. Зависимость деформаций балочной фермы трапециевидной формы от числа панелей // *Строительная механика и конструкции*. – 2020. – №3 (26). – С.13–20.
6. Воробьев О.В. О методах получения аналитического решения для проблемы собственных частот шарнирных конструкций // *Строительная механика и конструкции*. – 2020. – № 1 (24). – С. 25–38.
7. Доманов Е. В. Аналитическая зависимость прогиба пространственной консоли треугольного профиля от числа панелей // *Научный альманах*. –2016. – №6-2 (19). – С. 214-217 (DOI: 10.17117/na.2016.06.02.214)
8. Ларичев С.А. Индуктивный анализ влияния строительного подъема на жесткость пространственной балочной фермы // *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*.– М: Инфра-М, 2015. – Т. 1. – С. 4-8.
9. Vorobev O. Bilateral analytical estimation of first frequency of a plane truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. – 2020. – Vol. 92. – Article – No 9204 (doi: 10.18720/CUBS.92.4).
10. Петриченко Е.А. Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // *Строительная механика и конструкции*. – 2020. – №3 (26). –С. 21–29.
11. Игнатъев В.А. Расчет регулярных стержневых систем. – Саратов: Саратовское высшее военно-химическое военное училище, 1973.
12. Hutchinson R. G., Fleck N. A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM Z. Angew. Math. Mech*. – 2005. – Vol. 85 – № 9. – P. 607 – 617 (DOI: 10.1002/zamm.200410208).

13. Hutchinson R.G., Fleck N. A. The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2006. – Vol. 54. – Issue 4. – P. 756-782. (doi:10.1016/j.jmps.2005.10.008).
14. Buka-Vaivade, K. Kirsanov M. N., Serdyuk D. O. Calculation of deformations of a cantilever frame planar truss model with an arbitrary number of panels // *Vestnik MGSU*. – 2020. – Vol. 15. – № 4. – P. 510—517 (DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517).

Reference

1. Maple software package. *Advanced Mathematics for Engineering Students*. 2022. Pp. 389–393. DOI:10.1016/B978-0-12-823681-9.00023-X.
2. Kirsanov M. *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. Cambridge Scholars Publishing UK. 2019.
3. Kirsanov M. *Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas*. Cambridge Scholars Publishing UK. 2020.
4. Osadchenko N.V. Analytical solutions to the problems of deflection of flat trusses of arch type. *Structural Mechanics and Structures*. 2018. Vol.1. No. 16. Pp.12–33.
5. Tinkov D.V. Formulas for calculating the deflection of a braced girder with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2016.Vol. 2.No.13 (13). Pp. 10–14.
6. Sud I.B. Formulas for the deflection of a truss girder with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020. No. 2 (25). Pp. 25–32.
7. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezoidal girder on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020. No. 3 (26). Pp.13–20.
8. Vorobyev O. V. On methods for obtaining an analytical solution for the problem of natural frequencies of hinged structures. *Structural Mechanics and Structures*. 2020. Vol. 1. No. 24. Pp. 25–38.
9. Domanov E.V. Analytical dependence of the deflection of the spatial console of a triangular profile on the number of panels. *Scientific Almanac*. 2016. No. 6-2 (19). S. 214-217. DOI: 10.17117 / na.2016.06.02.214
10. Larichev S.A. Inductive analysis of the effect of building lifting on the stiffness of a spatial girder // *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. M: Infra-M. 2015, T. 1.S. 4-8.
11. Vorobev O. Bilateral analytical estimation of first frequency of a plane truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. Vol. 92. Article No. 9204 doi: 10.18720/CUBS.92.4
12. Petrichenko E.A. The lower limit of the frequency of natural oscillations of the Fink truss. *Structural mechanics and structures*. 2020. No. 3 (26). Pp. 21–29.
13. Ignatiev, V.A. *Raschet regulyarnykh sterzhnevnykh sistem* [Calculation of regular rod systems]. Saratov Higher Military Chemical Military School. Saratov, 1973.
14. Hutchinson R. G., Fleck N. A. Microarchitected cellular solids – the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM Z. Angew. Math. Mech*. 2005. 85, No. 9. Pp. 607 – 617.DOI: 10.1002/zamm.200410208
15. Hutchinson R.G., Fleck N. A. The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*,.Vol. 54. Issue 4. April 2006. Pp. 756-782. doi:10.1016/j.jmps.2005.10.008
16. Buka-Vaivade, K. Kirsanov M. N., Serdyuk D. O. Calculation of deformations of a cantilever frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU*. 2020. V. 15. No. 4. Pp. 510—517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517.

STATIC AND KINEMATIC ANALYSIS OF A PLANAR REGULAR BEAM TRUSS WITH A DOUBLE LATTICE

M. N. Kirsanov

National Research University «MPEI»
Moscow, Russia

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines, tel.: +7(495)362-73-14, e-mail: c216@ya.ru

A scheme of a statically determinate regular girder truss of a lattice type is proposed. The case of kinematic degeneration of the structure from the number of panels is discovered and investigated. For concentrated and distributed loads over the lower belt, the dependence of the deflection of the truss on the number of its panels is derived by induction with the involvement of a system of symbolic mathematics. The deflection is calculated using the Maxwell – Mohr formula. The resulting dependence has the form of a polynomial in the number of panels with variables depending on the parity of the number of panels. A formula for the dependence of the magnitude of the horizontal shift of the movable support is also obtained.

Keywords: truss, kinematic variability, deflection, analytical solution, induction, Maple

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ПОЛОГИХ ОБОЛОЧКАХ НА ОСНОВЕ ТРАЕКТОРИЙ НАИБОЛЬШИХ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

А. Н. Аверин¹, Т. А. Аверина²

Воронежский государственный технический университет^{1,2}
Россия, г. Воронеж

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики, тел.: +7(473)271-52-30,
e-mail: an_averin@mail.ru

²Канд. техн. наук, доцент кафедры управления, тел.: +7(473)276-40-07,
e-mail: ta_averina@mail.ru

В статье для пологой оболочки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, со схемой опирания на шарнирные опоры получено аналитическое решение. Нагрузка и неизвестные функции прогиба и напряжений представлены с помощью двойных тригонометрических рядов. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния, определены усилия и перемещения. Дана оценка точности суммирования рядов по перемещениям и усилиям. В окрестности точек нижней, срединной и верхней поверхностей оболочки вычислены нормальные и касательные напряжения, а также главные напряжения и главные площадки. Показана картина двухосного напряженного состояния и на ее основе построены графики траекторий наибольших растягивающих напряжений. Графики траекторий на нижней поверхности оболочки сопоставлены с экспериментальными схемами развития трещин. По траекториям наибольших растягивающих напряжений, построенных в точках нижней поверхности, делается прогноз о месте, направлении и последовательности появления трещин в оболочке.

Ключевые слова: пологая оболочка, главные напряжения, главные площадки, схема развития трещин, траектории наибольших растягивающих напряжений.

Введение. Современный подход к расчету железобетонных конструкций базируется преимущественно на применении численных методов с использованием программных комплексов [1, 2].

Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций следует выполнять по предельным состояниям первой и второй групп. Расчеты по предельным состояниям первой группы включают расчет по прочности с учетом в необходимых случаях деформированного состояния конструкции перед разрушением, расчет по устойчивости формы (общей и локальной) [3].

Расчеты по предельным состояниям второй группы производятся с учетом образования и раскрытия трещин. Усилия и деформации допускается определять в предположении упругой работы железобетонных элементов, с последующей корректировкой результатов расчета для учета влияния нелинейности их работы [4, 5].

Вопросы поведения железобетонных конструкций с трещинами, работающих в условиях двухосного напряженного состояния, анализировались в статьях [6, 7, 8]. По результатам опытов с железобетонными плитами, армированными ортогональной арматурой, отмечалось, что с появлением трещин закон нарастания прогибов существенно меняется и данные упругого расчета перестают соответствовать опыту. Вместе с тем

сопоставление графиков траекторий максимальных растягивающих напряжений со схемами развития трещин позволило авторам [6, 7] сделать предположение, что траектории главных напряжений, построенные для упругой работы железобетонных плит, определяют общую направленность развития трещин на растянутой поверхности, а величина главных растягивающих напряжений – последовательность развития трещин. Это положение используется при изучении работы плит в областях с трещинами, проходящими под углом к стержням арматуры (косые трещины) [9].

Пологая оболочка. Рассмотрим пологую прямоугольную в плане оболочку (рис. 1), срединная поверхность которой является эллиптическим параболоидом (рис. 2).

$$Z(x, y) = f_1 \left(2 \frac{x}{a} - 1\right)^2 + f_2 \left(2 \frac{y}{b} - 1\right)^2 - f_1 - f_2. \quad (1)$$

На контуре оболочку будем считать опертой на бортовые элементы. Ими могут служить балки с криволинейным поясом, бортовые фермы, арки с затяжкой и т.п. Все указанные конструкции опорных элементов обладают достаточно большой жесткостью в отношении перемещений в плоскости этих конструкций и несравнимо меньшей жесткостью относительно перемещений из этих плоскостей. Это позволяет в качестве расчетной схемы принять схему опирания оболочки на идеальные диафрагмы или практически эквивалентную ей для пологой оболочки схему опирания на шарнирные опоры.

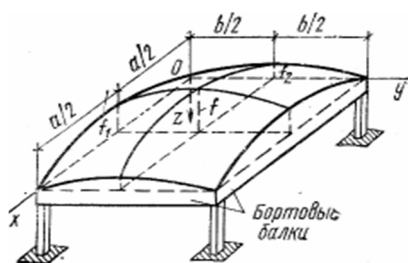


Рис. 1. Пологая оболочка ($\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5}$)

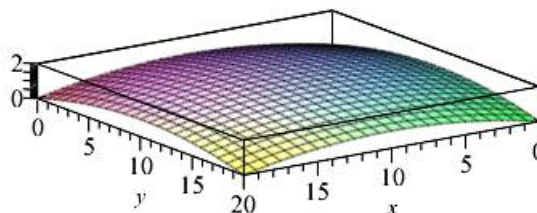


Рис. 2. Срединная поверхность оболочки

Кривизны поверхности определяем как частные производные от функции (1)

$$K_x = 8 \frac{f_1}{a^2}, K_y = 8 \frac{f_2}{b^2}. \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений пологой оболочки имеет вид [10]

$$-K_x \frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial y^2} - K_y \frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial x^2} + D \left(\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} \right) - q = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{Eh} \cdot \left(\frac{\partial^4 \Phi(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi(x, y)}{\partial y^4} \right) + K_x \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} + K_y \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (3), (4) $w(x, y)$ - функция прогиба, $\Phi(x, y)$ - функция напряжений, умноженная на толщину оболочки h

$$\Phi(x, y) = h \cdot \varphi(x, y), \quad (5)$$

$q(x, y)$ - интенсивность поверхностных сил, D - цилиндрическая жесткость

$$D = \frac{1}{12} \frac{Eh^3}{1 - \mu^2}. \quad (6)$$

В формуле (6) через E, μ обозначены модуль упругости и коэффициент Пуассона.

По краям оболочка соединена с диафрагмами, абсолютно жесткими в их плоскости и гибкими из нее, вследствие чего на всех кромках обеспечиваются граничные условия:

$$x=0, x=a, w(x,y)=0, \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2}=0, \frac{\partial^2 \Phi(x,y)}{\partial y^2}, v(x,y)=0, \quad (7)$$

$$y=0, y=b, w(x,y)=0, \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2}=0, \frac{\partial^2 \Phi(x,y)}{\partial x^2}=0, u(x,y)=0. \quad (8)$$

В выражениях (7), (8) $w(x,y)$, $u(x,y)$, $v(x,y)$ – перемещения точек срединной поверхности в направлении координатных осей x, y, z соответственно (рис. 1).

Решение системы дифференциальных уравнений (3), (4) с граничными условиями (7), (8) представляется в виде двойных тригонометрических рядов:

$$w(x,y) = \sum_n \sum_m w_{m,n} \sin\left(\frac{\pi x m}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y m}{b}\right), \quad (9)$$

$$\Phi(x,y) = \sum_n \sum_m \Phi_{m,n} \sin\left(\frac{\pi x m}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y m}{b}\right), \quad (10)$$

$$u(x,y) = \sum_n \sum_m u_{m,n} \cos\left(\frac{\pi x m}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y m}{b}\right), \quad (11)$$

$$v(x,y) = \sum_n \sum_m v_{m,n} \sin\left(\frac{\pi x m}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi y m}{b}\right). \quad (12)$$

Функция нагрузки также раскладывается в двойной тригонометрический ряд:

$$q(x,y) = \sum_n \sum_m q_{m,n} \sin\left(\frac{\pi x m}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y m}{b}\right). \quad (13)$$

Решение дифференциальной задачи (3), (4), (7), (8) выполняется методом Бубнова-Галеркина в системе компьютерной математики Maple [11].

Мембранные напряжения (постоянные по толщине оболочки) выражаются через функцию напряжений по формулам

$$\sigma_{x_\varphi} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \sigma_{y_\varphi} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \tau_{xy_\varphi} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \quad (14)$$

Мембранные усилия, связанные с деформацией срединной поверхности, определяются следующим образом:

$$N_x = \frac{\partial^2 \Phi(x,y)}{\partial y^2}, N_y = \frac{\partial^2 \Phi(x,y)}{\partial x^2}, S_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi(x,y)}{\partial x \partial y}. \quad (15)$$

Усилия, возникающие при изгибе оболочки: изгибающие моменты и крутящий момент, выражаются через функцию прогиба

$$M_x = -D\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2}\right), M_y = -D\left(\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2}\right), \quad (16)$$

$$M_{xy} = -D(1-\mu) \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y}.$$

Нормальные и касательные напряжения, вызванные изгибом оболочки, распределяются по толщине сечения по линейному закону рис. 3.

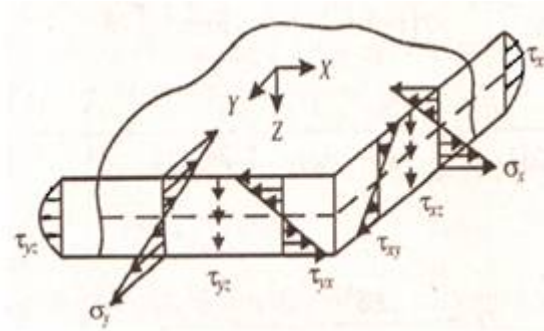


Рис. 3. Распределение нормальных и касательных напряжений

При расчете оболочек на прочность напряжения τ_{xz}, τ_{yz} , как правило, значительно меньше, чем напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$, и мало влияют на оценку прочности. Поэтому напряженное состояние в окрестности точек оболочки можно рассматривать как плоское напряженное состояние.

Напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ в точках нижней ($z = h/2$) и верхней ($z = -h/2$) поверхностей оболочки достигают наибольших по абсолютной величине значений и повторяют законы распределения соответствующих усилий M_x, M_y, M_{xx} .

$$\sigma_x = \pm \frac{6M_x}{h^2}, \quad \sigma_y = \pm \frac{6M_y}{h^2}, \quad \tau_{xy} = \pm \frac{6H}{h^2}. \quad (17)$$

В точках нижней и верхней поверхностей изгибные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ суммируются с мембранными напряжениями $\sigma_{x\phi}, \sigma_{y\phi}, \tau_{xy\phi}$.

Для анализа напряженного состояния в окрестности точек нижней, срединной и верхней поверхностей оболочки вычисляются главные напряжения и определяются положения главных площадок по формулам

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad \operatorname{tg}(\alpha_{\max}) = \frac{\tau_{xy}}{\sigma_{\max} - \sigma_x}. \quad (18)$$

На главных площадках действуют только нормальные напряжения. Поэтому переход от напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ к главным напряжениям дает возможность рассматривать в окрестности точек нижней (верхней) поверхностей оболочки следующие виды двухосного напряженного состояния (рис. 4): двухстороннее растяжение рис. 4,а ($\sigma_{\max} > 0, \sigma_{\min} > 0$); растяжение-сжатие рис. 4,б ($\sigma_{\max} > 0, \sigma_{\min} < 0$); двухстороннее сжатие рис. 4,в ($\sigma_{\max} < 0, \sigma_{\min} < 0$).

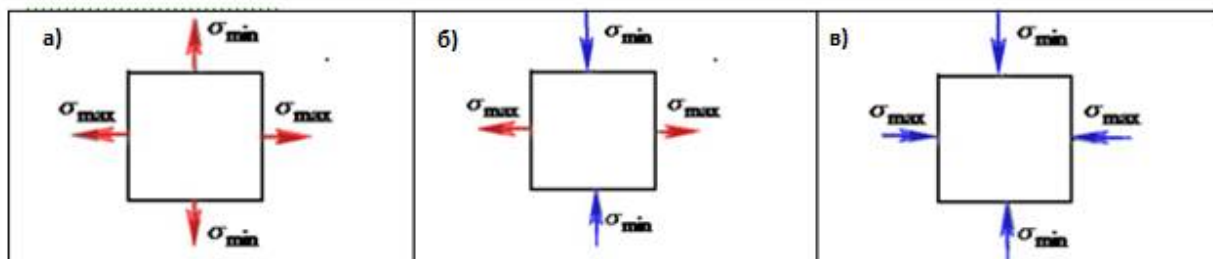


Рис. 4. Виды двухосного напряженного состояния

Плоское напряженное состояние является частным случаем пространственного напряженного состояния с главными напряжениями $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Через главные напряжения пространственного напряженного состояния выражаются эквивалентные напряжения σ_i по

теориям прочности. Переход к главным напряжениям пространственного напряженного состояния для случаев двухстороннего растяжения, двухстороннего сжатия, двухстороннего растяжения-сжатия осуществляется по формулам

$$\begin{aligned} & (\sigma_{\max} > 0; \sigma_{\min} > 0;), \quad \sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = \sigma_{\min}; \sigma_3 = 0; \\ & (\sigma_{\max} < 0; \sigma_{\min} < 0;), \quad \sigma_1 = 0; \sigma_2 = \sigma_{\min}; \sigma_3 = \sigma_{\max}; \\ & (\sigma_{\max} > 0; \sigma_{\min} < 0;), \quad \sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = 0; \sigma_3 = \sigma_{\min}. \end{aligned} \quad (19)$$

Анализ формул (19) показывает, что в точках двухстороннего сжатия $\sigma_1 = 0$, а в точках двустороннего растяжения и в точках с напряженным состоянием растяжение - сжатие σ_1 равно наибольшему растягивающему напряжению ($\sigma_1 = \sigma_{\max}^+$).

Таким образом, если в окрестности точки возникает напряженное состояние «двухстороннее растяжение» или «двухстороннее растяжение-сжатие», то в соответствии с первой теорией прочности предельным напряжением для этих двух состояний является величина $\sigma_i = \sigma_1$.

Определим предельное напряжение для рассмотренных выше напряженных состояний по второй теории прочности (теория наибольшего относительного удлинения). Для «двухстороннего растяжения» ($\sigma_1 = \sigma_{\max} > 0; \sigma_2 = \sigma_{\min} > 0; \sigma_3 = 0$) предельное напряжение равно $\sigma_i^{p-p} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\max} - \mu \cdot \sigma_{\min}$. В случае напряженного состояния «двухстороннее растяжение-сжатие» ($\sigma_1 = \sigma_{\max}; \sigma_2 = 0; \sigma_3 = \sigma_{\min} < 0$) предельное напряжение равно $\sigma_i^{p-c} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\max} + \mu \cdot |\sigma_{\min}|$.

Следовательно, из двух рассмотренных напряженных состояний более опасным можно считать напряженное состояние «двухстороннее растяжение», так как $\sigma_i^{p-p} < \sigma_i^{p-c}$.

В дальнейшем, при моделировании схем развития трещин в точках нижней (верхней) поверхности оболочки, нам потребуется понятие траекторий наибольших растягивающих напряжений.

Под траекторией наибольших растягивающих напряжений будем понимать линию, в каждой точке которой касательная совпадает с направлением главной площадки, где действует главное напряжение σ_1 , определяемое по формулам (19) [6].

Приведем результаты расчета полой оболочки при следующих исходных данных: $a = 20 \text{ м}, b = 20 \text{ м}, h = 0,07 \text{ м}, f = 1 \text{ м}, f_1 = 0,05a, f_2 = 0,05b, \mu = 0,16, E = 3,6 \cdot 10^7 \text{ кН/м}^2, q = 5 \text{ кН/м}^2$.

На рис. 5 показана функция прогиба $w(x, y)$, а на рис. 6 – её сечение вдоль диагонали. Отметим, что суммирование по формуле (9) производилось по нечетным индексам ($m < n = 1, 3, 5, \dots, 25$), и при вычислении $w(x, y)$ для получения результата с заданной точностью ($\varepsilon \leq 1\%$) в сумме удерживался 21 член ряда.

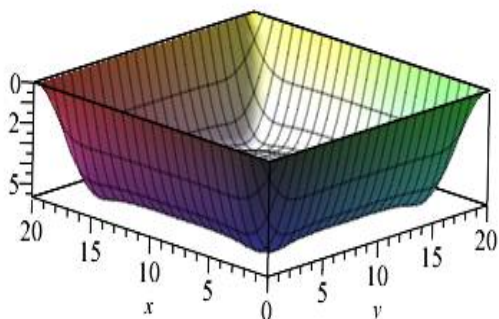


Рис. 5. Функция прогиба

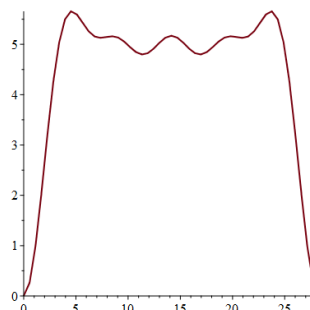


Рис. 6. Сечение $w(x, y)$ вдоль диагонали

Функция напряжений $\varphi(x, y)$ представлена на рис. 7. При вычислении $\varphi(x, y)$ по формуле (10) с заданной точностью ε необходимо было удержать 6 членов ряда. Через

функцию напряжений по формулам (14) определяются касательные напряжения $\tau_{xy_\varphi}(x, y)$ (рис. 8) и нормальные напряжения $\sigma_{x_\varphi}(x, y)$ (рис. 9) и $\sigma_{y_\varphi}(x, y)$ (рис. 10).

Ряды для вычисления мембранных напряжений получаются в результате двукратного дифференцирования суммы ряда (10) и имеют более медленную сходимость. Чтобы получить напряжения с заданной точностью ε , потребовалось при вычислении $\sigma_{x_\varphi}(x, y)$ и $\sigma_{y_\varphi}(x, y)$ удержать 16 членов ряда, а при вычислении $\tau_{xy_\varphi}(x, y) - 13$.

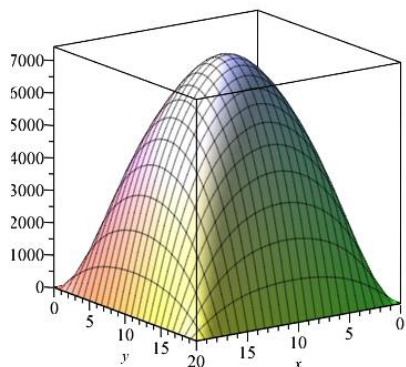


Рис. 7. Функция напряжений $\varphi(x, y)$

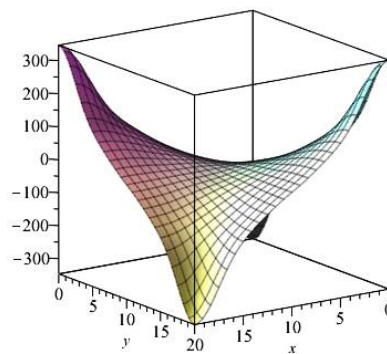


Рис. 8. Напряжения $\tau_{xy_\varphi}(x, y)$

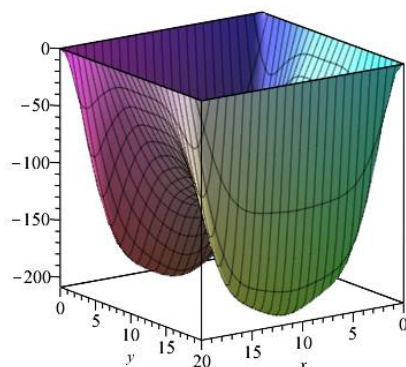


Рис. 9. Напряжения $\sigma_{x_\varphi}(x, y)$

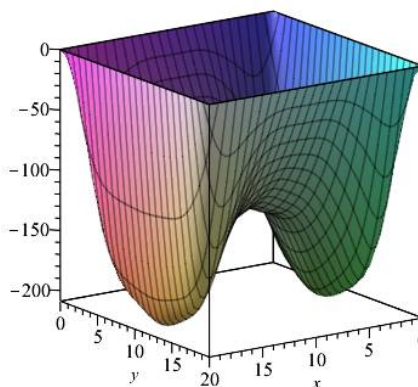


Рис. 10. Напряжения $\sigma_{y_\varphi}(x, y)$

Функция изгибающих моментов $M_x(x, y)$ показана на рис. 11, а на рис. 12 – ее сечение вдоль диагонали.

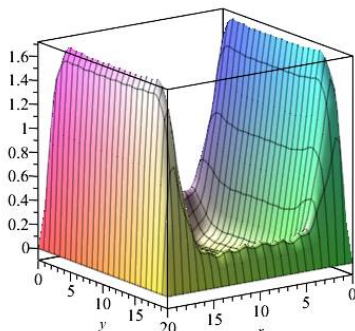


Рис. 11. Изгибающие моменты $M_x(x, y)$

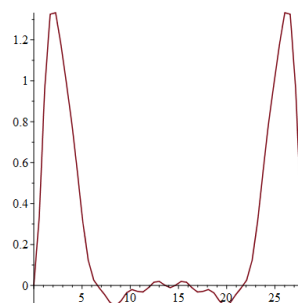


Рис. 12. Сечение $M_x(x, y)$ вдоль диагонали

Изгибающие $M_y(x, y)$ и крутящие $M_{xx}(x, y)$ моменты представлены на рис. 13, рис.

14.

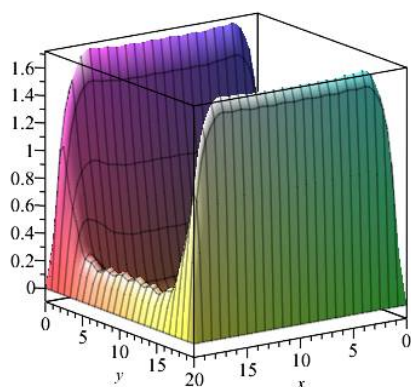


Рис. 13. Изгибающие моменты $M_y(x, y)$

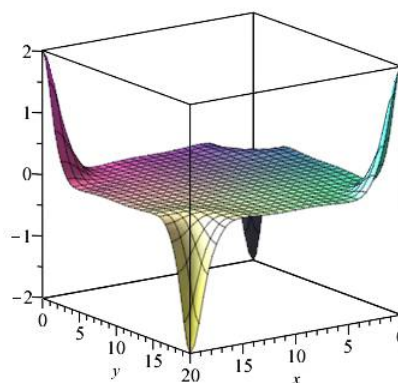


Рис. 14. Крутящие моменты $M_{xx}(x, y)$

Ряды для вычисления изгибающих и крутящих моментов получаются дифференцированием суммы ряда (9) и имеют более медленную сходимость, чем ряды для функции прогибов. Чтобы получить усилия с заданной точностью ε потребовалось удержать 74 члена ряда при вычислении $M_x(x, y)$ и $M_y(x, y)$, и 108 слагаемых – при вычислении $M_{xx}(x, y)$.

Нормальные и касательные напряжения от изгиба в точках верхней (нижней) поверхности определяются по формулам (17), а затем суммируются с мембранными напряжениями (14). Далее по формулам (18) в расчетных точках определяются главные площадки и действующие на них главные напряжения.

Картина напряженного состояния на нижней поверхности оболочки представлена на рис. 15. Из рис. 15 видно, что в точках, расположенных в центральной зоне оболочки, напряженное состояние «двухстороннее сжатие». В точках вдоль боковых кромок – напряженное состояние «двухстороннее растяжение». В зонах переходных от центра к боковым кромкам имеет место «растяжение - сжатие». В угловых зонах – «двухстороннее растяжение» и «растяжение - сжатие».

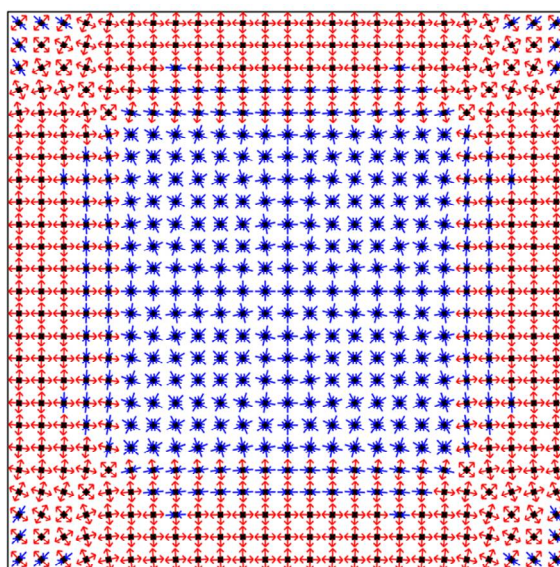


Рис. 15. Картина напряженного состояния на нижней поверхности оболочки

На рис. 16 показана поверхность главных напряжений $\sigma_1(x, y)$, а на рис. 17 – главных напряжений $\sigma_3(x, y)$. Отметим, что в точках вблизи углов оболочки напряженное состояние «растяжение-сжатие», при этом модули растягивающих и сжимающих напряжений примерно равны ($|\sigma_{\min}| = \sigma_{\max} = \sigma$), т.е. в угловых точках имеет место напряженное состояние «чистый сдвиг».

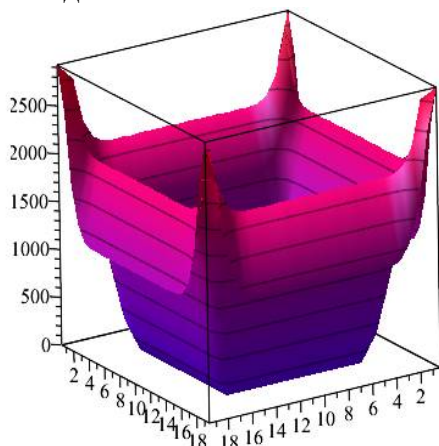


Рис. 16. Главные напряжения $\sigma_1(x, y)$

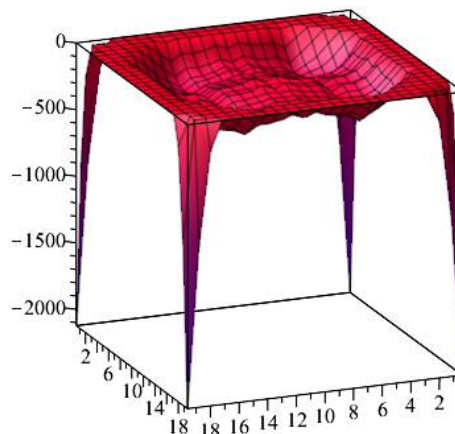


Рис. 17. Главные напряжения $\sigma_3(x, y)$

На рис. 18 представлены траектории наибольших растягивающих напряжений $\sigma_1(x, y)$, а на рис. 19 – схема наиболее вероятного образования трещин. При увеличении нагрузки на оболочку сначала образуются диагональные трещины в угловых зонах, затем – трещины вдоль бортовых элементов и перпендикулярные им (в окрестности точек вдоль бортовых элементов имеет место напряженное состояние «двухстороннее растяжение»). В угловых зонах оболочки вследствие действия растягивающих напряжений значительной интенсивности наблюдается образование в бетоне сквозных трещин.

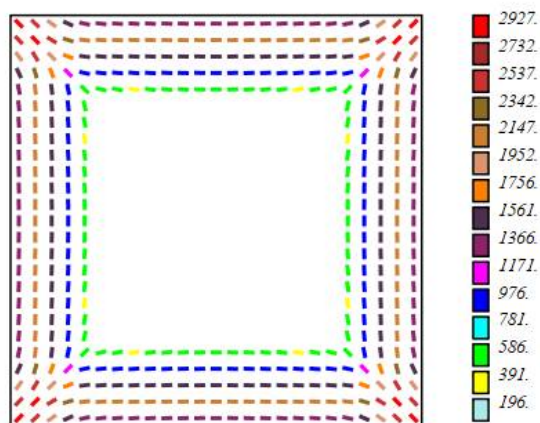


Рис. 18. Траектории наибольших растягивающих напряжений $\sigma_1(x, y)$ (нижняя поверхность)

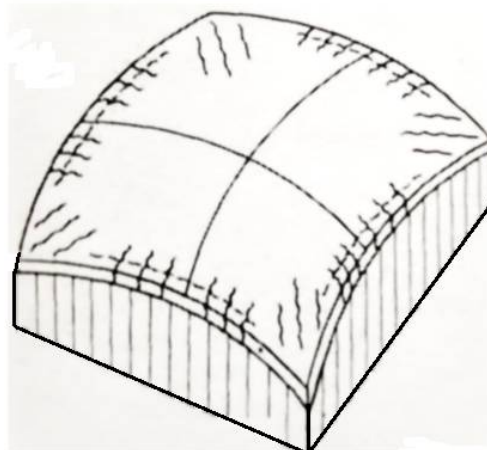


Рис. 19. Схема образования трещин

Картина напряженного состояния (КНС) на уровне срединной поверхности ($z=0$) оболочки показана на рис. 20 (1/4-часть оболочки). На рис. 21 и рис. 22 показаны наибольшие растягивающие напряжения $\sigma_1(x, y)$ и наибольшие сжимающие напряжения $\sigma_3(x, y)$. Из рис. 20 видно, что в центральной зоне оболочки имеет место «двухстороннее

сжатие», а в угловых зонах «растяжение-сжатие», при этом абсолютные значения растягивающих и сжимающих напряжений близки.

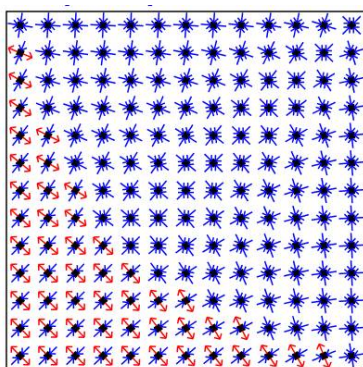


Рис. 20. КНС (1/4 часть оболочки)

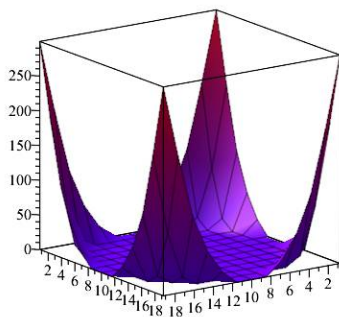


Рис. 21. Напряжения $\sigma_1(x, y)$, $(z = 0)$

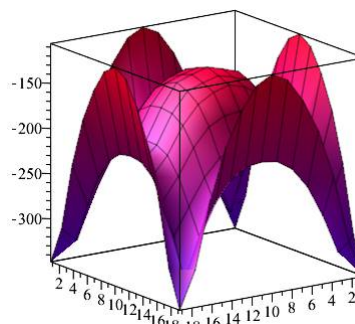


Рис. 22. Напряжения $\sigma_3(x, y)$, $(z = 0)$

Картина напряженного состояния в точках верхней поверхности ($z = -h/2$) оболочки показана на рис. 23 (1/4-часть оболочки). На рис. 24 и рис. 25 показаны наибольшие растягивающие напряжения $\sigma_1(x, y)$ и наибольшие сжимающие напряжения $\sigma_3(x, y)$.

В точках верхней поверхности имеет место двухстороннее сжатие и только в угловых точках – двухстороннее «растяжение-сжатие»

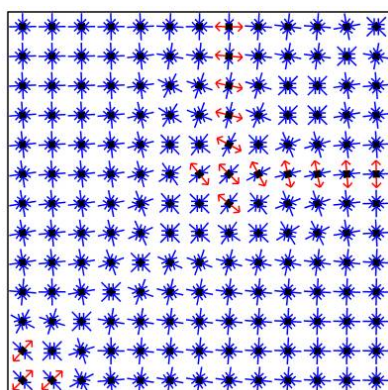


Рис. 23. КНС (1/4 часть оболочки)

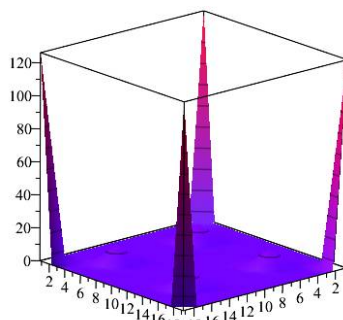


Рис. 24. Напряжения $\sigma_1(x, y)$, $(z = -h/2)$

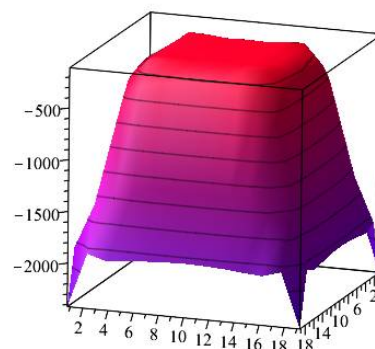


Рис. 25. Напряжения $\sigma_3(x, y)$, $(z = -h/2)$

Анализ напряженного состояния в точках срединной и верхней поверхностей оболочки показывает, что на уровне этих слоев могут возникать сквозные трещины в угловых зонах. Прочность в точках двухстороннего сжатия необходимо проверять по наибольшим сжимающим напряжениям $\sigma_3(x, y)$ (первая теория прочности). Проверку устойчивости необходимо выполнять при наличии местных нагрузок большой интенсивности [12].

Вывод. Траектории главных растягивающих напряжений, построенных для упругой работы оболочки, определяют характер (общую направленность) развития трещин на растянутой поверхности, а величина главных напряжений – последовательность развития трещин. Направление развития трещин зависит и от других факторов, не поддающихся учету, например, неоднородности материала, и поэтому возможны отклонения отдельных

трещин от главных траекторий, но в среднем направленность трещин отвечает траекториям наибольших растягивающих напряжений, построенных по результатам упругого расчета.

Библиографический список

1. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): справочник / под ред. Ю.А. Дыховичного, Э.З. Жуковского. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 543.
2. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013 / Д.А. Городецкий и др. – Киев-М.: Электронное издание, 2013. – 376 с.
3. Методическое пособие по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий / Б.С. Соколов и др. – М., 2019. – 210 с.
4. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменением № 1).
5. Дубинский А.М. Расчет несущей способности железобетонных плит и оболочек. – Киев, 1984.
6. Гвоздев А.А., Карпенко Н.И., Крылов С.М. Теоретическое и экспериментальное исследование работы железобетона с трещинами при плоском однородном и неоднородном напряженном состояниях // Совершенствование расчета статически неопределимых железобетонных конструкций: сб. ст. НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 5-43.
7. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. – М.: Стройиздат, 1976. – 206 с.
8. Зиновьева Р.В., Крылов С.М. Исследование несущей способности опертых по контуру железобетонных плит, ослабленных отверстиями // Совершенствование расчета статически неопределимых железобетонных конструкций: сб. ст. НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1968. – С.143-173.
9. Сафронов В.С., Доманов Д.И. Применение теории риска для оценки вероятности трещинообразования при стесненном кручении железобетонных мостовых балок // Механика разрушения бетонов, железобетонов и других строительных материалов: сб. ст. по материалам 7-й междунар. науч. конф.: в 2 т. – СПб, 2013. – С. 31-38.
10. Александров А.В., Потапов В.Д. Сопrotивление материалов. Основы теории упругости и пластичности: учебник для строит. спец. вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высш. шк. 2002. – 400 с.
11. Аверин А.Н. Применение системы Maple для решения задач теории упругости // Проблемы многоуровневого профессионального образования: сб. тез. докл. регион. науч.-метод. конф. профессорско-преподавательского состава, посвященной 75-летию НГАСУ отв. ред. Т.Н. Мельник. – Новосибирск, 2005. – С. 56-58.
12. Аверин А.Н. Напряженно-деформированное состояние пологой оболочки при действии сосредоточенных нагрузок // Строительная механика и конструкции. – 2011. – №1 (2). – С. 12-17.

References

1. Dykhovichny Yu.A., Zhukovsky E.Z. Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): handbook. M.: High school, 1991. P. 543.
2. Gorodetsky D.A. Software complex LIRA-SAPR. Kiev-M.: Electronic edition, 2013. 376 p.
3. B.S. Sokolov. Methodical manual for the design of reinforced concrete spatial structures of pavements and floors. M., 2019. 210 p.

4. Set of rules 63.13330.2018 Construction norms and regulations 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. Basic Provisions"(amendment No. 1).
5. Dubinsky A.M. Calculation of the bearing capacity of reinforced concrete slabs and shells. Kiev, 1984.
6. Gvozdev A.A., Karpenko N.I., Krylov S.M. Theoretical and experimental study of the work of reinforced concrete with cracks in flat homogeneous and inhomogeneous stress states. Improvement of the Calculation of Statically Indeterminate Reinforced Concrete Structures: Collection of Articles. M.: Stroyizdat, 1968. Pp. 5-43.
7. Karpenko N.I. The theory of deformation of cracked reinforced concrete. M.: Sroyizdat, 1976. 206 p.
8. Zinovieva R.V., Krylov S.M. Investigation of the bearing capacity of reinforced concrete slabs supported along the contour, weakened by holes. M.: Stroyizdat, 1968. Pp. 143-173.
9. Safronov V.S., Domanov D.I. Application of risk theory to assess the probability of cracking under constrained torsion of reinforced concrete bridge beams. Mechanics of Destruction of Concrete, Reinforced Concrete and Other Building Materials: Collection of Articles. Based on the materials of the 7th International Scientific Conference: in 2 volumes. SPb, 2013. Pp. 31-38.
10. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. Strength of materials. Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity: a textbook for construction universities. 2nd ed., M.: High school. 2002. 400 p.
11. Averin A.N. The use of the Maple system for solving problems of the theory of elasticity. Problems of Multilevel Vocational Education: Collection of Articles. Thesis Report. Scientific Method Conf. of the Teaching Staff Dedicated to the 75th Anniversary of NSASU. ed. T.N. Melnik. Novosibirsk, 2005. Pp. 56-58.
12. Averin A.N. Stress-strain state of a shallow shell under the action of concentrated loads. Structural Mechanics and Constructions. No. 1(2). 2011.Pp. 12-17.

MODELING OF SCHEMES OF CRACK DEVELOPMENT IN SHAPE SHELLS BASED ON TRAJECTORIES OF THE LARGEST TENSION STRESS

A. N. Averin¹, T. A. Averina²

Voronezh State Technical University^{1,2}.
Russia, Voronezh

¹ PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(473)2715230,
e-mail: an_averin@mail.ru

²PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Management, Tel.: +7(473)2764007,
e-mail: ta_averina@mail.ru

An analytical solution is obtained in the article for a shallow shell loaded with a uniformly distributed load, with a scheme of bearing on hinged supports. Load and unknown deflection and stress functions are represented using double trigonometric series. Calculations of the stress-strain state were performed, forces and displacements were determined. An assessment of the accuracy of summation of the series of displacements and efforts is given. In the vicinity of the points of the lower, middle and upper surfaces of the shell, normal and shear stresses, as well as principal stresses and principal areas, are calculated. The picture of the biaxial stress state is shown and on its basis, the graphs of the trajectories of the highest tensile stresses are constructed. The trajectory plots on the lower surface of the shell are compared with the experimental crack propagation schemes. The trajectories of the highest tensile stresses plotted at the points of the lower surface are used to predict the location, direction, and sequence of cracks in the shell.

Keywords: shallow shell, principal stresses, principal areas, crack propagation pattern, trajectories of the highest tensile stresses.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В БАШЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

С. В. Ефрюшин¹, А. Р. Ефанов²

Воронежский государственный технический университет^{1,2}
Россия, г. Воронеж

¹Канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики, тел.: +7(910)3415266, e-mail: ooo.stroynauka@mail.ru

²Аспирант кафедры строительной механики, тел.: +7(903)6555500, e-mail: misterefanov@gmail.com

Постановка задачи. Исследовать семь реально изготавливаемых на сегодняшний день профилей легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) на воздействие статических, а также аэродинамических нагрузок с целью нахождения наиболее эффективного для элементов башенного типа сооружений.

Результаты. Осуществлен отбор реально изготавливаемых профилей ЛСТК. Проведен сравнительный анализ данных профилей по несущей способности и деформационным свойствам при помощи программного комплекса Ansys Workbench. Описана методика моделирования и определения среднего ветрового давления на профиль при помощи расчётно-вычислительного комплекса Ansys Fluid Flow (Fluent). Проведен сравнительный анализ профилей ЛСТК по среднему ветровому давлению и характеру обтекания профилей ветровым потоком. Сделан вывод о наиболее эффективных профилях ЛСТК для элементов башенного типа сооружений.

Выводы. В ходе исследования была рассмотрена методика определения среднего ветрового давления при помощи расчётно-вычислительного комплекса Ansys Fluid Flow (Fluent). С учетом выборки профилей по несущей способности и деформационным свойствам (профили №1,2,4,6,7) и выборки профилей по среднему ветровому давлению и характеру обтекания профилей ветровым потоком (профили № 2-5) сделан вывод о том, что наиболее эффективными для элементов башенного типа сооружений и восприятия воздействия статических и аэродинамических нагрузок являются профили ЛСТК под номером 2 и 4 (рис. 2,4).

Ключевые слова: решетчатая башня, профиль ЛСТК, моделирование обтекания элементов сооружения, ветровое давление.

Введение. Для определения аэродинамических свойств профилей ЛСТК нормами СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» регламентируется проведение испытаний в аэродинамической трубе. В качестве альтернативного способа в данной работе была рассмотрена методика определения среднего ветрового давления при помощи расчётно-вычислительного комплекса Ansys Fluid Flow (Fluent), а также проведен сравнительный анализ полученных результатов для всех исследуемых профилей с целью определения наиболее эффективного для башенного типа сооружений.

Отбор исследуемых профилей. В качестве исследуемых выбраны семь реально изготавливаемых на сегодняшний день профилей ЛСТК (рис. 1). Основным параметром для отбора в сортаменте являлась сравнительно одинаковая площадь поперечного сечения и толщина стенок (2 мм).

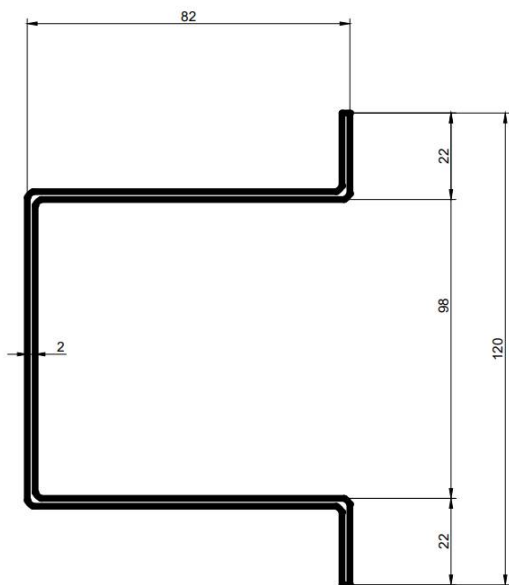


Рис. 1. Сечение профиля № 1

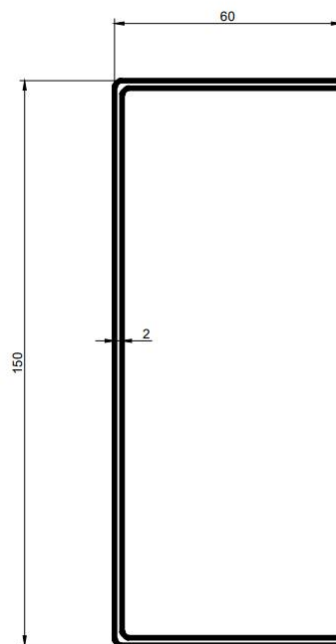


Рис. 2. Сечение профиля № 2

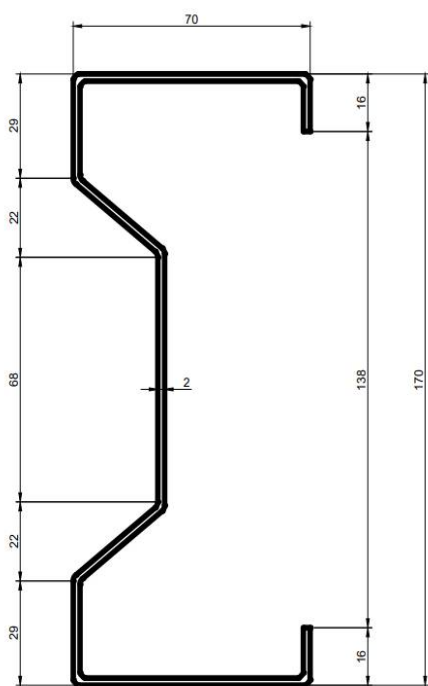


Рис. 3. Сечение профиля № 3

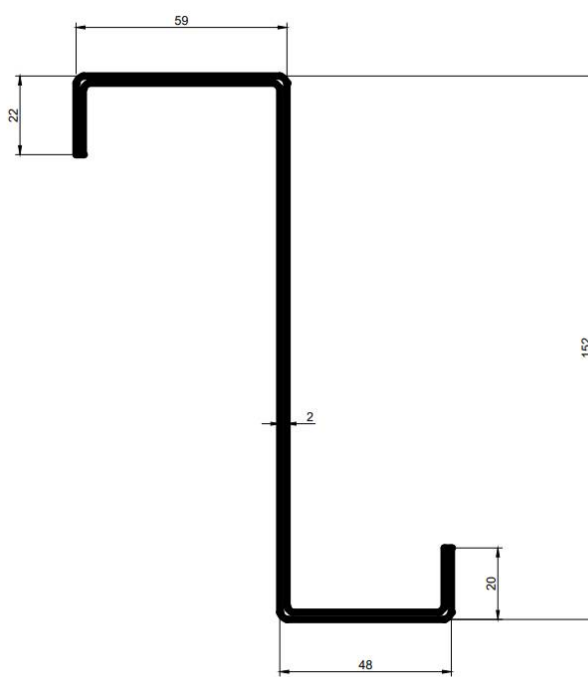


Рис. 4. Сечение профиля № 4

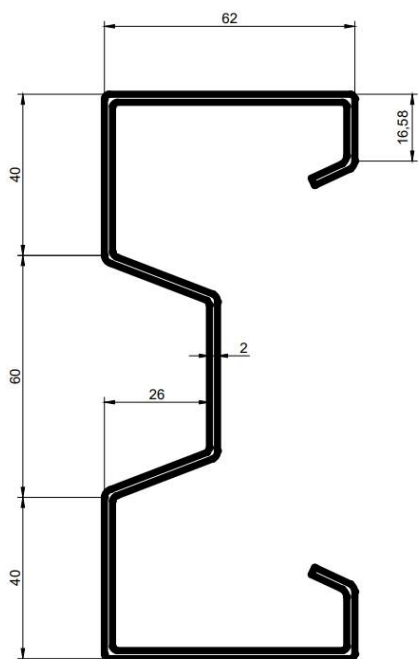


Рис. 5. Сечение профиля № 5

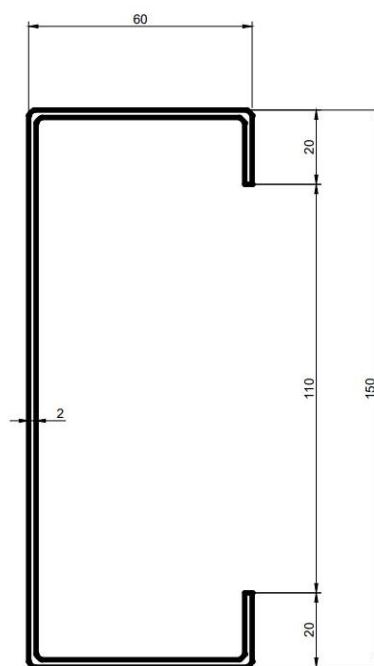


Рис. 6. Сечение профиля № 6

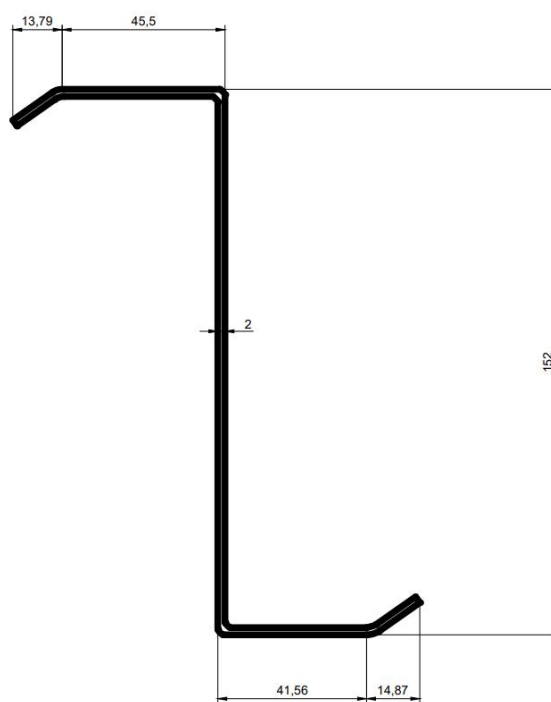


Рис. 7. Сечение профиля № 7

Анализ несущей способности и деформационных свойств. Для определения наиболее эффективного профиля с точки зрения несущей способности и деформационных свойств выполнен расчет в программном комплексе Ansys Workbench на действие максимального продольного усилия в наиболее нагруженном элементе башни (рис. 8-26).

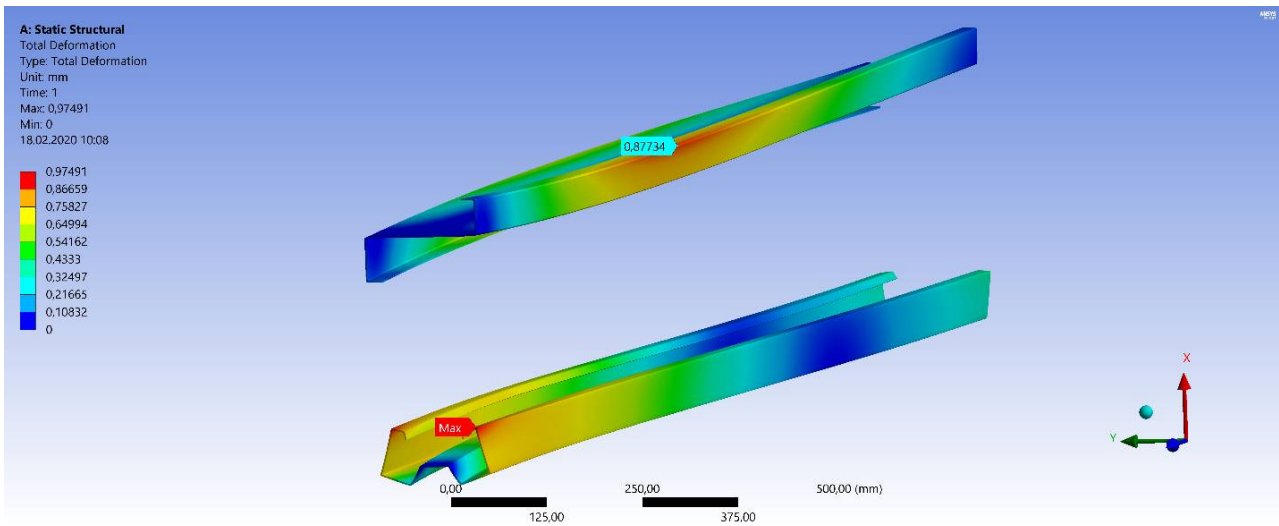


Рис. 8. Деформации профилей № 4 и № 5

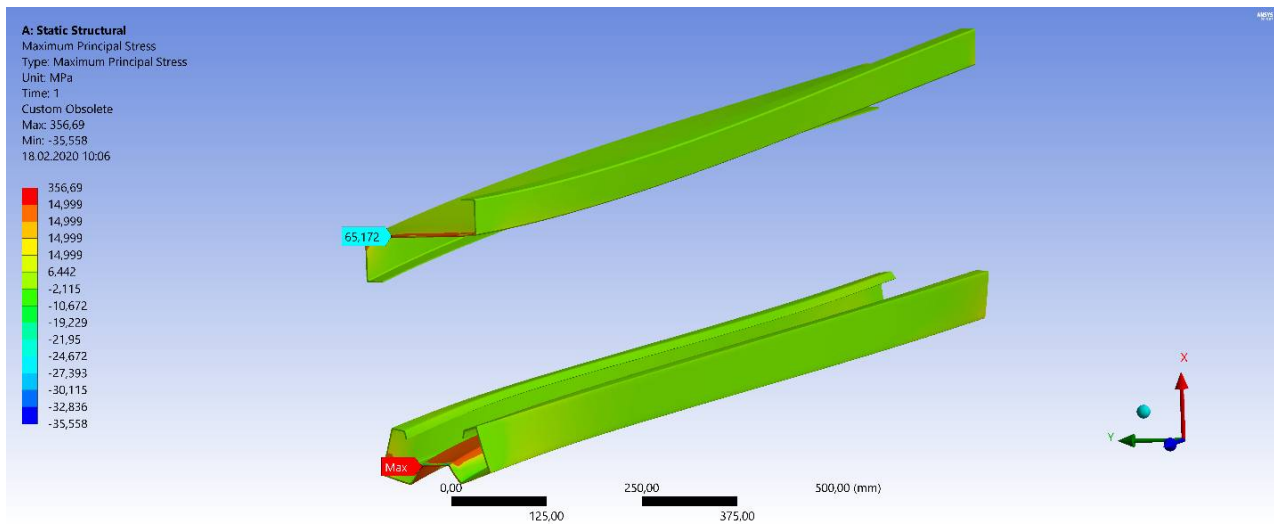


Рис. 9. Максимальные напряжения профилей № 4 и № 5

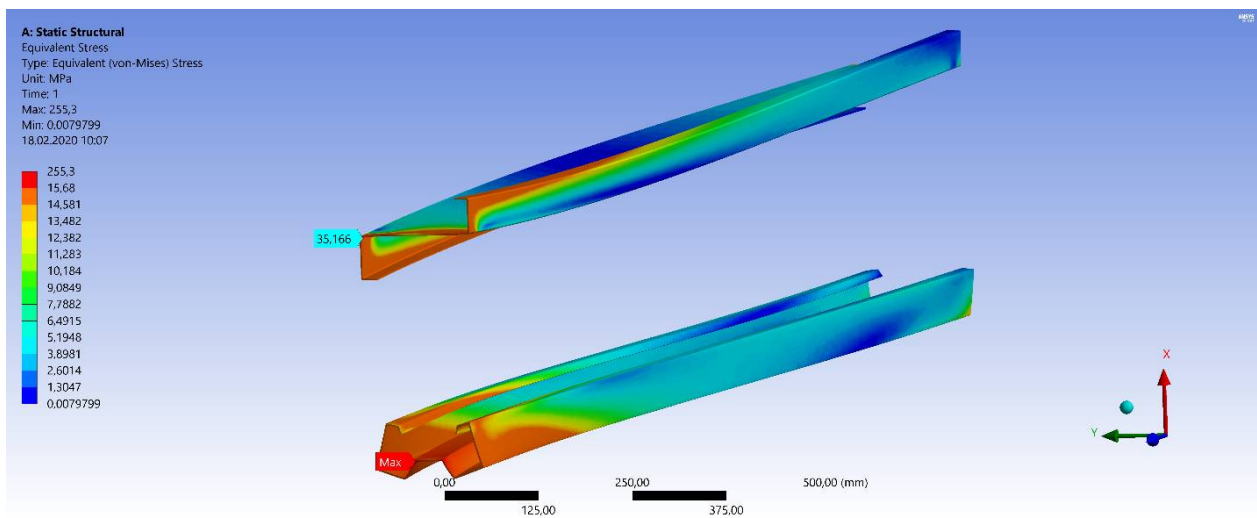


Рис. 10. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 4 и № 5

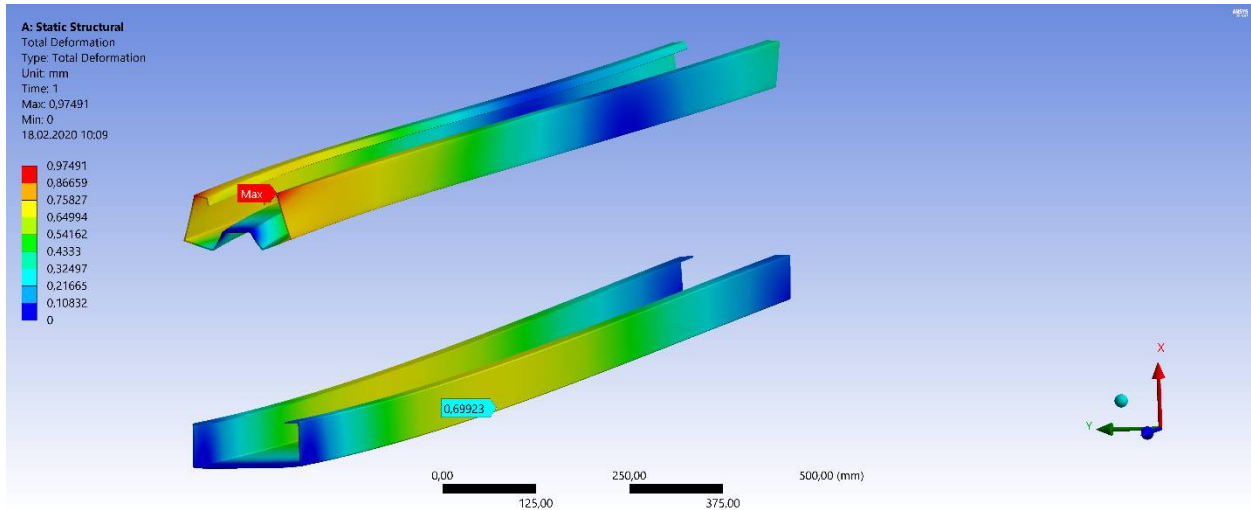


Рис. 11. Деформации профилей № 6 и № 5

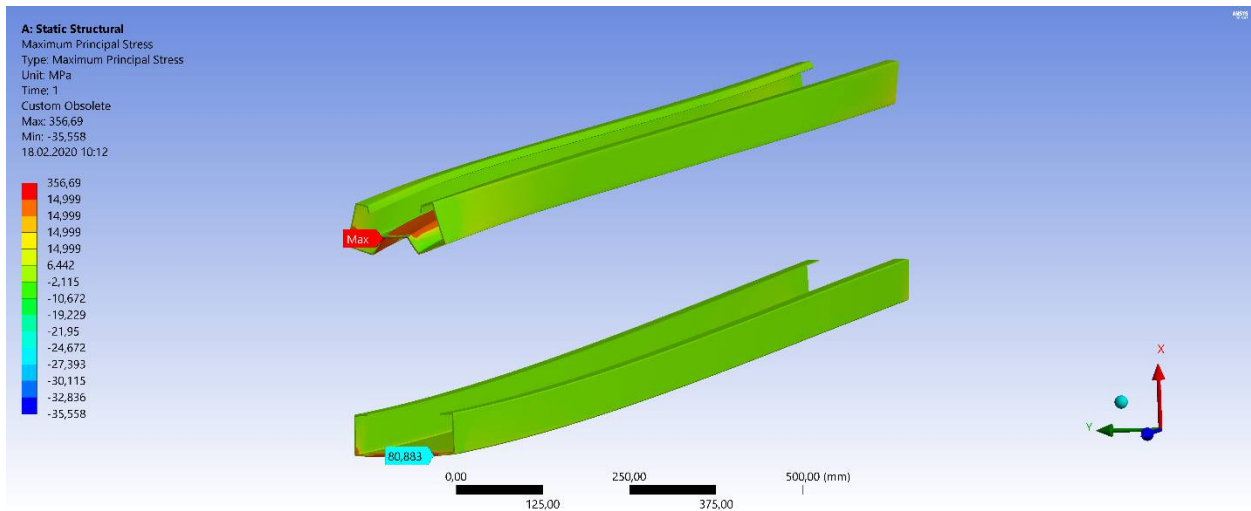


Рис. 12. Максимальные напряжения профилей № 6 и № 5

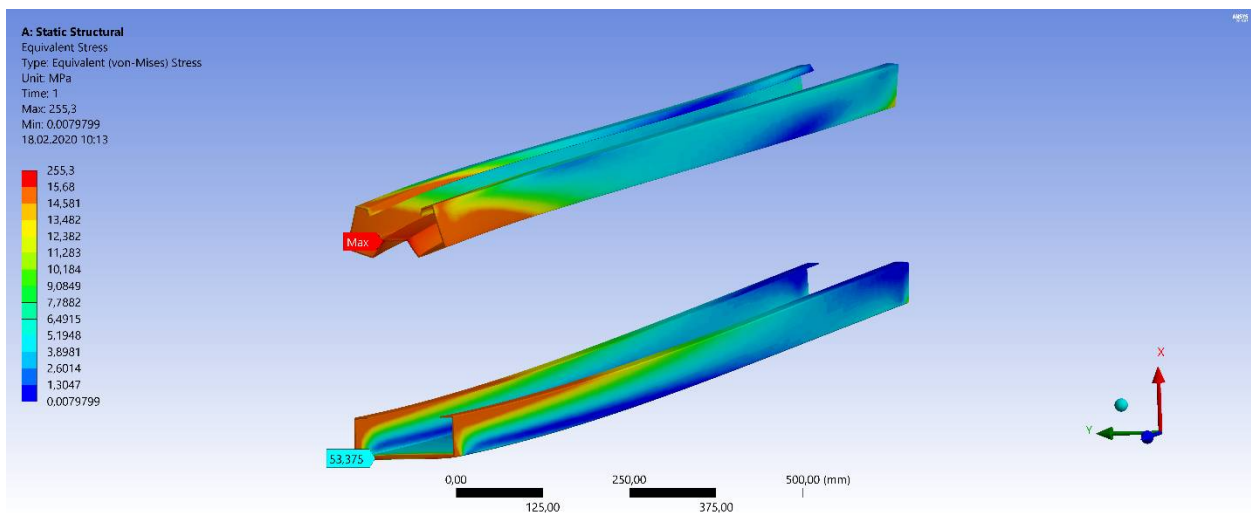


Рис. 13. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 6 и № 5

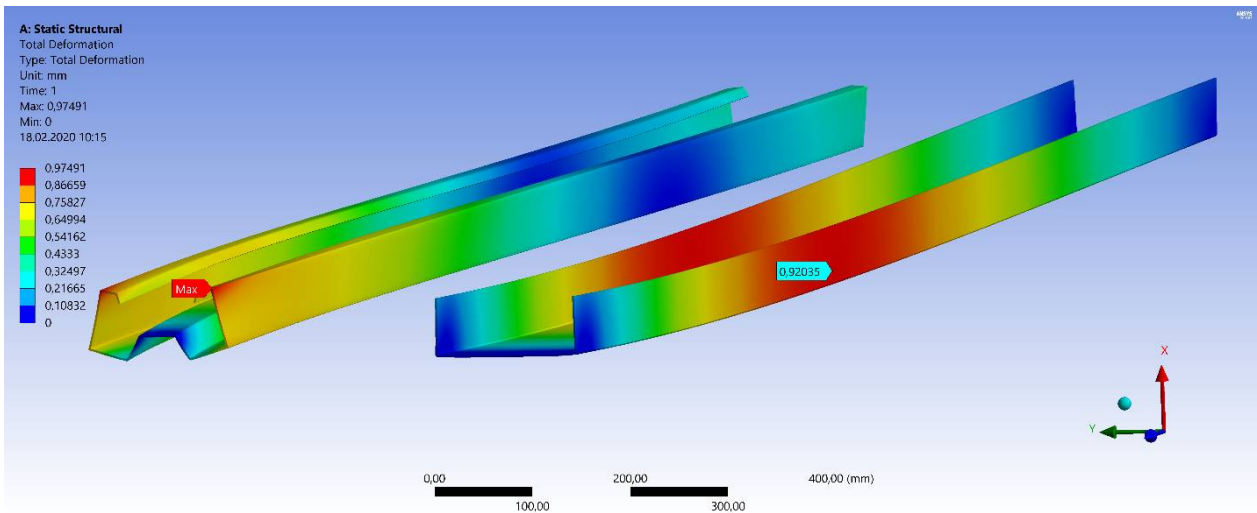


Рис. 14. Деформации профилей № 2 и № 5

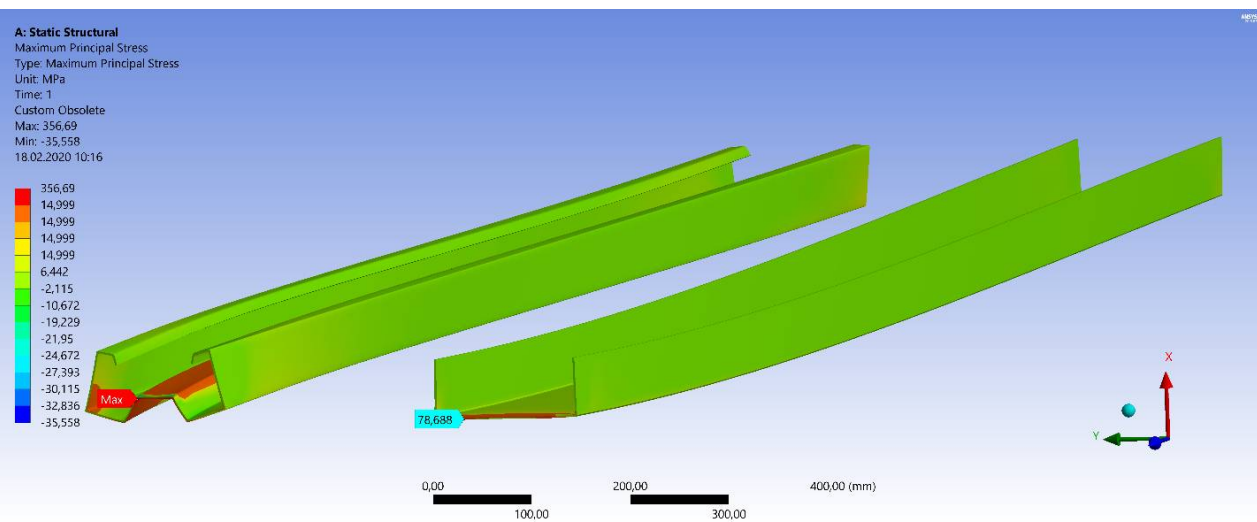


Рис. 15. Максимальные напряжения профилей № 2 и № 5

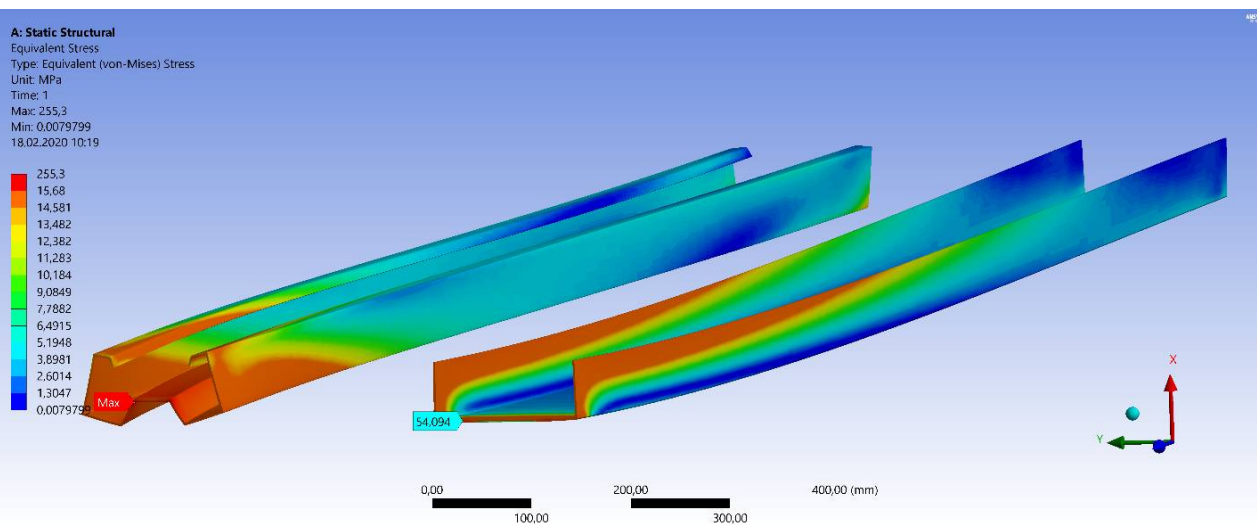


Рис. 16. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 2 и № 5

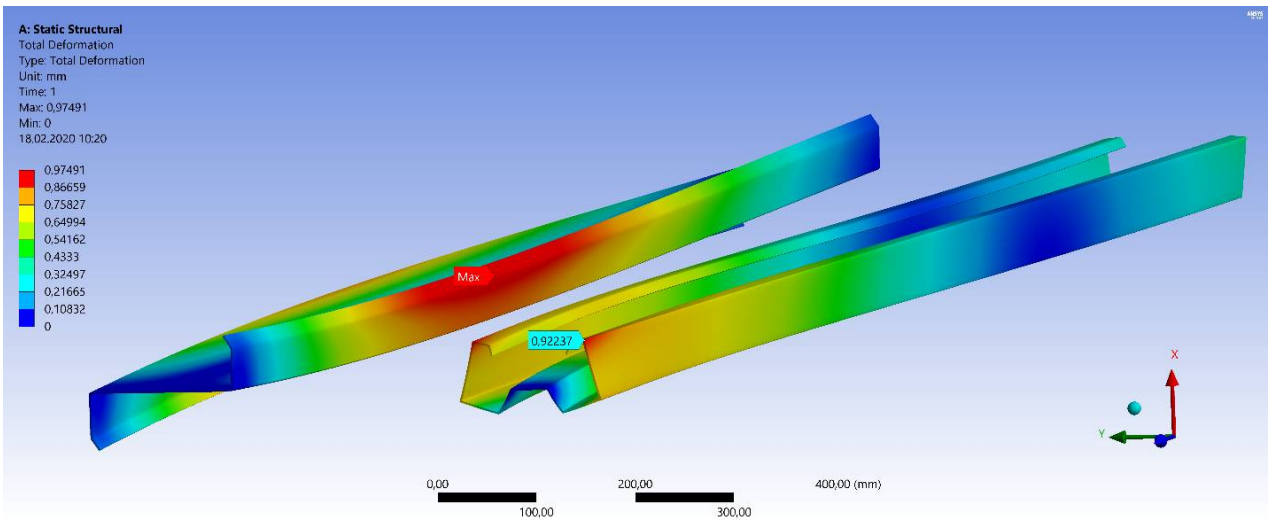


Рис. 17. Деформации профилей № 7 и № 5

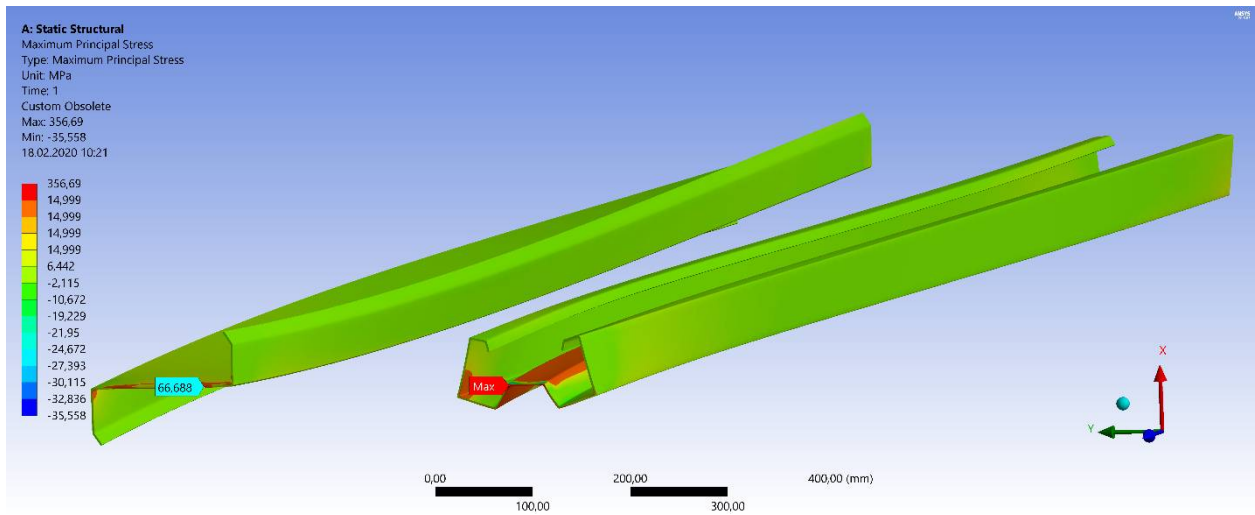


Рис. 18. Максимальные напряжения профилей № 7 и № 5

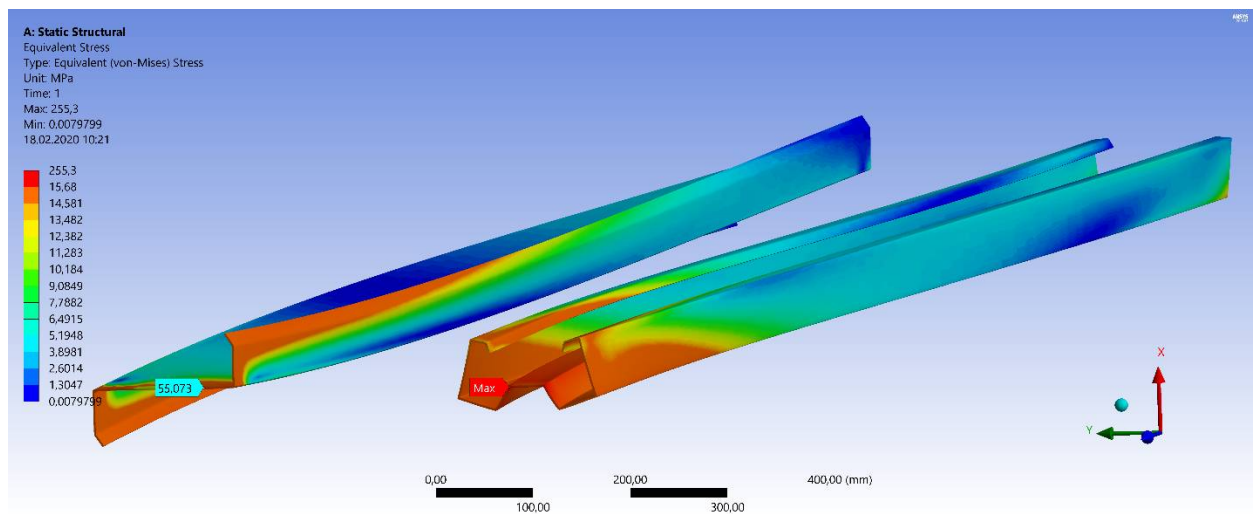


Рис. 19. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 7 и № 5

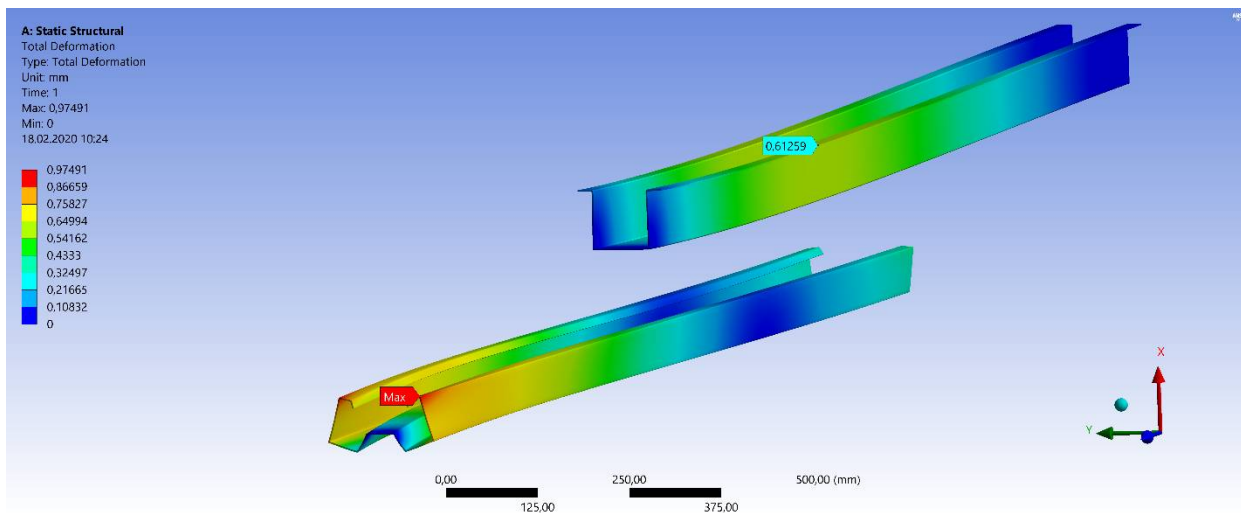


Рис. 20. Деформации профилей № 1 и № 5

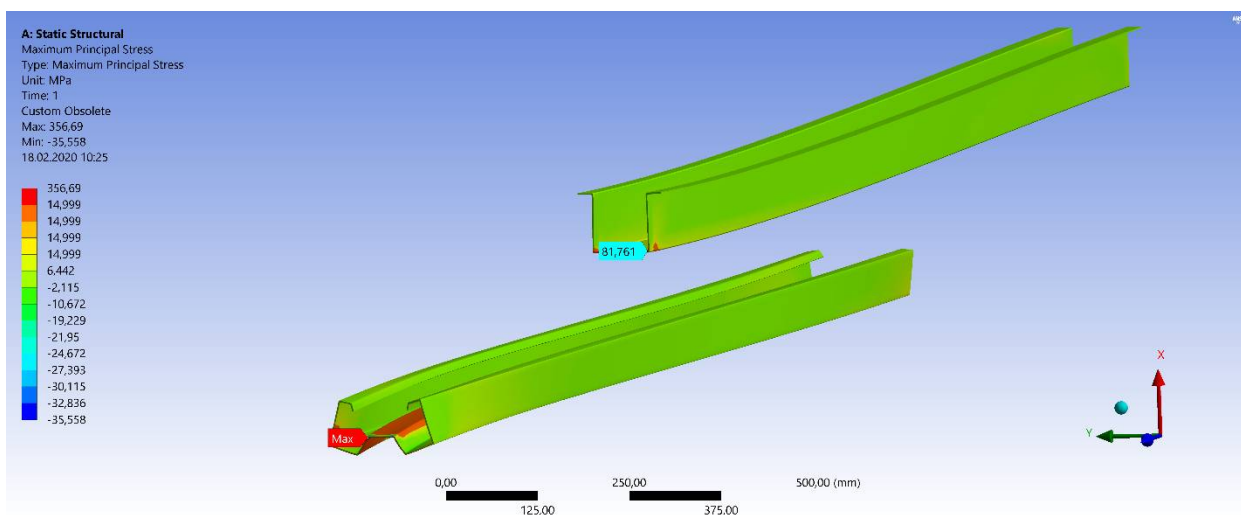


Рис. 21. Максимальные напряжения профилей № 1 и № 5

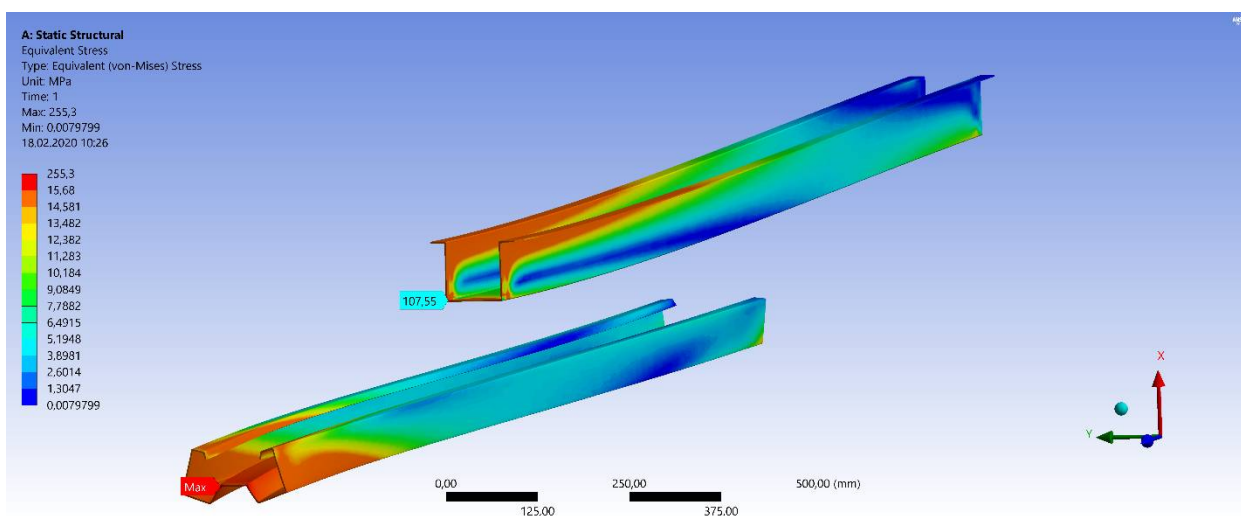


Рис. 22. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 1 и № 5

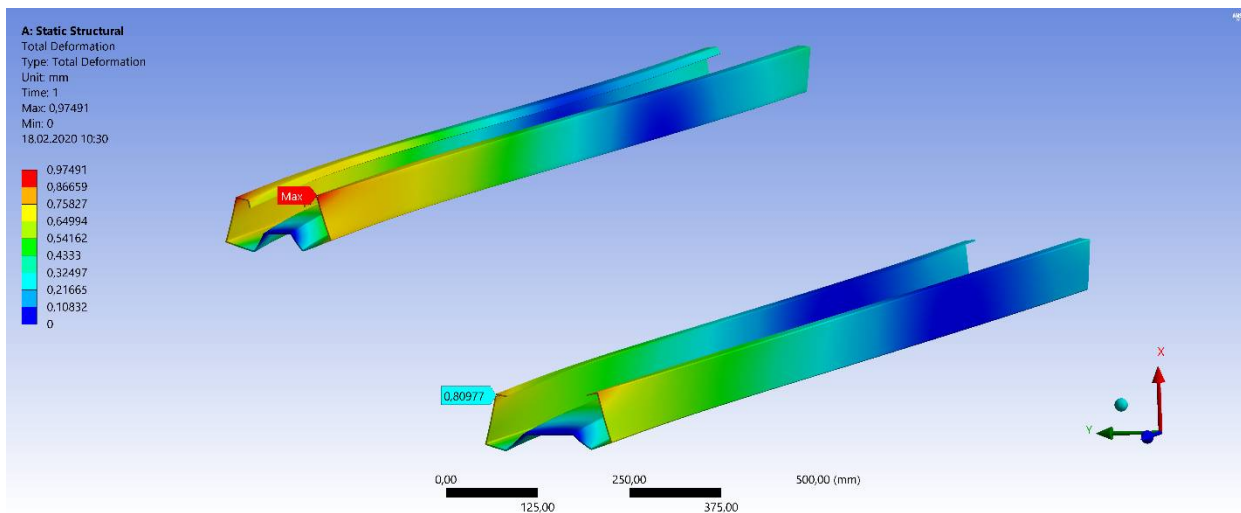


Рис. 23. Деформации профилей № 3 и № 5

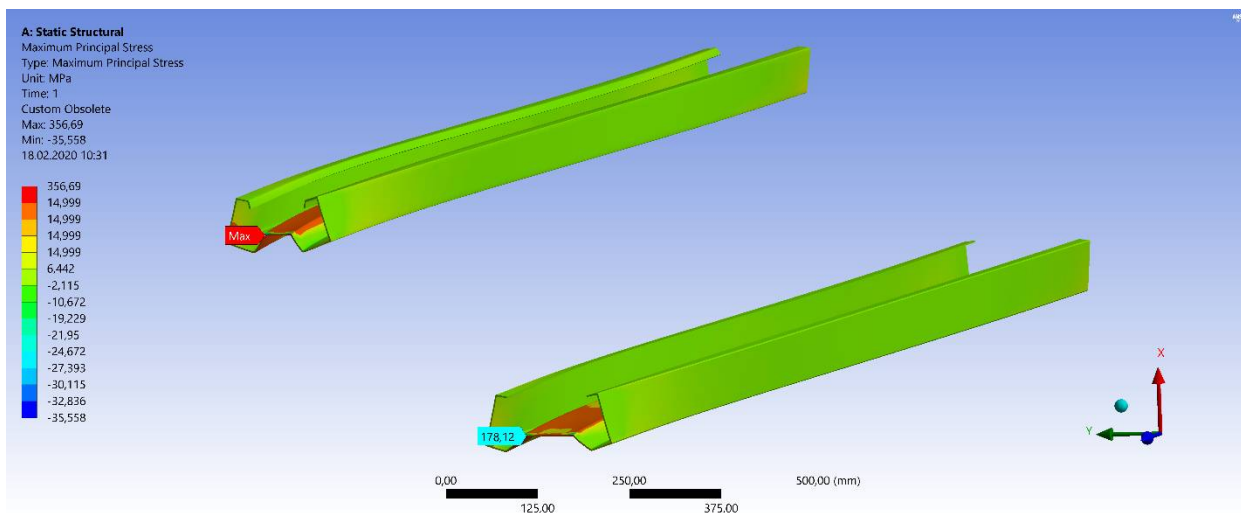


Рис. 24. Максимальные напряжения профилей № 3 и № 5

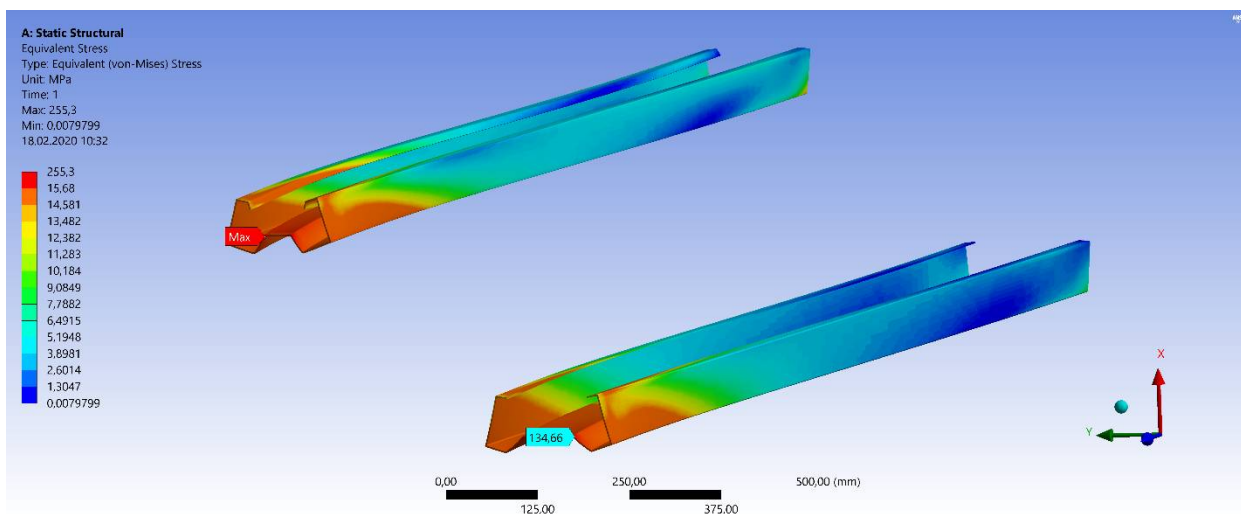
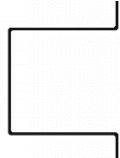

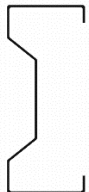


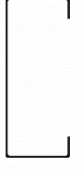



Рис. 25. Эквивалентные напряжения по Мизесу профилей № 3 и № 5

Результаты исследования сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№	Сечение профиля	Максимальное напряжение, σ_{\max} , МПа	Эквивалентное напряжение по Мизесу, σ_4 , МПа	Максимальные деформации, мм
1		81.76	107.55	0.62
2		78.69	54.09	0.92
3		178.12	134.66	0.81
4		65.17	35.17	0.88
5		356.69	255.3	0.97
6		80.88	53.38	0.7
7		66.69	55.07	0.97

По результатам сравнительного анализа максимальных, эквивалентных напряжений, а также максимальных деформаций наиболее эффективными являются профили под номерами: 1,2,4,6,7.

Методика определения среднего ветрового давления на профиль. На примере профиля под номером 4 разобрана методика определения среднего ветрового давления, действующего на него при разных направлениях ветрового потока.

Профиль ЛСТК имеет длину 2.5 м и расположен в центре бокса для продувания размером 1x1x4м. (рис. 26).

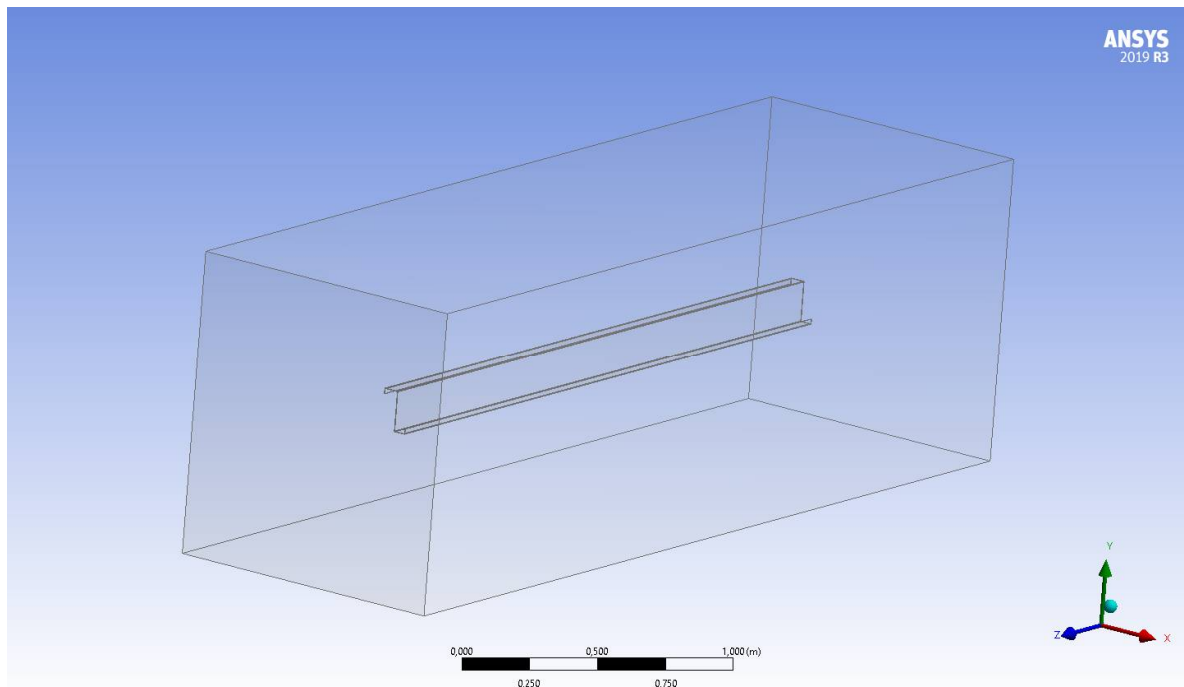


Рис. 26. Моделирование профиля ЛСТК и бокса для продува

Моделирование ветрового потока скоростью 50 м/с произведено в трех различных направлениях относительно сечения профиля: с лицевой грани обдуваемого бокса, с задней и верхней. После проведения расчёта в Ansys Fluid Flow (Fluent) получены значения ветрового давления на профиль в виде 3D-модели (рис. 27-29).

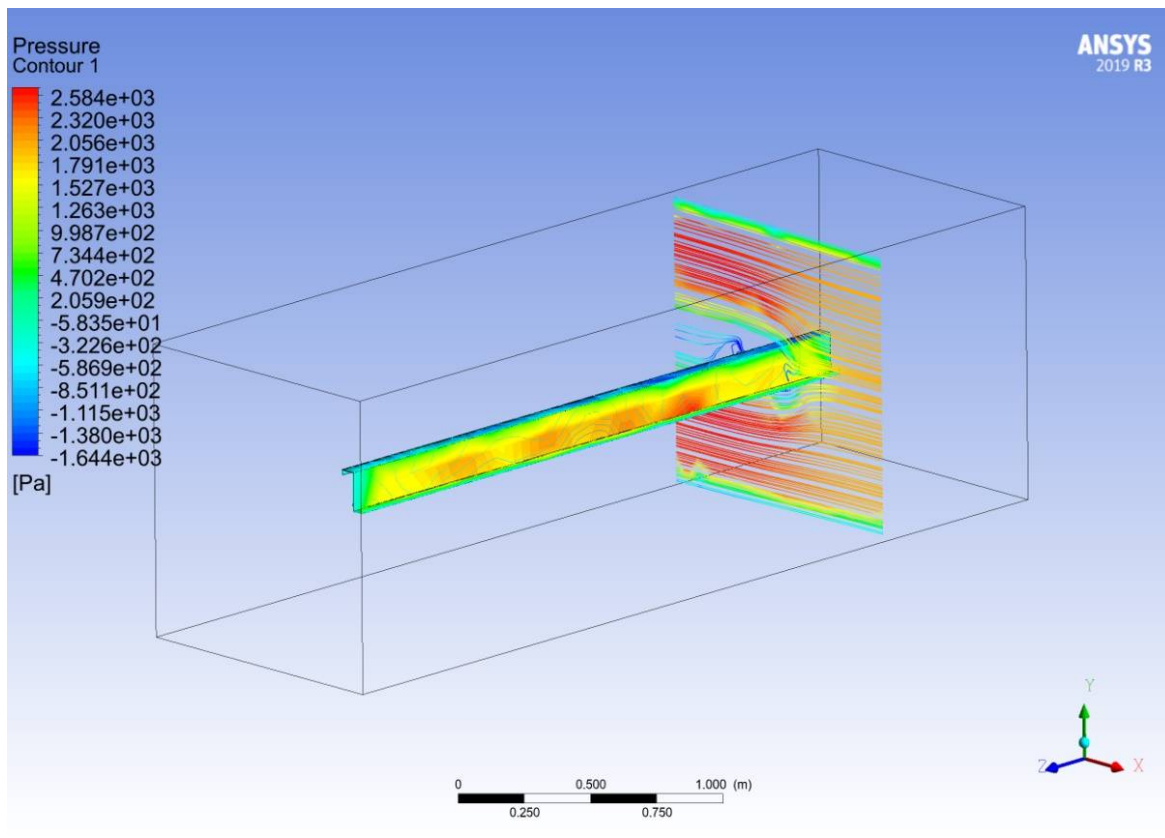


Рис. 27. Ветровое давление на профиль при продуве со стороны лицевой стенки бокса

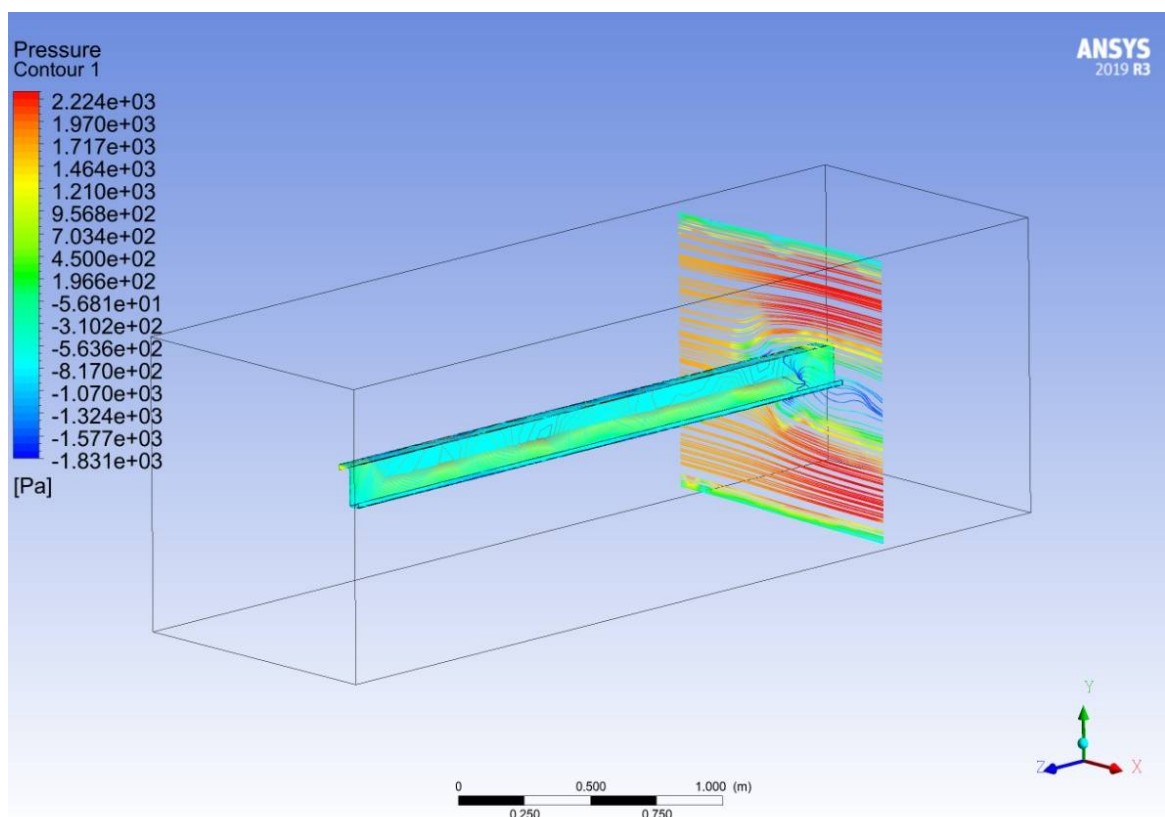


Рис. 28. Ветровое давление на профиль при продуве со стороны задней стенки бокса

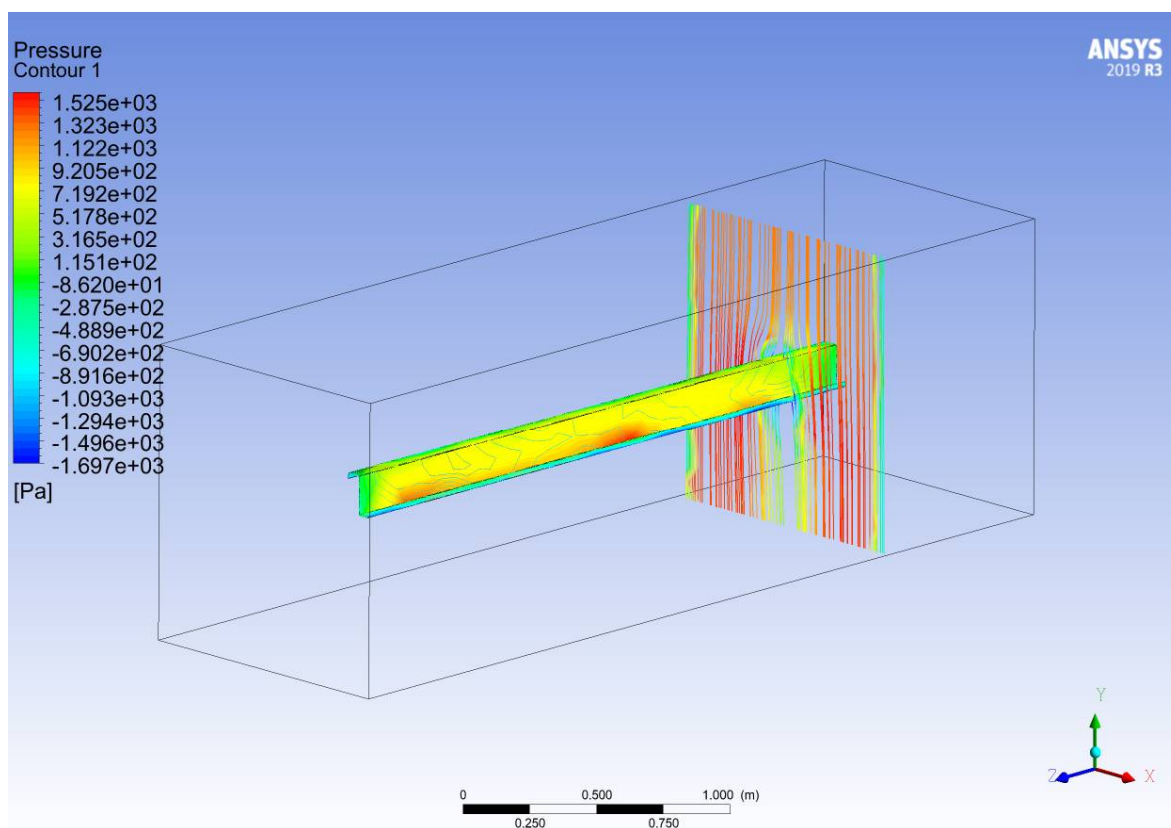


Рис. 29. Ветровое давление на профиль при продуве со стороны верхней стенки бокса

Все полученные в виде 3D-моделей результаты наглядно демонстрируют обтекание ветрового потока вокруг профиля при том или ином направлении. Также можно наблюдать распределение ветрового давления на профиль и зафиксировать разброс его значений в каждом из случаев, однако определить достоверное среднее значение ветрового давления на весь профиль при данном виде анализа не представляется возможным, поэтому был рассмотрен другой вариант визуализации полученных результатов - гистограмма интервалов значений ветрового давления в профиле (рис. 30-33).

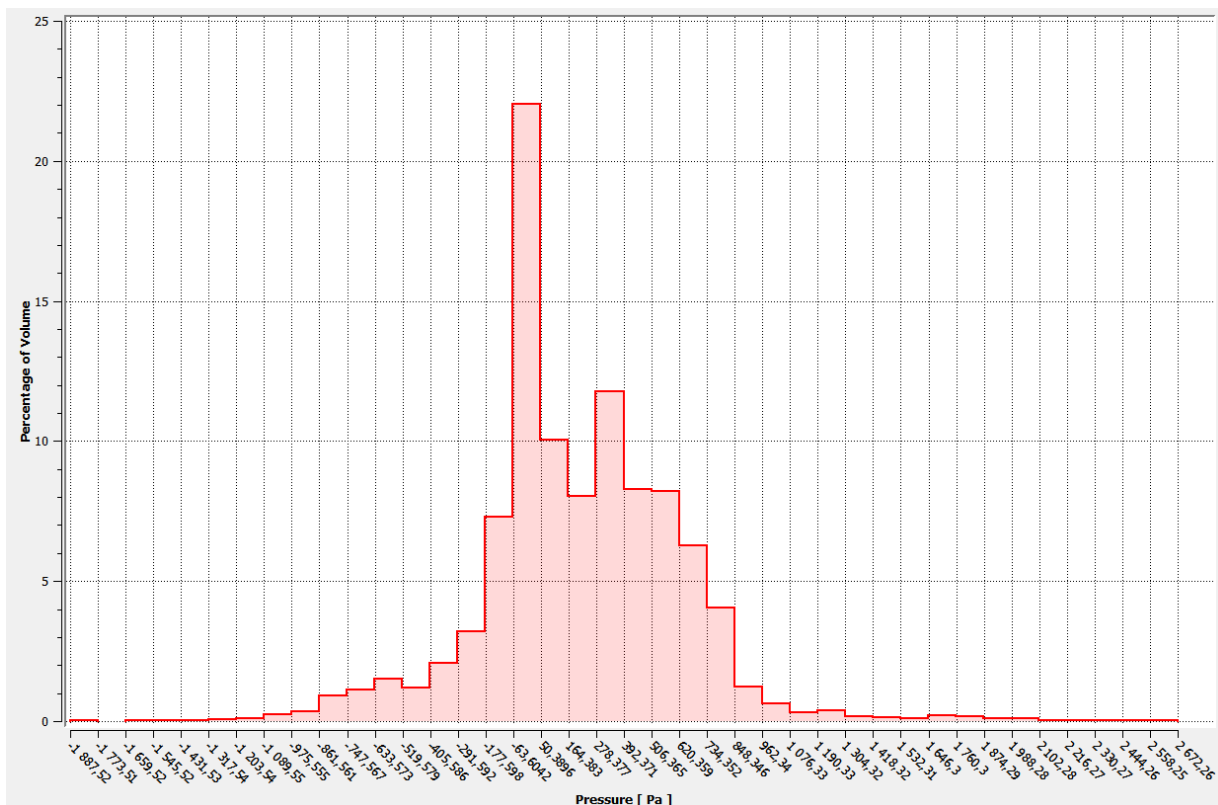


Рис. 30. Гистограмма профиля № 4 при прямом ветровом потоке (со стороны лицевой стенки бокса)

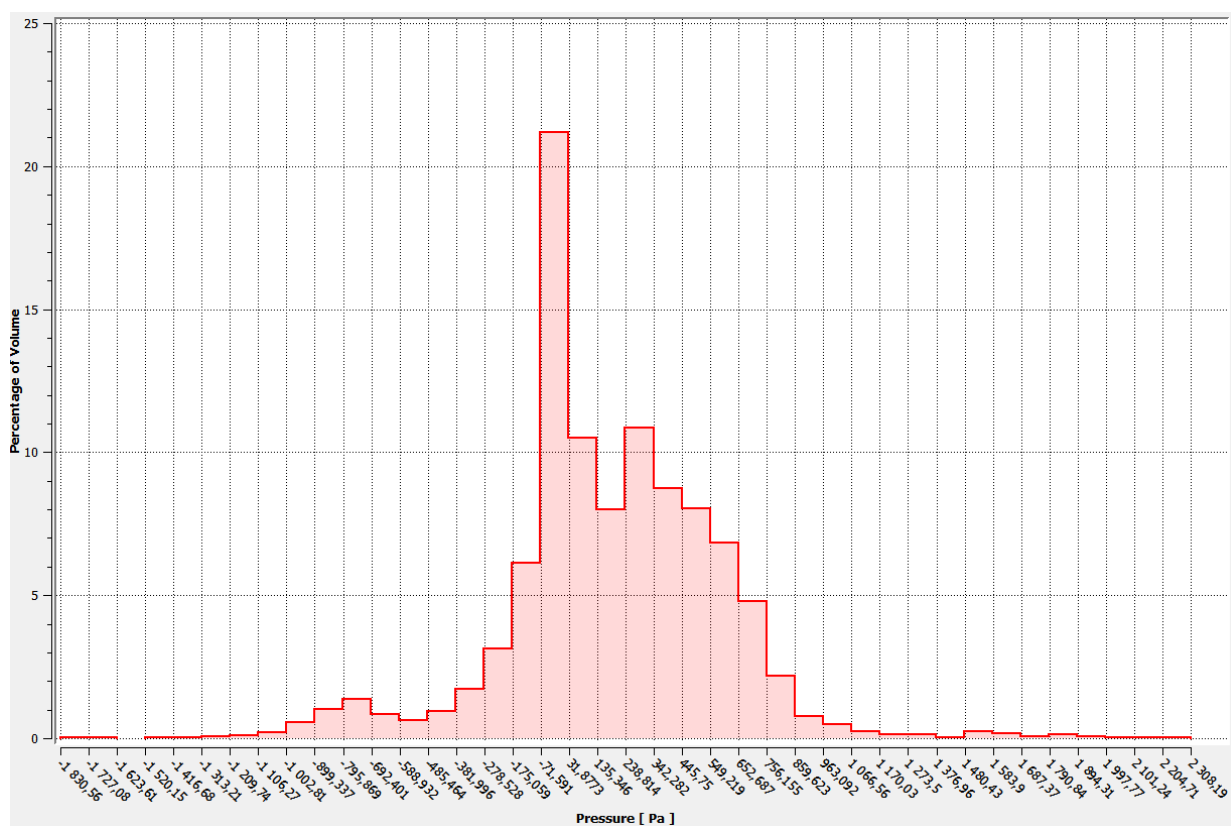


Рис. 31. Гистограмма профиля № 4 при обратном ветровом потоке (со стороны задней стенки бокса)

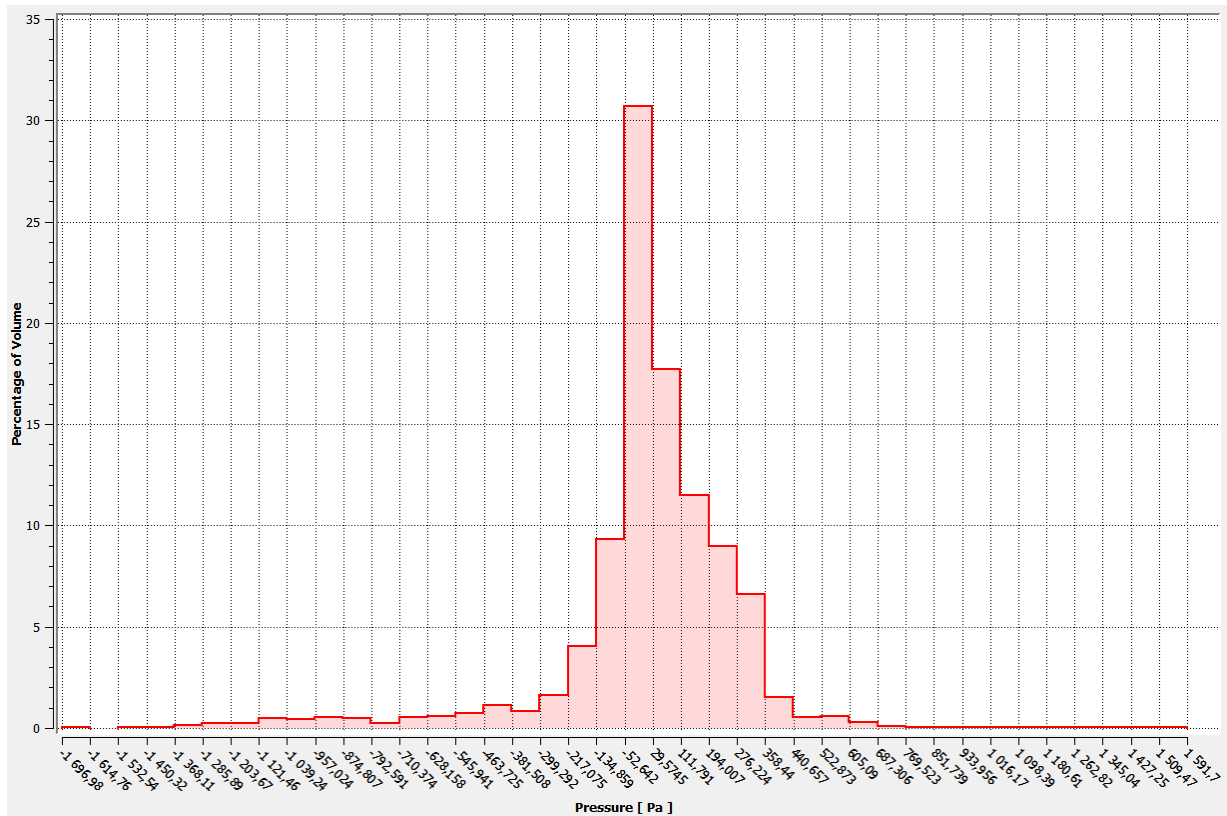
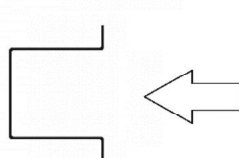
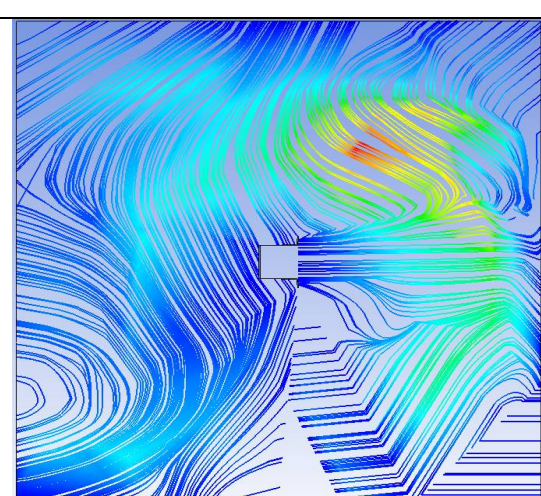
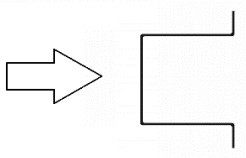
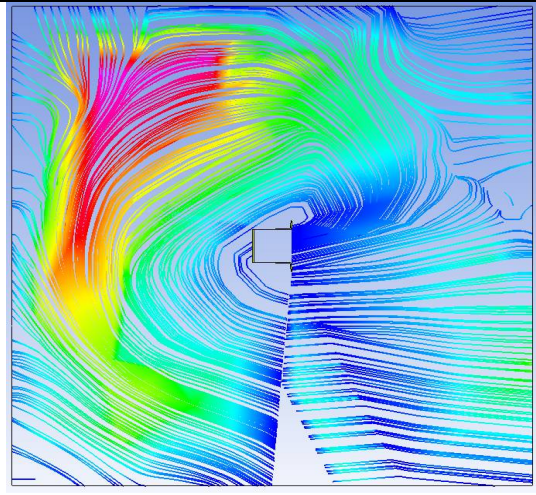
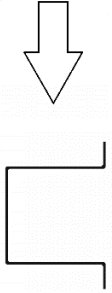
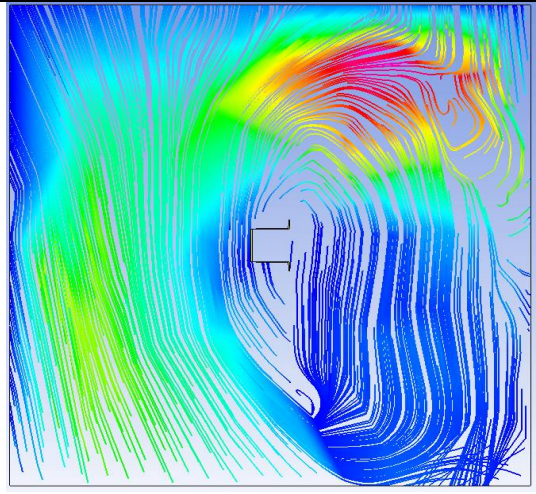
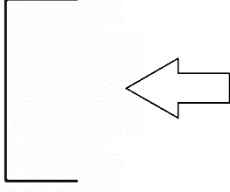
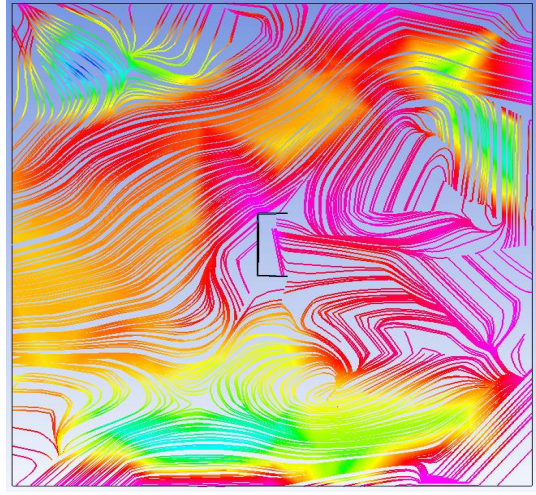


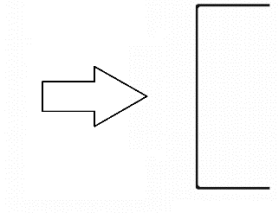
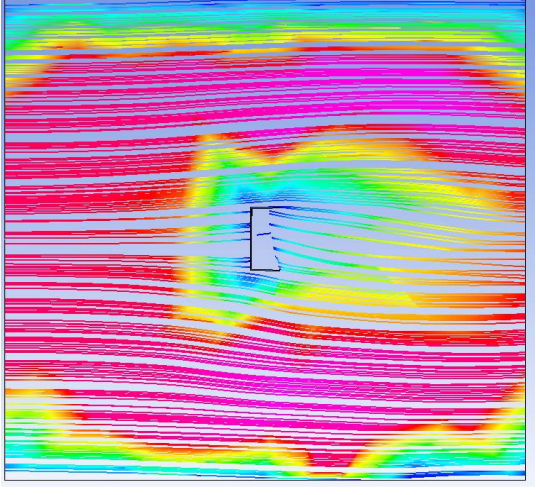
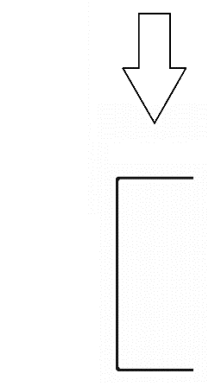
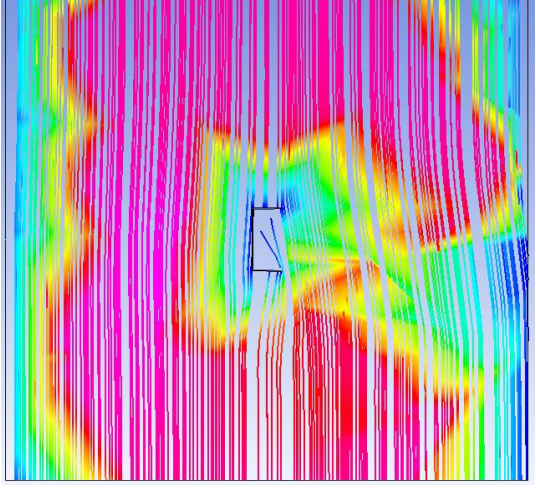
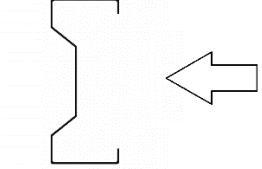
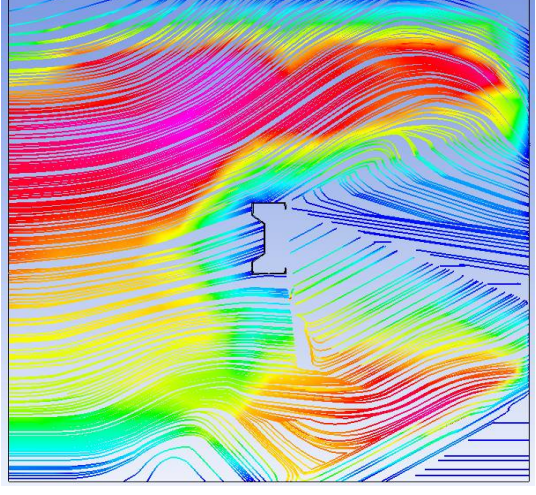
Рис. 32. Гистограмма профиля №4 при боковом ветровом потоке (со стороны верхней стенки бокса)

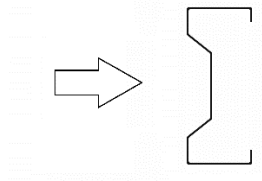
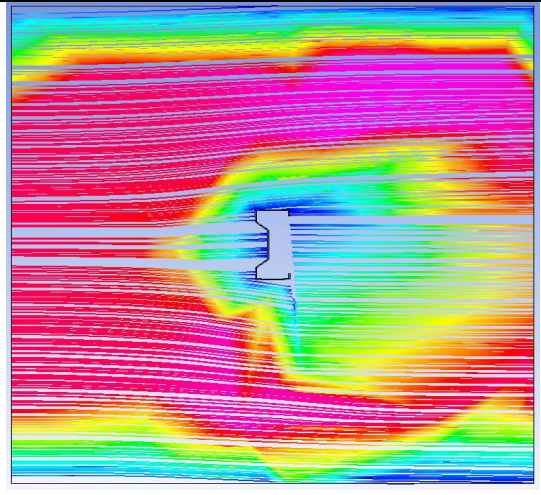
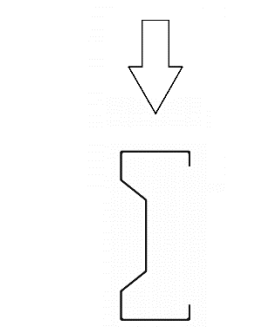
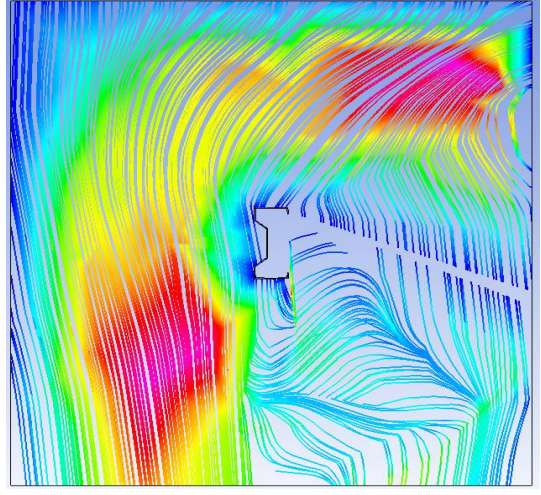
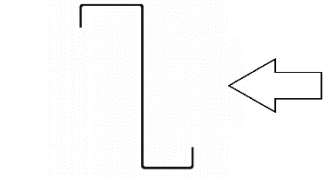
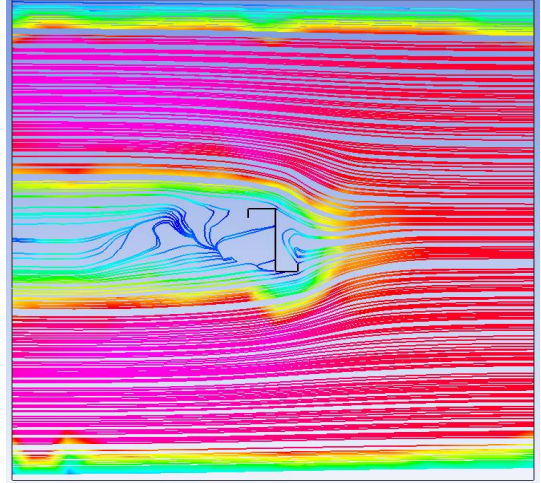
При таком представлении результирующих данных можно найти среднее значение ветрового давления на профиль №4 для каждого из случаев. В итоге получены средние значения ветрового давления для всех профилей при разных направлениях ветра (табл. 2).

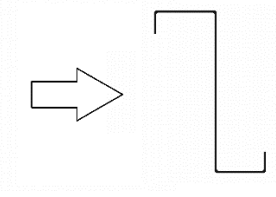
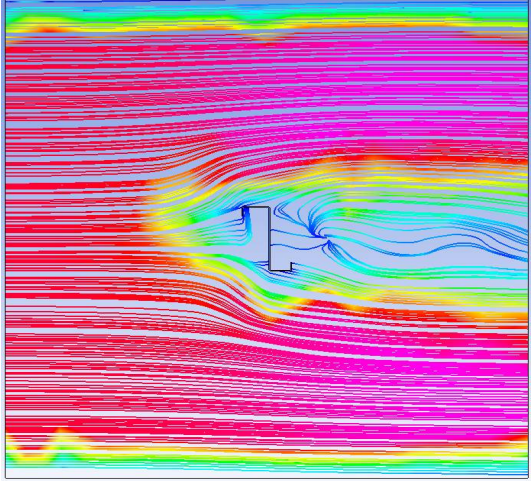
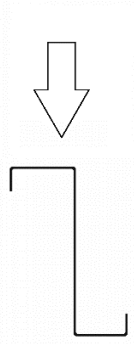
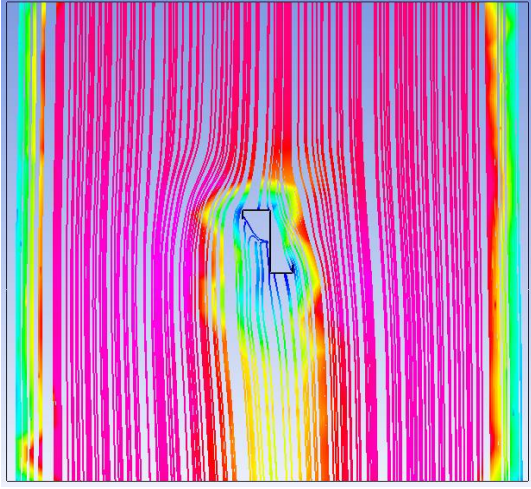
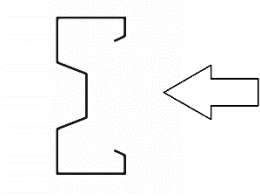
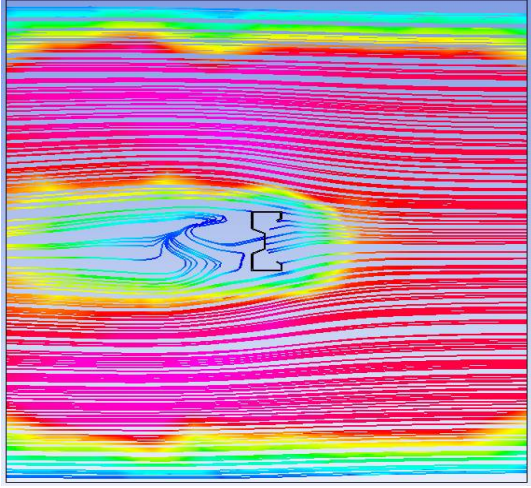
Таблица 2

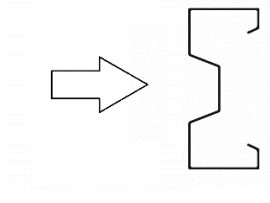
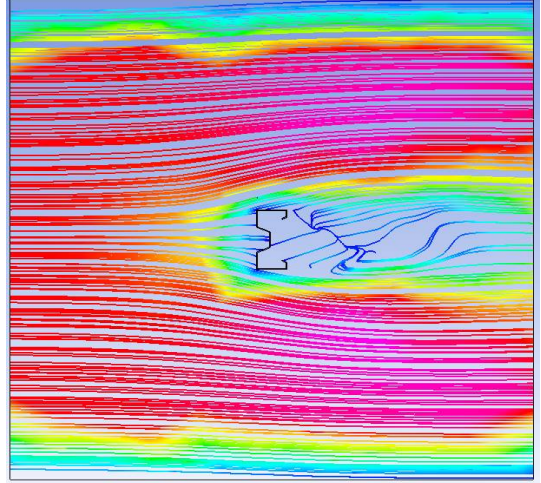
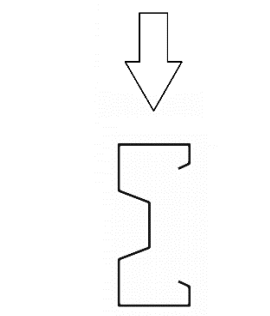
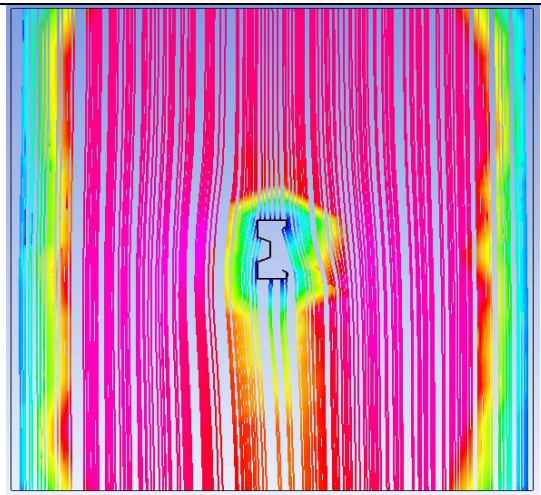
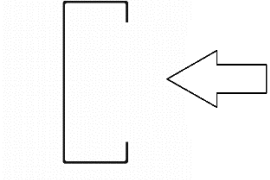
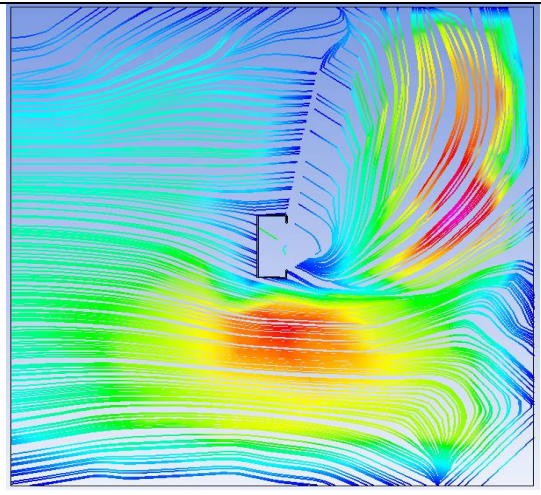
№	Направление ветра относительно сечения профиля	Среднее ветровое давление на профиль, Па	Характер обтекания профиля ветровым потоком
1		-245,177	

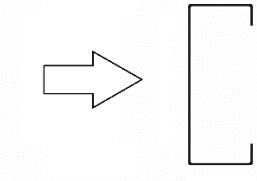
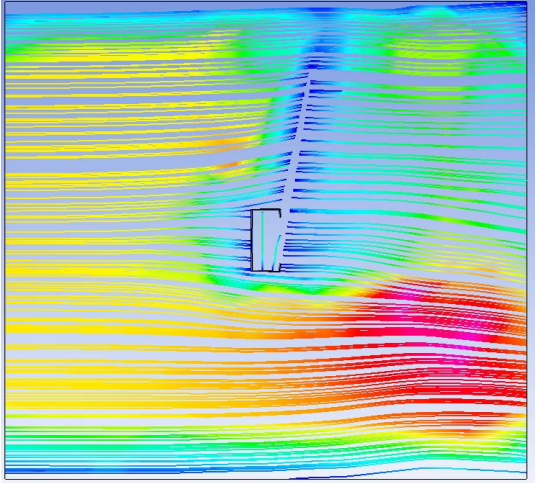

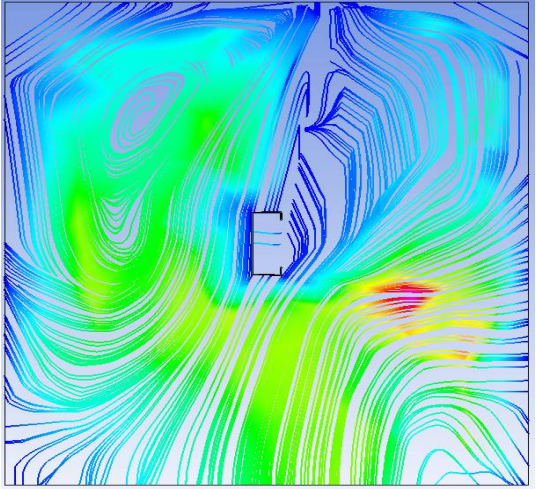
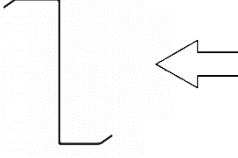
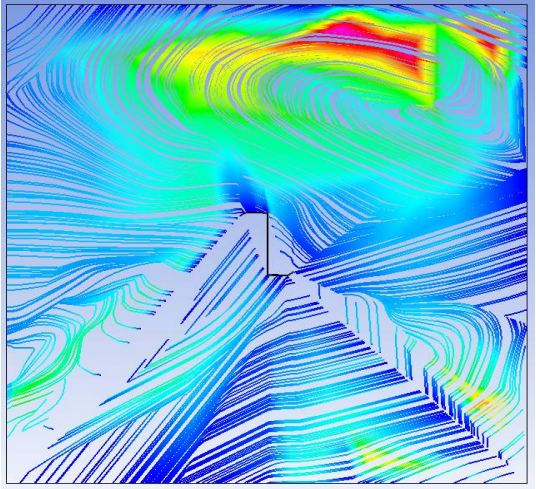
		<p>126,337</p>	
		<p>-88,989</p>	
<p>2</p>		<p>-65,284</p>	

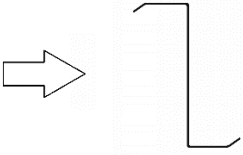
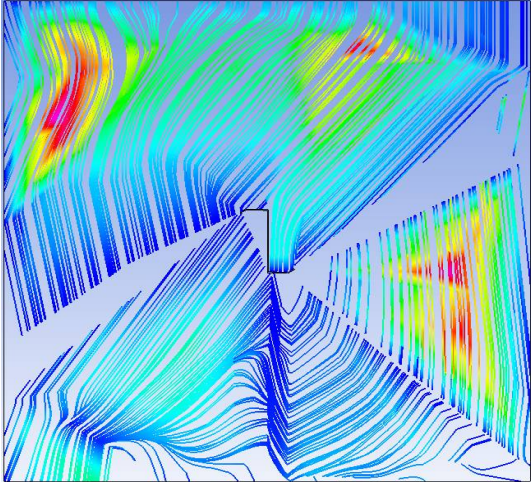

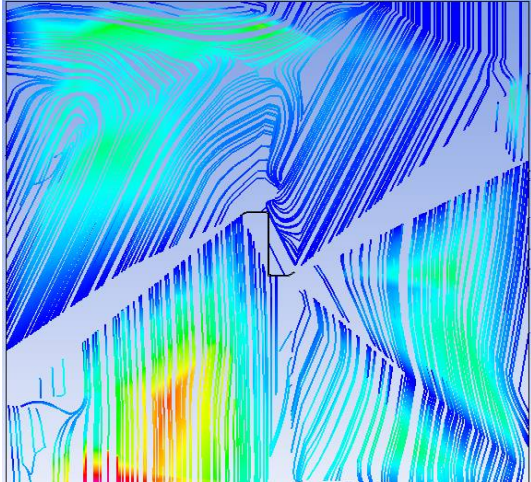
		<p>21,894</p>	
		<p>-18,781</p>	
<p>3</p>		<p>-132,543</p>	

		<p>35,054</p>	
		<p>-24,897</p>	
<p>4</p>		<p>92,385</p>	

		<p>87,509</p>	
		<p>29,643</p>	
<p>5</p>		<p>15,440</p>	

		<p>94,151</p>	
		<p>17,990</p>	
<p>6</p>		<p>-157,521</p>	

		<p>223,691</p>	
		<p>-17,266</p>	
<p>7</p>		<p>-199,312</p>	

		154,331	
		38,285	

По результатам сравнительного анализа среднего ветрового давления Ansys Fluid Flow (Fluent) с учётом характера обтекания профилей ветровым потоком при разных направлениях наиболее эффективными являются профили под номерами 2,3,4,5.

Выводы. В ходе исследования была рассмотрена методика определения среднего ветрового давления при помощи расчётно-вычислительного комплекса Ansys Fluid Flow (Fluent). Учитывая выборку профилей по несущей способности и деформационным свойствам (профили № 1,2,4,6,7) и выборку профилей по среднему ветровому давлению и характеру обтекания профилей ветровым потоком (профили № 2-5) сделан вывод о том, что наиболее эффективными для элементов башенного типа сооружений и восприятия воздействия статических и аэродинамических нагрузок являются профили ЛСТК под номером 2 и 4 (рис. 2, 4).

Библиографический список

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Введ. 2017-06-04. – М.: Стандартинформ, 2019. – С. 14-20.

2. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчётные методы сооружений и возможность их анализа. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев: Сталь, 2002. – С. 8-11.
3. Советников Д.О., Виденков Н.В., Трубина Д.А. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве. – СПб.: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. – С. 154-160.
4. Айрапетов А.Б., Вышинский В.В., Катунин А.В. Расчётные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Труды МФТИ. – М., 2017. – С. 5.

References

1. Set of Rules 20.13330.2016. Loads and Impacts. Introduction. 2017-06-04. М.: Standartinform, 2019. Pp. 14-20.
2. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Calculation methods of structures and the possibility of their analysis. 2nd ed., Kiev: Steel, 2002. Pp. 8-11.
3. Counselors D.O., Videnkov N.V., Trubina D.A. Lightweight steel thin-walled structures in multi-storey construction. SPb.: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015. Pp. 154-160.
4. Airapetov A.B., Vyshinsky V.V., Katunin A.V. Calculated and experimental studies of atmospheric wind flow around high-rise buildings and structures in urban development conditions. MIPT Proceedings. М., 2017. P. 5.

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF LIGHT STEEL THIN-WALLED STRUCTURES IN TOWER STRUCTURES

S. V. Efrushin¹, A. R. Efanov²

Voronezh State Technical University^{1,2}
Russia, Voronezh

¹PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(910)3415266, e-mail: ooo.stroynauka@mail.ru

²Graduate Student of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(903)6555500, e-mail: misterefanov@gmail.com

Problem statement. To investigate seven actually manufactured profiles of light steel thin-walled structures (LSTS) for the effect of static and aerodynamic loads in order to find the most effective structures for tower-type elements.

Results. The selection of actually manufactured LSTS profiles has been carried out. A comparative analysis of these profiles for bearing capacity and deformation properties was carried out using the Ansys Workbench software package. A technique for modeling and determining the average wind pressure on a profile using the Ansys Fluid Flow (Fluent) computational complex is described. A comparative analysis of the LSTS profiles by the average wind pressure and the nature of the wind flow around the airfoils is carried out. A conclusion is made about the most effective LSTS profiles for tower-type elements of structures.

Conclusions. In this study, a method for determining the average wind pressure using the Ansys Fluid Flow (Fluent) computational complex was considered. Taking into account the sample of profiles for the bearing capacity and deformation properties (profiles No. 1,2,4,6,7) and the sample of profiles for the average wind pressure and the nature of the wind flow around the profiles (profiles No. 2-5), it was concluded that the most LSTS profiles numbered 2 and 4 (Fig. 2.4) are effective for tower-type elements of structures and for the perception of the effect of static and aerodynamic loads.

Keywords: lattice tower, LSTS profile, modeling of flow around structure elements, wind press

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.36622/VSTU.2021.30.3.004

УДК 624.26

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ РАЗРЕЗНОГО ДЕРЕВЯННОГО АВТОДОРОЖНОГО МОСТА

В. С. Сафронов¹, Г. Е. Габриелян², Д. А. Киселев³, А. В. Антипов⁴

Воронежский государственный технический университет^{1,2,3}
Россия, г. Воронеж

Дортранспроект⁴
Россия, г. Воронеж

¹Д-р техн. наук, профессор кафедры строительной механики, тел.: +7 (473) 2715230, e-mail: vss22@mail.ru

²Канд. техн. наук, доцент кафедры строительной механики, тел.: +7(910)3469885, e-mail: grayr2010@rambler.ru,

³Студент кафедры строительной механики, тел.: + 7(980)5469722; e-mail: kiselev01021999@mail.ru

⁴Ведущий инженер, тел.: +7(910)7329044; e-mail:dron_a77@mail.ru

Описываются методика, алгоритм и программа определения параметров надежности длительно эксплуатируемого неразрезного деревянного автодорожного моста с учетом выявленных при обследовании дефектов и повреждений и разброса прочностных характеристик материалов, действующих нагрузок, размеров конструкции.

Приводятся результаты численных исследований зависимостей логарифмических показателей надежности несущих прогонов в среднем сечении многоэлементных пролетных строений от совместного действия постоянных и временных нагрузок.

Ключевые слова: деревянный автодорожный мост, разрезное многоэлементное пролетное строение, длительная эксплуатация, дефекты и повреждения, параметры надежности, графики зависимости логарифмического показателя по несущим прогонам пролетного строения в средних сечениях.

Введение

В Российской Федерации на федеральных и региональных автомобильных дорогах эксплуатируются многочисленные деревянные мостовые сооружения весьма разнообразных конструктивных форм [1-2]. Особенно много таких сооружений построено в северных регионах нашей страны. Стремительное развитие лесной и деревообрабатывающей промышленности в последние годы является основой для увеличения строительства обладающих экономичностью и простотой изготовления весьма легких для транспортирования несущих деревянных мостовых конструкций [3-4].

Указанные перспективные тенденции сдерживаются недостаточностью современных научных исследований по теории деревянных мостов, современных подходов при проектировании, строительстве и длительной эксплуатации транспортных сооружений, которые необходимы для выполнения расчетов конструкций из подвергающихся интенсивным атмосферным воздействиям.

Для устранения недостатка, вызванного отсутствием выполняемых научных исследований, в 2016 году введен новый нормативный документ ОДМ 218.4.029-2016 [2], содержащий новые рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых деревянных мостовых сооружений на автомобильных дорогах. В настоящей статье предлагается и апробируется методика вероятностной [6-7] оценки надежности деревянных мостов с дефектами и повреждениями. Отметим, что вероятностный подход к деревянным мостам используется впервые, хотя для сооружений из железобетона и металла подробно разработан [9-17].

1. Описание объекта исследования

Объектом исследования в настоящей статье является длительно эксплуатируемый деревянный разрезной 4-пролетный автодорожный мост по схеме: 4,0+5,1+5,0+5,1 м (рис. 1). Проектные временные нагрузки для этого моста неизвестны.



Рис. 1. Общий вид деревянного автодорожного моста

Габарит проезжей части на мосту составляет Г-6,15 м. Ширина моста в свету между перилами В=13,17 м. Пролёты сооружения перекрыты деревянными прогонами круглого сечения, Ø 0,3 м. Пролетные строения моста опираются на деревянные крайние и промежуточные опор свайного типа, состоящих из 6-ти стоек диаметром 0,3м, с шагом 1,42+1,5+0,8+1,5х2 м, которые объединены деревянным прогоном (рис. 2). Конструкция проезжей части состоит из сплошного слоя поперечных брёвен диаметром 15 см, поверх которых смонтирован одиночный настил из досок толщиной 50 мм, уложенных вдоль моста. Ограждение безопасности на мосту парпетное из деревянного бруса, сечением 0,40х0,20 м. Тротуары – деревянные шириной: слева - 0,75 м, справа - 0,65 м.



Рис. 2. Конструкция пролетных строений и опор моста

2. Определение грузоподъемности моста

При расчете грузоподъемности транспортного сооружения использовалась нормативная методика, рекомендуемая ОДМ 218.4.025-2016 [1] по несущей способности наиболее слабого конструктивного элемента.

Грузоподъемность как характеристика мостового сооружения определяется максимальной полезной нагрузкой, которую может воспринять сооружение при расчётах по первому предельному состоянию. По данным обследования при анализе их результатов установлено, что наиболее нагруженным и имеющим максимальное количество значимых дефектов является пролетное строение в 3-м пролете, выполненное из бревенчатых продольных прогонов.

Основным показателем грузоподъемности мостового сооружения является класс нагрузки [1]. Грузоподъемность устанавливается по классу нагрузки для неконтролируемого и контролируемого режимов движения транспортных средств, а также по общей массе эталонных транспортных средств для неконтролируемого движения.

В расчетах использовались две расчетные схемы. В первой - нагрузка от собственного веса прогонов прикладывалась в плоской расчетной схеме. Во второй расчетной схеме, представляющей собой пространственную конечно-элементную модель, нагрузка от веса конструкции проезжей части задавалась как поверхностная равномерно распределенная по площади мостового полотна и приводилась на стержневые элементы сплошного слоя поперечин. Нагрузка от веса элементов ограждения проезжей части учитывалась в виде линейной равномерно распределенной полосы и приводилась к узлам стержневых элементов, соответствующих расположению составляющих ограждения.

Расчетная пространственная конечно-элементная модель деревянного пролетного строения представляет собой систему перекрестных стержней (рис. 3), в которой продольные стержни моделируют продольные прогоны, а поперечные стержни - сплошной слой поперечин, связывают их между собой в единую пространственную конструкцию и упруго распределяют внешние силы между ними.

Расчеты выполнялись с использованием сертифицированного вычислительного комплекса «ЛИРА-ПРО» [8]. В соответствии с СП 35.13330.2011 временные нагрузки от подвижного состава принимались в виде:

- от автотранспортных средств АК - в виде сплошных полос;
- от тяжелых одиночных нагрузок НК – в виде четырехосной тележки;
- от колонны эталонных грузовиков ЭН₃ – в виде системы вертикальных сил.

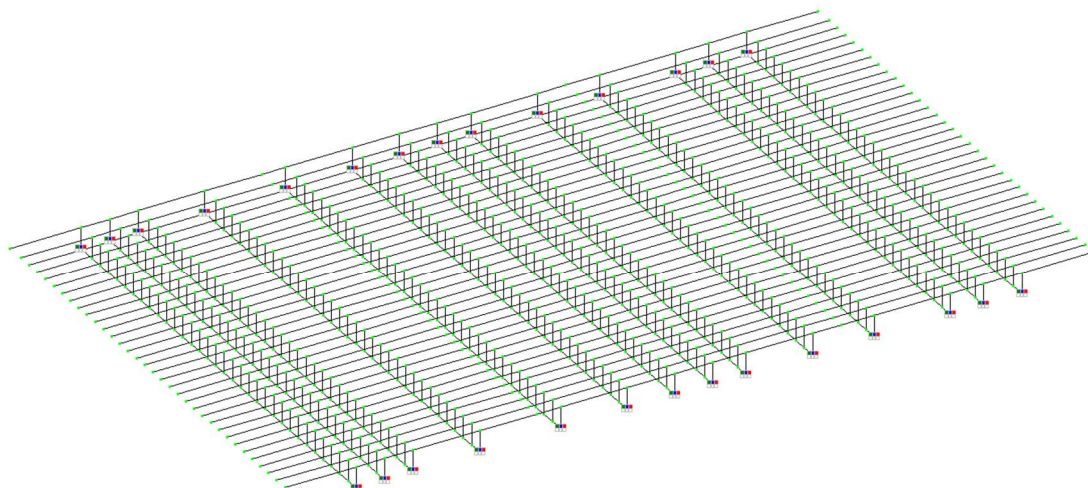


Рис. 3. Пространственная конечно-элементная расчетная модель пролетного строения

Расчет максимальных изгибающих моментов в отдельных несущих прогонах пролетного строения от постоянных и временных нагрузок выполнялся по объемлющим эпюрам усилий, возникающих в отдельных прогонах. В расчетах рассматриваются наиболее опасные нагружения пролетного строения вдоль и поперек моста в пределах проезжей части. Расположение временных нормативных нагрузок АК, НК и ЭН₃ представлено, соответственно, на рис. 4, 5 и 6. Весовые параметры автомобилей в численных расчётах принимались равными: для нагрузок АК и НК – $K=11$, для эталонной колонны грузовиков ЭН₃ – $K=30$. Модуль упругости древесины несущих прогонов в соответствии с ОДМ 218.4.029-2016[2] принимался равным $E = 10,0$ ГПа.

По найденным усилиям для каждого из прогонов из условия прочности прогона получены классы грузоподъемности. В этих расчетах диаметры всех прогонов приняты равными 30 см, а расчетное сопротивление $R = 14,5$ МПа. Выявленные при обследовании отклонения фактических размеров несущих элементов от среднего диаметра прогона, включая уменьшения диаметров от гниения древесины, не учитывались.

Результаты выполненных расчетов представлены в табл. 1. Из анализа полученных данных сделаны следующие выводы:

- деревянные несущие прогоны пролетных строений моста, расположенные на эксплуатируемом мосту на разном расстоянии по ширине, даже при детерминированной постановке обладают различными параметрами несущей способности;
- при отсутствии фактических отклонений диаметров прогонов от принятого в расчетах размера наименьшей несущей способностью обладает прогон П4;
- более обоснованная оценка грузоподъёмности моста, учитывающая имеющий место в действительности разброс диаметров прогонов и случайных изменений прочностных характеристик древесины при длительной эксплуатации, рассмотрена с помощью описанной ниже в разделе 4 настоящей статьи вероятностной методики [7-8].

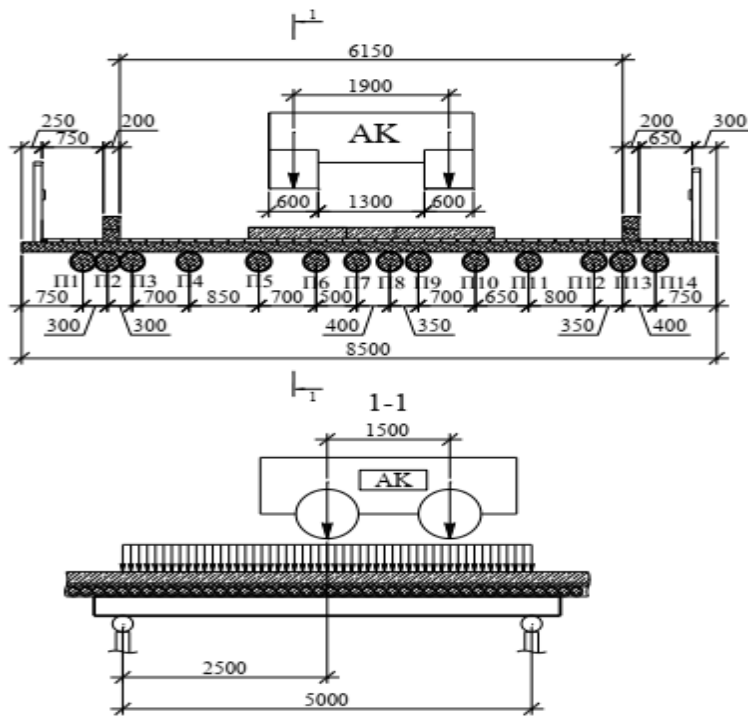


Рис. 4. Расчетная схема расположения на проезжей части моста временной нагрузки АК от автотранспортных средств

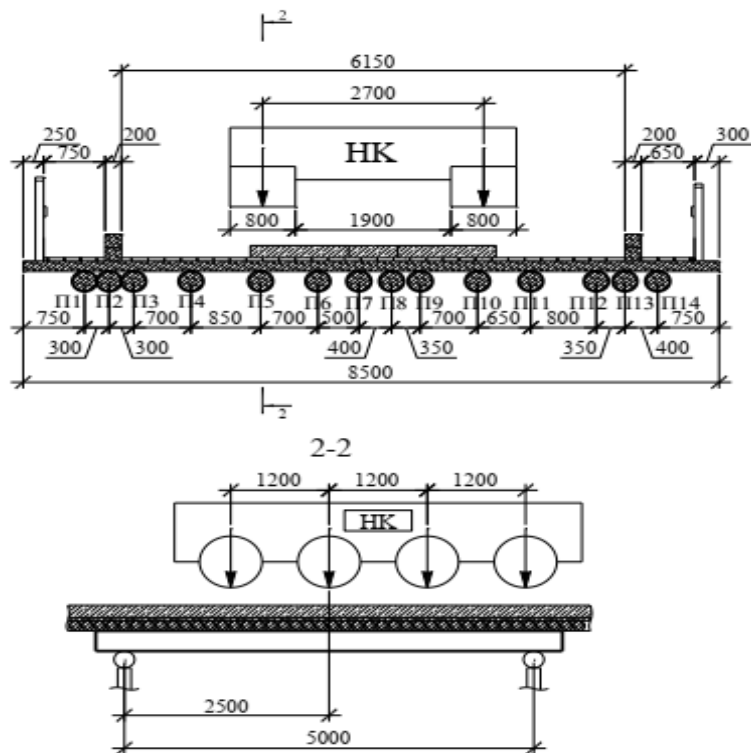


Рис. 5. Расчетная схема расположения на проезжей части моста временной нагрузки НК в виде одиночного четырехосного колесного автомобиля

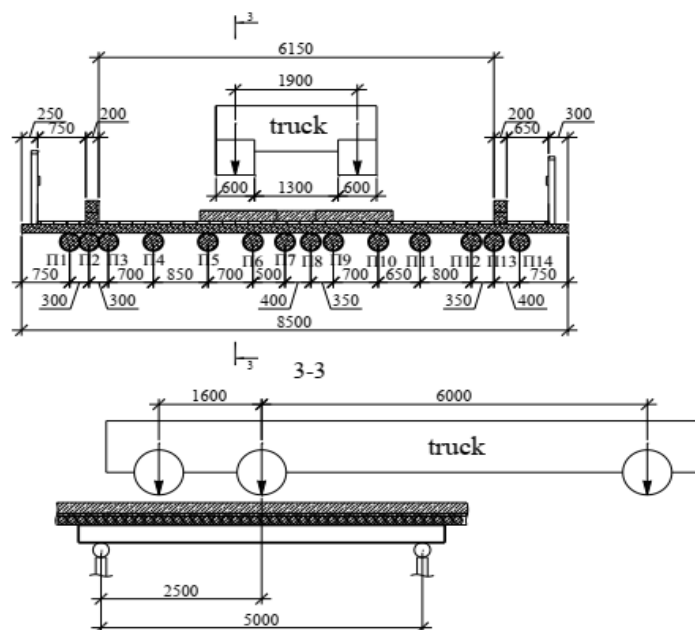


Рис. 6. Расчетная схема расположения на проезжей части моста временной нагрузки ЭН₂ в виде колонны эталонных трехосных автомобилей

Таблица 1

Расчетные значения допустимых классов временных подвижных нагрузок по прочности средних сечений несущих прогонов

Но- мер про- гона	Изгибающие моменты, кНм в средних сечениях прогонов от действия:					Допустимые клас- сы временных нагру- зок		
	постоянной нагрузки		временных нагрузок			К _{ак}	К _{нк}	К _{эн}
	собствен- ного веса прогонов	веса мосто- вого полотна	A ₁₁	H ₁₁	ЭН ₃			
П1	1.90	5,73	12,8	27,6	11,8	25,1	11,6	74,2
П2	1.90	5,85	14,1	29,9	13,1	22,7	10,7	67,2
П3	1.90	6,03	15,9	32,9	14,7	20,0	9,7	59,0
П4	1.90	6,82	22,3	41,6	20,6	13,9	7,4	40,9
П5	1.90	8,05	34,2	59,9	32,1	8,7	4,9	25,1
П6	1.90	8,74	40,1	52,9	37,7	7,2	5,4	20,8
П7	1.90	8,91	36,3	53,1	33,3	7,9	5,4	20,8
П8	1.90	8,91	36,1	52,9	33,1	7,9	5,4	20,7
П9	1.90	8,73	38,4	52,8	36,0	7,5	5,5	21,8
П10	1.90	7,96	35,9	59,3	33,9	8,3	5,0	23,9
П11	1.90	7,18	25,6	46,2	33,5	11,9	6,6	35,5
П12	1.90	6,22	17,7	36,1	16,3	17,8	8,8	52,8
П13	1.90	6,01	15,4	32,3	14,2	20,6	9,8	61,1
П14	1.90	5,83	13,5	29,0	12,5	23,7	11,0	69,8

Примечание. Красным цветом в таблице выделены параметры несущей способности прогонов, которые не имеют достаточной прочности при пропуске временных нагрузок A₁₁, H₁₁ и ЭН₃.

3. Алгоритм вероятностного расчета надежности моста

Результаты обследования конструкций транспортного сооружения и их расчетный анализ показали, что его грузоподъемность определяется техническим состоянием деревянных несущих прогонов, которые из-за неравномерного расположения по ширине проезжей части испытывают существенно отличающиеся усилия. Кроме того, прогоны имеют разброс геометрических размеров первоначальных сечений. Наблюдаются различные по глубине поражения древесины от загнивания при длительной эксплуатации. Отметим также флуктуации прочностных характеристик древесины. Все эти факторы учтем на основе использования современных методов теории надежности. Для этого используем следующие применяемые в теории надежности строительных конструкций положения [6-7]:

- прочностные характеристики древесины являются случайными величинами, которые подчиняются нормальному закону распределения с параметрами, принимаемыми в зависимости от рекомендуемых ОДМ 218.4.029-2016 [2] нормативных сопротивлений и коэффициентов надежности по материалу;

- составляющие усилий от действия постоянных нагрузок от веса несущих конструкций мостового полотна и считаются гауссовскими случайными величинами. Математические ожидания постоянных нагрузок приняты по данным измерений конструкций в натуре. Среднеквадратические отклонения постоянных нагрузок принимаются по нормативным значениям коэффициентов надежности по материалу для отдельных конструкций;

- изгибающие моменты от действия временных нагрузок АК, НК и ЕН₃ рассматриваются как нормативные системы вертикальных сил со случайными нормальными значениями. Математические ожидания нагрузок принимаются по ОДМ 218.4.025-2016 [1] с учетом нормативных динамических коэффициентов. Стандарты случайных значений определены по нормативным значениям коэффициентов надежности по нагрузкам для обеспеченности $P=0,95$ [9-10].

В соответствии с этими положениями расчет параметров надежности несущих деревянных прогонов моста выполняется с использованием приведенных в разделе 3 настоящей статьи (см. табл. 1) расчетных усилий в следующем порядке:

- математические ожидания изгибающих моментов в средних сечениях прогонов:

$$m_{M_i} = \frac{M_i}{\gamma_{fi}}, \quad (1)$$

где M_i – расчетный изгибающий момент от каждой из учитываемых нагрузок;
 γ_{fi} – коэффициент надежности по нагрузке для рассматриваемого воздействия;

- математические ожидания изгибающих моментов от совместного действия всех учитываемых нагрузок на среднее сечение прогона:

$$m_{M_{max}} = \sum_{i=1}^3 m_{M_i}; \quad (2)$$

- среднеквадратические отклонения изгибающих моментов для одной из учитываемых нагрузок:

$$\sigma_{M_i} = m_{M_i} * \nu_i, \quad (3)$$

где ν_i – коэффициент вариации для каждой из учитываемых нагрузок, определяемый с обеспеченностью $P=0,95$ по формуле:

$$\nu_i = \frac{\gamma_{fi} - 1}{1,64}; \quad (4)$$

- среднеквадратическое отклонение изгибающих моментов в средних сечениях несущих прогонов от всех действующих нагрузок:

$$\sigma_{M_{max}} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sigma_{M_i}^2}; \quad (5)$$

- математические ожидания предельных напряжений в крайних волокнах несущих деревянных прогонов:

$$m_{(R)} = \frac{R_n}{1-1,64 \cdot v_R}, \quad (6)$$

где R_n – расчетное сопротивление древесины;

v_R – коэффициент вариации прочности древесины при изгибе.

• среднее квадратическое отклонение предельных напряжений в крайних волокнах для среднего сечения несущего прогона:

$$\sigma_{M_{\text{пред}}} = m_{(R)} \cdot v_R, \quad (7)$$

После проведения описанных выше вычислений для каждого из несущих прогонов деревянного моста определяются следующие количественные показатели надежности [3-4]:

1. Характеристика безопасности:

$$\beta = \frac{m_{M_{\text{пред}}} - m_{M_{\text{max}}}}{\sqrt{\sigma_{M_{\text{пред}}}^2 + \sigma_{M_{\text{max}}}^2}}. \quad (8)$$

1. Вероятность отказа:

$$Q = 0,5 - \Phi(\beta), \quad (9)$$

где $\Phi(\beta)$ – функция Лапласа;

2. Вероятность безотказного функционирования:

$$H = 1 - Q; \quad (10)$$

3. Логарифмический показатель надежности:

$$\rho = -\lg(1/H). \quad (11)$$

Окончательный вывод о надежности всего транспортного сооружения можно получить из сопоставления параметров надежности всех несущих прогонов пролетного строения. Наиболее просто это сделать, приравняв параметры надежности наиболее ненадежного прогона к параметрам надежности всего сооружения. При установлении безопасного режима эксплуатации необходимо учитывать полученное в расчетах распределение параметров надежности несущих прогонов по ширине проезжей части.

4. Результаты численных исследований надежности эксплуатируемого моста

Предложенная в предыдущем разделе методика использовалась для оценки надежности описанного выше четырехпролетного деревянного моста (рис. 1-2). При этом использованы приведенные в разделе 2 данные расчетного определения грузоподъемности этого транспортного сооружения.

В численных исследованиях принимались следующие допущения:

- первоначальные диаметры всех несущих прогонов пролетного строения считаются одинаковыми и равными 30 см;
- влияние износа деревянных прогонов при длительной эксплуатации моста от постоянного увлажнения и последующего загнивания наружных слоев древесины учтено путем уменьшения диаметров всех несущих прогонов до 25 см;
- прочностные и деформационные характеристики древесины в расчетах приняты в соответствии с рекомендациями ОДМ 218.4.029-2016 [2] для сосны равными: нормативное и расчетное сопротивления древесины при изгибе $R_n=24,5$ МПа, $R=14,0$ МПа, коэффициент вариации прочности древесины с учетом возможных расслоений и сучков $v_R=0,15$, модуль упругости $E=10,0$ ГПа.

Результаты выполненных численных исследований изменения по ширине пролетного строения логарифмических показателей надежности несущих прогонов с учетом и без учета загнивания наружных слоев для временных нормативных нагрузок от автотранспортных средств А11 и от тяжелого одиночного четырехосного автомобиля Н11 приведены ниже, соответственно, на рис.7 и 8. Из анализа приведенных графиков получены следующие выводы.

- Логарифмические показатели надежности по прочности несущих прогонов разрезного деревянного моста существенно зависят от поперечных расстояний между прогонами

ми. С увеличением поперечного шага продольных балок показатель надежности уменьшается, при сближении – увеличивается.

- При равномерном уменьшении диаметров несущих прогонов пролетного строения моста с учетом загнивания наружных слоев древесины график зависимости логарифмических показателей остается подобным кривой без учета загнивания древесины, что соответствует увеличению вероятности отказа пролетных строений на два порядка. В случае неравномерного ослабления несущих прогонов зависимости логарифмических показателей могут радикально измениться.

- Формы графиков изменения по ширине моста логарифмических показателей существенно зависят от вида рассматриваемой временной нагрузки, так как рекомендуемые нормативными документами правила поперечного расположения разных временных нагрузок сильно различаются.

- Предложенная методика и вычислительная программа могут эффективно использоваться для оценки текущего технического состояния моста и установления безопасных режимов движения автомобилей по нему при длительной эксплуатации.

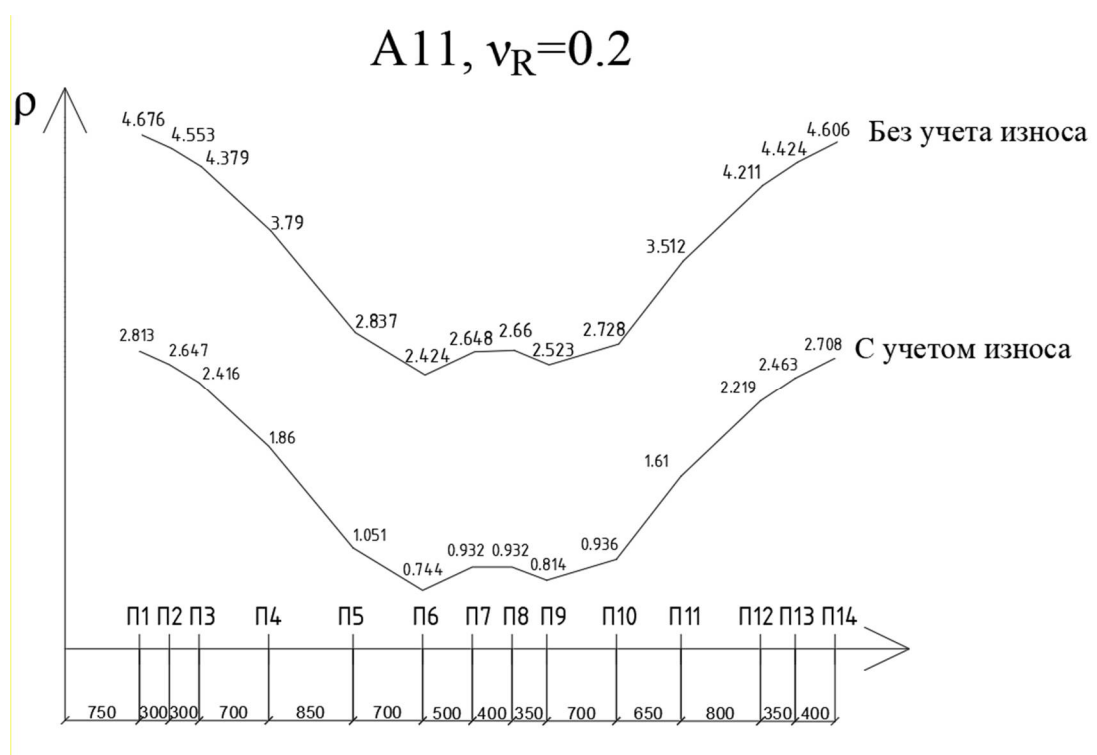


Рис. 7. Изменение по ширине пролетного строения логарифмических показателей надежности несущих прогонов с учетом и без учета загнивания наружных слоев древесины при эксплуатации моста временными нормативными нагрузками A11

Н11, $v_R=0.2$

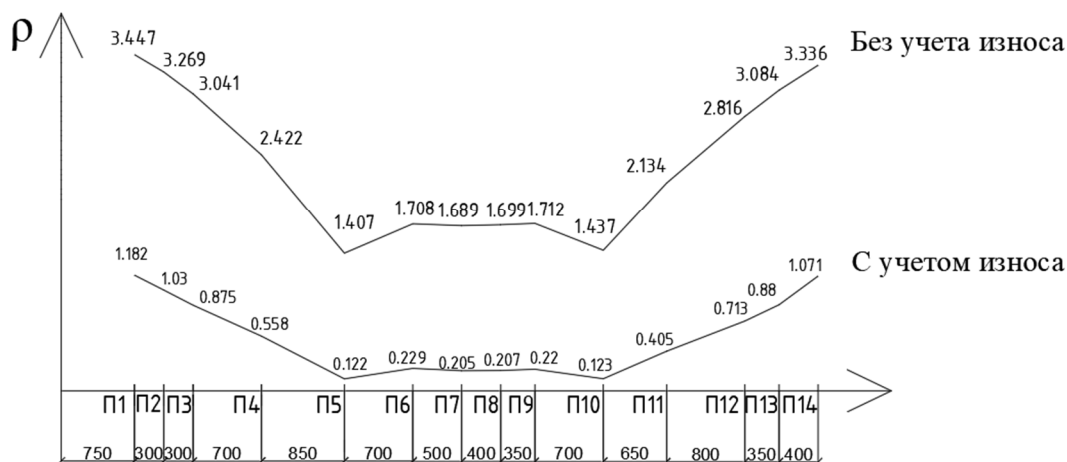


Рис. 8. Изменение по ширине пролетного строения логарифмических показателей надежности несущих прогонов с учетом и без учета загнивания наружных слоев древесины при эксплуатации моста временными нормативными нагрузками Н11

Выводы

Приведенные в настоящей статье исследования привели к следующим выводам:

- Выполнены комплексные исследования эксплуатационной надежности деревянного автодорожного моста с учетом дефектов и повреждений и разброса прочностных характеристик материалов несущих конструкций.
- Предложена и апробирована основанная на положениях теории надежности конструктивно ориентированная методика для вероятностного расчета прочности и долговечности длительно эксплуатируемых несущих прогонов пролетного строения.
- Доказана применимость разработанной методики и вычислительной программы для оценки текущего технического состояния деревянных мостов и установления безопасных режимов движения автомобилей по ним при длительной эксплуатации.
- Построены графики изменения логарифмических показателей надежности по прочности с учетом и без учета изменения во времени диаметров несущих деревянных прогонов от постоянного увлажнения и последующего загнивания наружных слоев древесины для длительно эксплуатируемого моста.

Библиографический список

1. ОДМ 218.4.025-2016. Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Общая часть.
2. ОДМ 218.4.029-2016. Рекомендации по определению грузоподъемности эксплуатируемых мостовых сооружений на автомобильных дорогах общего пользования. Определение грузоподъемности конструкций деревянных мостов.
3. ГОСТ 32960-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения. Разработан ОАО ЦНИИС, МТК 418 "Дорожное хозяйство". – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
4. Калугин А.В. Деревянные конструкции. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 223с.
5. Шмелев М.А., Дымолазов А.В. Деревянные конструкции. Примеры расчета элементов. – Казань. Изд-во КГСУ, 2018. – 96с.
6. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. – М., 2010. – 252с.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 174с.

8. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А.С. Городецкий, В.И. Заворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143с.
9. Барченков А.Г., Котуков А.Н., Сафронов В.С. Применение корреляционной теории для динамического расчета мостов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1970. – №4. – С.43-48.
10. Сафронов В.С., Зазвонов В.В. Влияние деформационных характеристик песчаной засыпки на напряженно-деформированное состояние грунтозасыпных мостов // Строительная механика и конструкции. – 2010. – №1 (1). – С.18-22.
11. Сафронов В.С., Катембо А.Л. Расчет несущей способности внецентренно сжатого стержня из железобетона с использованием деформационной модели // Строительная механика и конструкции. – 2016. – №1(12). – С. 64-74.
12. Сафронов В.С., Нгуен Д.Х. Вероятностная оценка риска возникновения предельных состояний в сечениях изгибаемых железобетонных балок// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. – 2010. – №1 (17). – С. 157-166.
13. Сафронов В.С., Доманов, Д.И. Оценка риска разрушения нормальных сечений железобетонных балок произвольной формы // Строительная механика и конструкции. – 2011. – №1(2). – С.46-51.
14. Сафронов В.С., Черников А.В. Деформационный расчет составных изгибаемых железобетонных стержневых элементов // Строительная механика и конструкции. - 2018. – № 3(18). - С. 81-92.
15. Сафронов В.С., Доманов Д.И. Оценка влияния косины пролетных строений железобетонных мостов на риск разрушения нормальных сечений балок с ненапрягаемым армированием от изгибающего момента// Строительная механика и конструкции. -2012. – № 1(4).- С. 85-91.
16. Сафронов, В.С., Суханова Ю.А Прочностной анализ несущих конструкций висячего трубопровода через реку Ока в г. Орле // Строительная механика и конструкции. 2010. – № 1(1). – С. 61-66.
17. Сафронов В.С., Антипов А.В. Современные конечно-элементные модели балочных без диафрагменных пролетных строений автодорожных мостов // Строительная механика и конструкции. - 2013. - № 1(6). - С. 92-101.

References

1. ODM 218.4.025-2016. Recommendations for determining the carrying capacity of the operated bridge structures on public roads. A common part.
2. ODM 218.4.029-2016. Recommendations for determining the carrying capacity of the operated bridge structures on public roads. Determination of the carrying capacity of wooden bridge structures.
3. Federal Standard 32960-2014 "Automobile roads for general use. Standard loads, design loading schemes ". Developed by JSC TsNIIS, MTK 418 "Road Facilities". М.: Standartinform, 2016. 8 p.
4. Kalugin A.V. Wooden structures. М.: ASV Publishing House, 2003. 223 p.
5. Shmelev M.A., Dymolazov A.V. Wooden structures. Examples of calculation of elements. Kazan. Publishing house of KGSU. 2018. 96 p.
6. Raiser V.D. The theory of the reliability of structures. М.: 2010. 252 p.
7. Lychev A.S. Reliability of building structures. М.: Publishing house ASV, 2008. 174 p.
8. Gorodetsky A.S., Zavoritsky V.I., Lantukh-Lyashchenko A.I., Rasskazov A.O. Finite element method in the design of transport structures. М.: Transport, 1981. 143 p.

9. Barchenkov A.G., Kotukov A.N., Safronov V.S. Correlation theory application for dynamic calculation of bridges. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. No. 4. 1970. Pp. 43-48.
10. Safronov V.S., Zazvonov V.V. Influence of deformation characteristics of sand filling on the stress-strain state of soil filling bridges. *Structural Mechanics and Constructions*. 2010. No. 1(1). Pp.18-22.
11. Safronov V.S., Katembo A.L. Calculation of the bearing capacity of an eccentrically compressed reinforced concrete bar using a deformation model. *Structural Mechanics and Constructions*. No. 1(12). 2016. Pp. 64-74.
12. Safronov V.S., Nguyen D.Kh. Probabilistic assessment of the risk of occurrence of limiting states in sections of flexible reinforced concrete beams. *Scientific Bulletin of the Voronezh University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2010. No. 1(17). Pp. 157-166.
13. Safronov V.S., Domanov D.I. Assessment of the risk of destruction of normal sections of reinforced concrete beams of arbitrary shape. *Structural Mechanics and Constructions*. No. 1(2). 2011. Pp. 46-51.
14. Safronov V.S., Chernikov A.V. Deformation analysis of composite bending reinforced concrete rod elements. *Structural Mechanics and Constructions*. Vol. 3. No. 18. 2018. Pp. 81-92.
15. Safronov V.S., Domanov D.I. Assessment of the effect of obliquity of span structures of reinforced concrete bridges on the risk of destruction of normal sections of beams with non-stressed reinforcement from a bending moment. *Structural Mechanics and Constructions*. Vol. 1(4). 2012. Pp. 85-91.
16. Safronov V.S., Sukhanova Yu.A. Strength analysis of the supporting structures of the hanging pipeline across the Oka river in the city of Orel. Vol. 1. No. 1. 2010. Pp. 61-66.
17. Safronov V.S., Antipov A.V. Modern finite-element models of diaphragmless beam spans of road bridges. *Structural Mechanics and Constructions*. No. 1. 2013. Pp. 92-101.

PROBABILISTIC ANALYSIS OF RELIABILITY SLIDING WOODEN ROAD BRIDGE

V. S. Safronov¹, G. E. Gabrielyan², D. A. Kiselev³, A.V. Antipov⁴

Voronezh State Technical University^{1,2,3}
Dortransproekt⁴
Russia, Voronezh

¹Dr. of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(473)2715230, e-mail: vss22@mail.ru

²PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(910)3469885, e-mail: grayr2010@rambler.ru

³MA Student of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(980)5469722, e-mail: kiselev01021999@mail.ru

⁴Senior Engineer, Tel.: +7(910)7329044, e-mail: dron_a77@mail.ru

The paper describes a methodology, an algorithm, and a program for determining the reliability parameters of a continuous wooden road bridge in operation for a long time, taking into account the defects and damages identified during the examination and the scatter of strength characteristics of materials, acting loads, and dimensions of the structure.

The results of numerical studies of the dependences of the logarithmic indicators of the reliability of bearing girders in the typical sections of multi-element span structures on the combined action of permanent and temporary loads are presented.

Keywords: wooden highway bridge, continuous multi-element span, continuous duty, defects and damage, reliability parameters, diagrams of the dependence of the logarithmic index for the bearing runs of the superstructure in the typical sections.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОФРИРОВАННЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

А. В. Черников¹, В. А. Козлов²

Воронежский государственный технический университет
Россия, г. Воронеж

¹Аспирант кафедры строительной механики, тел.: +7(920)2467077, e-mail: chernickov-andrei@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой строительной механики, тел.: +7(473)276-40-06,
e-mail: vakozlov@vgasu.vrn.ru

В статье представлен исторический обзор основных этапов развития водопропускных труб из гофрированного металла (МГТ) в нашей стране и анализ применяемых расчетных методов. Проведена оценка состояния вопроса на сегодняшний день. Выделены основные тенденции в данном направлении и обозначены дальнейшие пути развития МГТ.

Ключевые слова: металлическая гофрированная труба (МГТ), металлические гофрированные конструкции (МГК), водопропускная труба, исторический обзор.

Введение. Водопропускные трубы и мостовые сооружения из гофрированной стали являются легкими и экономичными конструкциями, и в наши дни они заняли определенную нишу в транспортном строительстве. Хотя данный тип конструкций и не занимает ведущее место, он всё же стабильно находит себе применение в практике современного строительства. За 140 лет использования металлических гофрированных труб (МГТ) в транспортном строительстве наблюдались как пики его развития, так и периоды забвения. Окончательному отказу от МГК препятствовали очевидные технологические и технико-экономические преимущества. А закреплению и стабильному развитию МГК мешали постоянные неудачи, постигающие их в процессе возведения и эксплуатации в периоды массового строительства. Этап максимального развития приходится на 70-е годы прошлого века. Именно тогда было разработано большинство алгоритмов расчета и написаны методические документы, которые практически без изменений дошли до наших дней. Но будучи передовыми 50 лет назад, сейчас они таковыми уже не являются.

Начальный этап применения. Как отмечено во введении, опыт применения гибких МГТ насчитывает более 140 лет. Первые опытные образцы были предложены и разработаны на Петербургском металлургическом заводе в 1875 г. (рис. 1), где после успешных испытаний были уложены трубы под насыпью Семянниковской ветки Октябрьской железной дороги. Начиная с 1887 г., при строительстве Закаспийской (Среднеазиатской) железной дороги в течение двух лет было уложено порядка 1300 пог. м гофрированных труб диаметром от 0,53 м до 1,07 м, из которых 833 пог. м на участке Чарджуй – Самарканд. Массовое же производство берет начало спустя почти 10 лет, к тому времени выпуск труб из волнистой стали, помимо Петербургского, освоил Прушковский завод. В период с 1896 по 1914 г. было уложено свыше 60 тыс. пог. м труб (примерно 5 тыс. труб) на 23 железных дорогах таких, как Екатерининская, Николаевская, Владикавказская, Закавказская, Занеманская, Северо-Западная, Московско-Окружная, Закаспийская (Самарканд-Андижанская, Мурагабская ветки), Коканд-Наманганская и Оренбург-Ташкентская. На

автомобильных дорогах в указанный период гофрированные трубы использовались значительно реже, было уложено всего несколько десятков погонных метров труб [3].

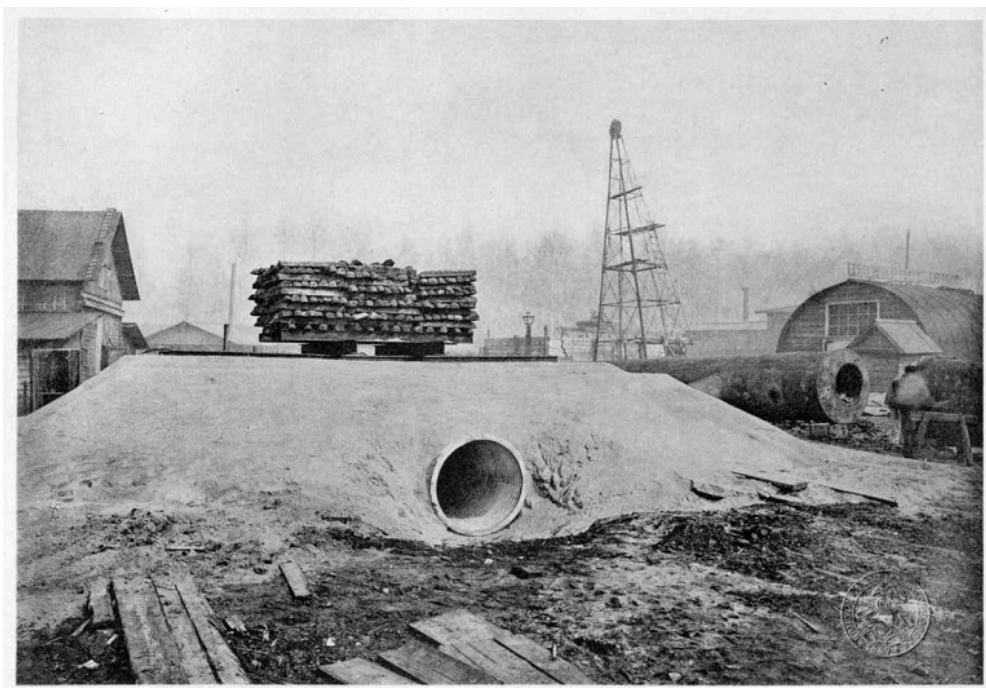


Рис. 1. Испытание первой гофрированной трубы, Петербургский металлургический завод, 1875 г.

После 1914 г. применение и производство труб из волнистой стали было остановлено. Во многом это связано с неудачным опытом эксплуатации данных сооружений на Оренбург-Ташкентской железной дороге, где за 14 лет, начиная с 1900 г., из строя вышло 36% труб. Из них почти 2/3 по причине образования недопустимого прогиба и расхождения звеньев труб, 1/3 по причине сильного повреждения коррозией [17]. В ходе обследования 13000 пог. м труб на данном участке железной дороги, проведенного в 1913 г., было установлено, что основной причиной отказа явилось использование нового, неапробированного сортамента с уменьшенной высотой сечения волны гофрированного листа. Для данного участка железной дороги был принят лист сечением $60 \times 16 \times 1$ мм вместо использованного ранее $68 \times 34 \times 1$ мм (рис. 2).

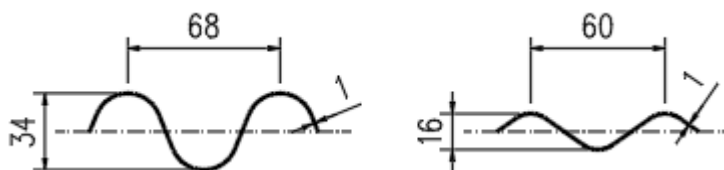


Рис. 2. Сечения гофров используемых при строительстве труб до 1914 г.

Уменьшенное сечение не обладало достаточной жесткостью, что привело к значительным деформациям поперечного сечения в ходе эксплуатации. А трубы, наиболее пострадавшие от коррозионного воздействия, не обладали удовлетворительным качеством оцинкования и были уложены на солончаковых грунтах без дополнительной изоляции. Ситуация с Оренбург-Ташкентской дорогой перечеркнула положительные результаты многолетней эксплуатации гофрированных труб и доверие к ним было подорвано, а начавшиеся затем Первая мировая и Гражданская войны усугубили сложившуюся ситуацию и развитие данного типа сооружений на долгое время было приостановлено.

Рассмотрим расчетные модели, использовавшиеся в тот период времени при проектировании гофрированных труб. В 1899 г. В. К. Фельдтом и инженером Грыжевским были предложены простые формулы определения НДС материала, находящегося под действием сосредоточенной силы и момента. Позже в 1901 г. инженер Леви и Ф.К. Ясевич использовали модель кольца под действием равномерной нагрузки. Однако метод Ф.К. Ясевича был дополнен эмпирическими коэффициентами, полученными на основе опытов, проведенных У. Фэрберном для труб большого диаметра, и в отличие от всех остальных методов расчета не оценивал напряжения в трубе по отношению к некоему допустимому значению, а служил для определения предельного значения внешней нагрузки. В том же году инженером Головиным был предложен, наверное, самый обстоятельный метод расчета. Согласно его гипотезе, из поперечного сечения выделяется арка, нагруженная вертикальным распределенным давлением грунта, а также учтен отпор грунта в виде горизонтальной силы. Наибольшее распространение в силу своей простоты получил метод Фельдта-Грыжевского, также для оценки предельных нагрузок использовались эмпирические формулы Ф.К. Ясевича. Метод инженера Леви был применен при строительстве Ковель-Владимирской железной дороги в 1905 г. А вот метод расчета инженера Головина, даже учитывая большую проработанность, так и не нашел применения, поскольку для него требовались неопределенные данные о величине горизонтального перемещения рассматриваемого участка сечения и отношении вертикального и горизонтального давлений [3].

Использование МГТ в советское время. Несмотря на запрет использования МГТ в качестве малых искусственных сооружений в дорожном строительстве, исследования в этом направлении продолжали вестись. Объясняется это значительной привлекательностью данного типа сооружений как в экономическом, так и в технологическом плане, а также примерами удачной эксплуатации этих конструкций за рубежом. С 1927 по 1939 гг. исследуется взаимодействие гофрированной трубы с грунтом, прочность и коррозионная устойчивость применяемого металла, ставится вопрос эксплуатационной надежности гофрированных конструкций. Этим вопросам посвящены работы А.А. Герцога, В.И. Гнедовского и В.К. Фельдта [1]. А в 1941 г. было проведено второе масштабное обследование 2334 труб со сроком эксплуатации от 26 до 54 лет. Результаты обследования были положительными. Несмотря на малую толщину стенки – 1 мм, 90% осмотренных труб были в удовлетворительном состоянии. Также в ходе эксплуатации МГТ собирались и анализировались данные о них от служб эксплуатации железных дорог. Так, в 1953 г. инженер по эксплуатации Оренбургской железной дороги В.А. Сумароков из опыта более чем 50-летней эксплуатации гофрированных труб дает следующие рекомендации: при укладке труб в агрессивных грунтах предусматривать дополнительную защиту от коррозии; для предупреждения значительных прогибов повышать жесткость трубы, применяя трубы с высоким гофром и увеличивая до 2 мм толщину стенки; для предотвращения заиливания и образования застойных зон предусматривать продольный строительный подъем и более тщательную подготовку основания; также при устройстве многоочковых труб принимать межосевое расстояние не менее двух диаметров [14].

Дальнейшее развитие МГТ тесно связано со строительством Байкало-Амурской магистрали (БАМа). Идея широтной ж/д магистрали, проходящей через северную оконечность Байкала, появилась ещё в конце 19-го века. Она должна была выступить дублером Транссибирской магистрали, отнесенным дальше от границ вглубь страны. Изыскания возобновились в конце 1920-х годов, а в 1932 г. подписано постановление о начале строительства. Однако из-за различных причин, основными из которых были нехватка рабочей силы, Великая Отечественная война и землетрясения в конце 1950-х годов, строительство постоянно откладывалось. Активное строительство магистрали было возобновлено лишь в 1974 г. Территория, по которой пролегает трасса БАМа, отличается суровыми природно-климатическими условиями – вечная мерзлота глубиной до 100 м,

высокая сейсмичность до 9 баллов, обилие рек и горных хребтов. Также стоит отметить удаленность места строительства от населенных пунктов. Помимо этого, в начале 1970-х годов были намечены большие масштабы строительства автомобильных дорог, особенно в удаленных районах Сибири, Дальнего Востока и Севера. В подобных условиях для выдерживания довольно сжатых сроков строительства требовалось использовать наиболее эффективные инженерные решения, материалы и конструкции.

В 1967 г. на основе анализа зарубежного опыта строительства и эксплуатации МГТ проводится технико-экономическое обоснование их эффективности и озвучиваются рекомендации по внедрению МГТ в отечественное строительство применительно к районам Дальнего Востока и Сибири [11]. В основу расчетной модели легли методы расчета других подземных сооружений, активно развивавшиеся ранее: например, работы Г.К. Клейна по расчету жестких подземных трубопроводов [12] и О.Е. Бугаевой по расчету обделок транспортных тоннелей [2], во многом передовая и инновационная работа Л.М. Емельянова по расчету подземных гибких труб [6], а также накопленный опыт проектирования и эксплуатации МГТ. Предложенная модель включала анализ плоского напряженно-деформированного состояния гибкого кольца, находящегося в упругом грунтовом окружении. А также оценку предельного состояния на основе деформационного критерия разрушения (резкое увеличение деформации без увеличения нагрузки). При этом в условиях упругого отпора грунта допускались значительные пластические деформации, не нарушающие эксплуатационных способностей сооружения. Помимо этого, был разработан алгоритм нелинейного деформационного расчета, схожий с методом Метропроекта, описанный в [32], в основу которого положена замена кругового очертания полигональным, с представлением расчетной схемы в виде стержневой модели. Механические процессы, протекающие в окружающей конструкции грунтового массиве, описаны моделью Фусса-Винклера. Для проверки основных расчетных положений гибких металлических труб осенью 1968 г. построены две экспериментальные трубы в насыпи высотой до 11,5 м отверстием 1,86 м толщиной 1,5 мм с гофром 100×50 мм. Трубы были уложены на Ярославской и Южной железной дороге на песчано-гравийную подушку толщиной 0,4 м. Грунт засыпки укладывался бульдозером слоями толщиной 15-20 см с уплотнением 94% [15]. Исследования, проведенные на экспериментальных трубах после их устройства, подтвердили адекватность принятых методик расчета, а повторные испытания в 1969 г. не выявили существенных изменений в их состоянии. На основании этих исследований Ленгипротрансместом было составлено проектное задание на опытные металлические трубы отверстием 1-5 м при высоте насыпи до 20 м для железных и автомобильных дорог. А для обеспечения широкого производства гофрированных труб разрабатываются станки для вальцевания, резки и перфорации плоских гофрированных листов, выпускаемых металлургическими заводами страны.

По результатам проведенной опытно-исследовательской деятельности в 1971 г. были разработаны требования к проектированию, изготовлению и строительству гофрированных водопропускных труб в виде технических указаний ВСН 176-71. Далее на основе проектных заданий и в соответствии с разработанными техническими указаниями велось опытное строительство МГТ, как правило, в сложных гидрогеологических условиях. Индустриальное производство этих труб было налажено на специализированной технологической линии на Мышегском заводе Главстройпрома с годовым объемом производства 2,5 тыс. т. На примере опытных труб разрабатывалась технология укладки и опыт ведения работ, оценивались фактические технико-экономические показатели в сравнении с аналогичными железобетонными трубами, а также исследовалось состояние конструкций. Так, например, для изучения опыта ведения работ и технологии укладки в сложных условиях бездорожья и заболоченности на северном участке ж/д линии Тюмень-Сургут от 357-го до 500-го км в 1971-1972 гг. было собрано 10 гофрированных труб с толщиной листа 1,5 мм (рис. 3). За

собранными трубами в процессе сборки и эксплуатации также велись инструментальные наблюдения СибЦНИИСом и ЦНИИСом. Трубы располагались двумя группами: шесть труб на участке 358-375 км (осенне-зимний период 1971 г.) и четыре на участке 433-436 км (весенне-летний период 1972 г.) Основания труб первого участка – глины и суглинки, второго участка – мелкие и пылеватые пески. Плотность уложенного грунта 0,88-0,96. В процессе опытного строительства производились многократные нивелировки продольного профиля, измерения продольных и поперечных деформаций по зафиксированным точкам на внутренней поверхности трубы в семи сечениях по длине [9, 26, 35].

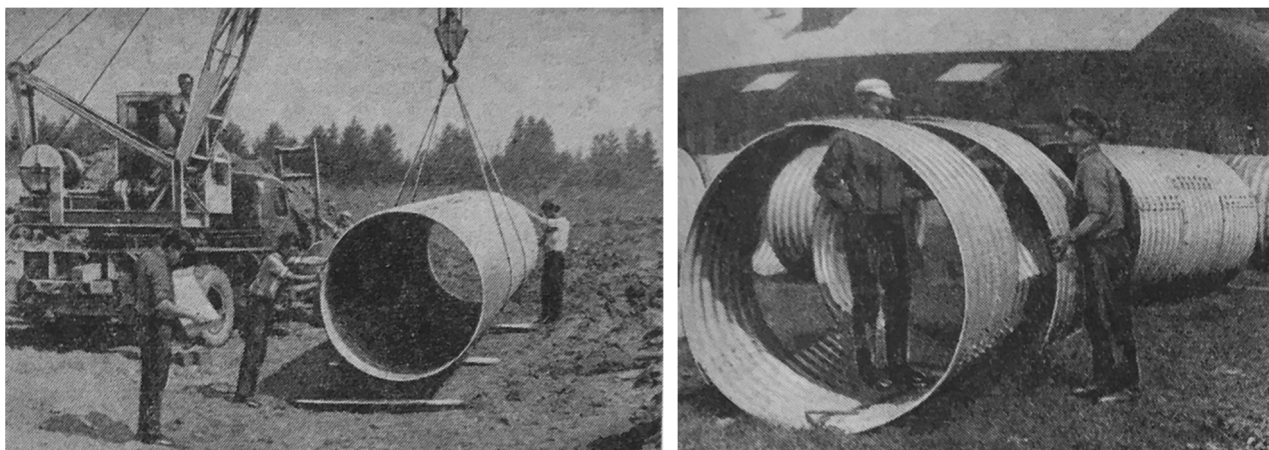


Рис. 3. Возведение опытных гофрированных труб на северном участке ж/д линии Тюмень-Сургут 1971-1972 гг. [35]

В автодорожном строительстве гофрированные трубы нашли применение при борьбе со значительными горизонтальными деформациями (растяжка звеньев железобетонных труб), особенно в условиях вечной мерзлоты [24]. И если в период 1960-1970 гг. доля металлических труб составляла менее 5% от общего числа построенных [18], то с начала 70-х годов ситуация стала меняться. С середины 1973 г. укладкой МГТ на автомобильных дорогах начал заниматься Пермдорстрой, и в течение 1973-1974 гг. было построено 13 труб общей длиной 345 м. Металлические трубы укладывали в районе Крайнего Севера на дороге Коми АССР. Трасса дороги длиной 99 км проходила по тайге и пересекала 36 болот [8].

С середины 70-х годов начиналось строительство БАМа, что способствовало активному возведению металлических гофрированных труб, хорошо зарекомендовавших себя в сложных условиях, и дальнейшему изучению их поведения при эксплуатации. Всего на трассе было возведено 4200 малых искусственных сооружений, а на опытных трубах в районе г. Новосибирск было проведено исследование взаимодействия труб с грунтом. Конструкция труб была принята по типовому проекту инв. №996, высота насыпи 2,5-5,5 м. Применялись различные типы грунтов от супесей и суглинков до глыбово-щебенистых с суглинистым наполнителем, в том числе мерзлых. Уплотняли до плотности 0,95 послойно полуприцепными катками ДУ-16, ДУ-16В или гружеными самосвалами, толщина слоев составляла от 20 до 40 см [25].

В 1977-1978 гг. изучалась возможность использования глинистых грунтов в качестве материала засыпки. Данные исследования производились на одном из объектов Одесстранстрой по проекту Киевгипротранс, где было осуществлено опытное строительство четырех водопропускных труб диаметром 1,5 м, 2×5 м, 2 м и 3 м толщиной 2 мм и 2,5 мм [16], а также в районе станции Лиелварде Прибалтийской дороги, где СУ №311 Балттранстроя было уложено 6 экспериментальных стандартных труб диаметром 1,5 м и толщиной 2 мм [28]. Отмечались удовлетворительные результаты инструментальной оценки уложенных труб, что свидетельствовало о возможности широкого использования глинистого

грунта для засыпки в условиях обычной строительной-климатической зоны. В дальнейшем, однако, применение данного материала засыпки было ограничено автомобильными дорогами с высотой насыпи не более 8 м.

Выполненные ЦНИИСом, СибЦНИИСом, Ленгипротрансмостом и Мосгипротрансмостом исследования, проектные разработки и опытное строительство гофрированных труб в различных районах страны показали целесообразность их широкого применения в транспортном строительстве. По результатам проведенной большой работы, направленной на развитие МГТ 1 октября 1978 г. была введена в действие «Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб» ВСН 176-78 взамен ВСН 176-71. Инструкция была утверждена МПС и Минтрансстроем и согласована Госстроем СССР и Минавтодором РСФСР. Она состояла из шести разделов, в которых описывались области применения и положения по проектированию и строительству труб. Был переработан раздел, посвященный расчету труб. В инструкции изложен метод геометрически и физически нелинейного расчета МГТ, разработанный в ЦНИИСе на основе изучения и обобщения отечественного и зарубежного опыта их применения в дорожном строительстве, теоретических и экспериментальных исследований работы гибких конструкций с окружающим грунтом насыпи. За критерий исчерпания несущей способности стальной трубы принято состояние предельного статического равновесия взаимодействующей системы «конструкция – грунт», что по своей идее аналогично деформационному критерию разрушения, применяемому в американском методе расчета, основные положения которого были использованы при разработке ВСН 176-71. Предложенный ЦНИИСом и изложенный в инструкции метод расчета стальных гофрированных труб, свободный от ряда условностей американского метода, давал возможность определять параметры (предельную нагрузку и предельные деформации поперечного сечения), характеризующие момент предельного статического равновесия системы. На основании ВСН 176-78 было разработано большое количество материалов по проектированию труб и их сооружению, таких как технологические карты, инструкции по антикоррозионной защите, пособия для проектировщиков и строителей, типовые проекты и рабочие чертежи. В первую очередь они нашли применение при строительстве БАМа.

Инструкция явилась результатом большой работы, проделанной учеными и инженерами в сжатые сроки. Область применения данного документа была весьма значительна, а сама инструкция достаточно содержательна, что способствовало закреплению конструкции МГТ в практике строительства, её распространению и дальнейшему развитию. В последующие годы научный интерес стал постепенно уменьшаться. За следующие 7 лет проводились исследования, направленные на доработку инструкции и расширение области её применения. Например, в 1983 г. были проведены натурные исследования особенности работы и надежности гофрированных труб под высокими насыпями (более 6 м) на линии Сургут–Уренгой (опытная труба 3×1,5 м) [31]. А немногим позже в 1984-1985 гг. ЦНИИСом в содружестве с СибЦНИИСом и Союздорнии были подготовлены дополнения (№ 1 и № 2) к ВСН 176-78. Они были направлены на расширение области применения МГТ на автомобильные дороги III и IV категорий в условиях тундры и лесотундры Западной Сибири и в других районах СССР с аналогичными условиями. Также были даны новые нормативные требования по строительству МГТ на вечномёрзлых и оттаивающих грунтах и под высокими насыпями.

Развитие нормативной базы и применение МГТ на современном этапе. В годы перестройки активного развития в области применения гофрированных структур не наблюдалось. И к началу 2000-х значительная часть рекомендаций, содержащихся в инструкции ВСН 176-78, уже нуждалась в корректировке и актуализации, например, по части применяемых материалов и накопленного опыта строительства и эксплуатации МГТ в различных условиях, прежде всего в сейсмичных районах и в районах с вечномёрзлыми

грунтами. Также освоенное производство готовых комплектов гофрированных металлических труб в г. Алексин Московской области и в г. Бийск Алтайского края рассчитано на трубы с отверстиями диаметром до 3 м. В отношении водопропускных труб с отверстиями более 3 м технические указания или отечественные нормативные документы отсутствовали. Тем временем с середины 90-х в отечественной практике строительства такие сооружения стали появляться, к примеру трубы круглого и эллиптического очертания шведско-финской компании ViaCon [19]. Они представляли собой импортные поставки с импортным инженерным сопровождением. Проблема заключалась в том, что зарубежная нормативная документация в отношении МГТ в полной мере не учитывала условия России, например, сочетание мерзлотных и сейсмических процессов, требования к созданию грунтовой обоймы и к защите от коррозии. Стоит также заметить, что зарубежные стандарты во многом основывались на эмпирических данных и формулах, что также вызывало сомнения в надежности использования данного подхода.

Всё вышеперечисленное явилось предпосылками к уточнению отечественной нормативной базы в области проектирования и строительства МГТ, и 17 июня 2002 года вышли Методические рекомендации по применению металлических гофрированных труб, утвержденные распоряжением Министерства транспорта РФ № ОС-542-р. Данным распоряжением также рекомендовалось использование МГТ при строительстве и реконструкции дорог Сибири и Дальнего Востока. Примерно в это же время на отечественном рынке появляются новые производители МГТ, например, предприятие ЗАО «Гофросталь», образованное в 2002 г., расширяется ассортимент выпускаемых типов сечений и гофр. А в 2009 г. в развитие нормативной базы взамен инструкции ВСН 176-78 выходят «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур» ОДМ 218.2.001-2009. Появление актуальных нормативных документов, хоть и носящих рекомендательный характер, явилось хорошим стимулом для наращивания темпов строительства МГТ. В частности, территориальное управление автомобильных дорог Новосибирской области (ГБУ НСО ТУАД) при переустройстве аварийных малых и средних мостов, бетонных и железобетонных труб целенаправленно использовало возможности устройства гофрированных водопропускных труб. В 2005 г. ЗАО «СибЦНИИТС» по заданию ГБУ НСО ТУАД разработало целевую региональную программу совершенствования искусственных сооружений. В ходе ее разработки были проанализированы около ста малых и средних мостов с неудовлетворительным и аварийным состоянием, и 33 из них рекомендованы для переустройства с водопропускными трубами из гофрированного металла. До 2005 г. были построены и введены в эксплуатацию 12 МГТ и 15 комбинированных труб. В 2005-2008 гг. подрядными организациями ГБУ НСО ТУАД построены еще 9 труб с использованием гофрированного металла в шести районах области [20].

В последнее десятилетие востребованность и популярность МГТ планомерно растет. В первую очередь это находит отражение в увеличении фонда нормативной документации. В 2017 г. выходят «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из спиральновитых металлических гофрированных труб» ОДМ 218.2.087-2017. В этом же году в СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» вводится понятие «мостовое сооружение из металлических гофрированных элементов», обозначаются область применения и нормы проектирования данных конструкций. В 2018 г. вводится СП 445.1325800.2018 «Водопропускные трубы и системы водоотвода в районах вечной мерзлоты», где большое внимание уделено гофрированным трубам, что неудивительно, учитывая полезные для мерзлотных грунтов особенности данного типа конструкций. В 2020 г. выходят сразу два методических документа: ОДМ 218.2.110-2020 «Методические рекомендации по гидравлическим расчетам спиральновитых металлических гофрированных труб» и ОДМ 218.4.4.001-2020 «Методика оценки долговечности спиральновитых

металлических гофрированных труб, используемых в дорожном строительстве», где впервые затрагивается вопрос оценки надежности МГТ.

Единственным нормативным документом, регламентирующим расчет конструкций МГТ на прочность, жесткость и устойчивость, является ОДМ 218.2.001-2009 (применяемый на добровольной основе). Однако методика расчета в нем практически идентична описанной в ВСН 176-78, вышедшем в свет более 40 лет назад, что не совсем отвечает современным требованиям, а основным нововведением стали рекомендации по расчету МГТ большого диаметра и некругового очертания с помощью МКЭ. Результаты же, получаемые с помощью нормативных методик, не всегда качественно соотносятся с экспериментальными данными [23], что заставляет задуматься о необходимости уточнения расчетных рекомендаций и корректировки области применения методик. Метод конечных элементов (МКЭ), занимающий сейчас доминирующее положение при расчете всевозможных типов конструкций нашёл широкое применение и при расчете МГТ. К очевидным плюсам данного метода можно отнести его универсальность, возможность рассчитывать конструкции с любой геометрией, а также моделировать грунтовой массив вокруг тела трубы и получать поля напряжений в нем. Множество работ посвящено применению данного метода к оценке МГТ [4, 5, 27, 30, 37], однако в подавляющем большинстве случаев используется двумерная постановка, что является существенным упрощением и не позволяет учесть пространственную работу конструкции.

О повышенном интересе к водопропускным трубам из гофрированного металла в последние годы также свидетельствует рост научных публикаций по данной теме. Количественные данные по публикациям, связанным с гофрированными водопропускными трубами приведены в таблице. Данные взяты с сайта elibrary.ru за период его существования с 2000 по 2021 гг. Из них видно, насколько больше внимания стало уделяться МГТ в последнее десятилетие.

Временной период	Количество публикаций
2000 – 2004	0
2005 – 2009	3
2010 – 2014	22
2015 – 2021	30

При качественном анализе можно выделить несколько основных направлений исследований по данному вопросу. Это исследование особенностей гидравлической работы МГТ, примерно 27 % всех публикаций, рассмотрение вопросов надежности – 9 % и оценка прочности и устойчивости МГТ – 12 %.

Помимо основных направлений развития как в отечественных, так и в зарубежных работах можно выделить наиболее перспективные и актуальные темы. Например, вопрос о несовершенствах, возникающих в процессе эксплуатации, их моделирование и влияние на НДС [22, 29, 39, 40], оценка состояния уложенных труб [20], применение новых материалов [41].

Выводы. Резюмируя накопленный опыт в вопросе расчета МГТ можно отметить большое количество подходов и методов, применяемых для оценки НДС труб. Это – нормативная методика, представленная в инструкции ОДМ 218.2.001-2009; метод конечных элементов (МКЭ) в плоской и в пространственной постановке; методики и алгоритмы, разработанные для других подземных сооружений (тоннели, крепи, жесткие трубы), но нашедшие применение при оценке работы МГТ; методы строительной механики (стержневые модели для плоской постановки, модели на базе теории оболочек для пространственной постановки). Такое разнообразие объясняется тем, что ни одна из них не

является универсальной и не дает постоянной удовлетворительной сходимости результатов к экспериментальным данным.

В развитие расчетного аппарата для МГТ можно рекомендовать структурировать существующие методики расчета, четко определить область применения и назначение каждой из них. Например, МКЭ в трехмерной постановке требует большого количества исходных данных и сложен в корректировке, что сильно расходует временной и машинный ресурс. Такой аппарат уместно использовать при проектировании МГТ со сложной геометрической формой, большими пролетами или сложными, скорее даже уникальными, геологическими условиями. Методы строительной механики хорошо подходят для формирования прикладных методик расчета НДС эксплуатируемых и вновь проектируемых труб с учетом различных дефектов (коррозионное разрушение лотка трубы, размывание основания, деформация поперечного сечения). Следующим шагом по популяризации и развитию МГТ должен стать нормативный документ, применяемый на обязательной основе при проектировании, строительстве и эксплуатации гофрированных труб. В этом документе должны быть доработаны, а возможно и переработаны, разделы, посвященные области применения и расчетам труб. Для этого нужно интегрировать структурную базу накопленных расчетных методов, содержащих исчерпывающие и четкие указания по их применению. А разделы, посвященные материалам и конструированию должны отвечать современным стандартам и включать использование инновационных разработок в этом направлении. Отдельно хочется обратить внимание на вопрос оценки надежности труб из МГК. Ввиду сильной зависимости данного типа конструкций от разброса геометрических и физических параметров (самой трубы и грунта засыпки), следует производить расчет надежности и долговечности как новых, так и возведенных труб.

Также следует более серьезно подходить к мониторингу состояния эксплуатируемых труб из МГК и прописать регламент для диагностических мероприятий. В настоящее время обследования и испытания мостов и труб регламентируются общим документом СП 79.13330.2012 «Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний» и трубам из МГК там уделено недостаточно внимания. Предлагаемый же регламент должен включать помимо визуальных и инструментальных измерений упрощенные методики расчета напряженно-деформированного состояния, надежности и остаточного ресурса МГТ с учетом их текущего состояния и обнаруженных дефектов. Характерные для МГТ дефекты следует обобщить, сформировать их перечень, классифицировать по критерию наибольшей опасности для дальнейшей работы и предусмотреть мероприятия по устранению или купированию каждого дефекта. При этом все проводимые в ходе обследований мероприятия, будь то измерения или расчеты не должны быть трудоемкими, чтобы экономить временной ресурс и сохранять рентабельность, а все отчетные документы к данным мероприятиям должны иметь унифицированную форму. Такой подход поможет проводить грамотную профилактику развития серьезных скрытых и явных дефектов МГТ и позволит вывести на нормативный срок службы значительно больший процент возводимых сооружений из МГК.

Библиографический список

1. Водопропускные трубы под насыпями / Е.А. Артамонов, Г.Я. Волченков, Р.С. Клейнер, Р.Е. Подвальный, А.С. Потапов, К.Б. Щербина, О.А. Янковский. – М.: Транспорт, 1982. – 232 с.
2. Бугаева О.Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей. – Л.: Тип. ВВИТКУ, 1963. – 100 с.
3. Герцог А.А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах. – М.: Гушосдор, 1939. – 112 с.
4. Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния системы "Металлическая гофрированная труба (МГТ) - основание - насыпь" на основе МКЭ / Н.И. Горшков,

- М.А. Краснов, А.Д. Ловцов, В.С. Фёдорова // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3 (74). – С. 152-160.
5. Гришина А.С., Бирин А.С. Анализ напряженно-деформированного состояния водопропускного сооружения из металлических гофрированных структур // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 4. – С. 76-90.
 6. Емельянов Л.М. О расчете подземных гибких труб // Строительная механика и расчет сооружений. – 1961. – Вып. 1. – С. 1-7.
 7. Жинкин А. Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – Вып. 5. – С. 53-54.
 8. Забелин С. Строительство металлических гофрированных труб // Автомобильные дороги. – 1975. – Вып. 2. – С. 17-18.
 9. Иванов А.П., Липнягов Б.А. Металлические гофрированные трубы на линии Тюмень-Сургут // Транспортное строительство. – 1973. – Вып. 5. – С. 8-10.
 10. Казначеева Е.Ф. Засыпка пазух под нижней частью гофрированных труб // Транспортное строительство. – 1980. – Вып. 3. – С. 3-4.
 11. Кисельников О.В. Недостатки в проектировании и строительстве дорожных труб // Автомобильные дороги. – 1970. – Вып. 3. – С. 10-11.
 12. Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. – М.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
 13. Колоколов Н.М., Левин Б.И., Янковский О.Я. Гофрированные стальные конструкции в искусственных сооружениях // Транспортное строительство. – 1967. – Вып. 10. – С. 56-58.
 14. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н.М. Колоколов, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, С.Э. Черняховская. – М.: Транспорт, 1973. – 120 с.
 15. О применении водопропускных труб из гофрированного металла / Н.М. Колоколов, Б.И. Левин, О.Я. Янковский, К.Б. Щербина // Транспортное строительство. – 1970. – Вып. 1. – С. 13-15.
 16. Опытное строительство гофрированных водопропускных труб / А.И. Кондратюк, Э.Г. Храковский, Б.И. Нечаев, К.Б. Щербина // Транспортное строительство. – 1978. – Вып. 2. – С. 5-7.
 17. Крюков А.С. Металлические гофрированные трубы под насыпями // Транспортное строительство. – 1969. – Вып. 2. – С. 42-44.
 18. Лисов В.М. Совершенствование водопропускных труб // Автомобильные дороги. – 1982. – Вып. 7. – С. 9-10.
 19. Марьемая П. Гофрированные металлические трубы на водотоках и для пропуска транспорта и пешеходов // Автомобильные дороги. – 1998. – Вып. 7. – С. 18-19.
 20. Молчанов В.С., Симонов А.А., Просеков С.А. Переустройство малых мостов на автомобильных дорогах Новосибирской области в водопропускные трубы из гофрированного металла // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 21. – С. 156-163.
 21. Никифоров А.С., Каменцев В.П., Рояк Г.С. Применение гофрированных труб в Западной Сибири // Транспортное строительство. – 1985. – Вып. 4. – С. 17.
 22. Овчинников И.Г., Осокин И.А. О возможности применения теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова к расчету металлических гофрированных конструкций // Наукоедение. – 2014. – Вып. 4. – 19 с.
 23. Осокин И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб // Наукоедение. – 2013. – Вып. 2. – 13 с.
 24. Попов Б.И., Злочевский А.П., Линевиц Г.Б. Водопропускные трубы на дорогах Крайнего Севера // Автомобильные дороги. – 1972. – Вып. 4. – С. 29-30.

25. Взаимодействие гофрированных труб с грунтом в процессе их засыпки / А.С. Потапов, Е.Ф. Казначеева, З.М. Палькина, М.Г. Раткевич // Транспортное строительство. – 1978. – Вып. 5. – С. 43-45.
26. Потапов А.С., Раткевич М.Г., Щербина К.Б. Инструментальные наблюдения за металлическими гофрированными трубами на линии Тюмень-Сургут // Транспортное строительство. – 1973. – Вып. 8. – С. 15-16.
27. Тимчук Д.В., Ловцов А.Д. Особенности расчета гофрированной водопропускной трубы // Материалы секционных заседаний 60-й студенческой научно-практической конференции ТОГУ: материалы конф.: в 2 т. – Хабаровск, 2020. – С. 188-192.
28. Опыт строительства гофрированных водопропускных труб / В.П. Чернавский, С.А. Фейтельман, П.Д. Стрельников, П.К. Калейс, Н.С. Минзар // Транспортное строительство. – 1979. – Вып. 1. – С. 8-10.
29. Черников А.В., Козлов В.А. Определение напряженно-деформированного состояния гофрированных водопропускных труб с эксплуатационными дефектами на основе полубезмоментной теории оболочек // Строительная механика и конструкции. – 2021. – № 2 (29). – С. 12-28.
30. Шапиро Д.М., Тютин А.П. Численный упругопластический расчет дорожных водопропускных труб // Строительная механика и конструкции. – 2015. – № 2 (11). – С. 66-71.
31. Многоочковая гофрированная труба под высокой насыпью / О.М. Шапошник, Л.Б. Кудрявцев, М.Г. Раткевич, Е.Ф. Казначеева, З.М. Палькина // Транспортное строительство. – 1983. – Вып. 2. – С. 14-16.
32. Щербина К.Б. К оценке несущей способности стальных гофрированных водопропускных труб // Транспортное строительство. – 1973. – Вып. 9. – С. 46-48.
33. Янковский О.А., Щербина К.Б. Дорожные трубы из волнистой стали // Автомобильные дороги. – 1968. – Вып. 11. – С. 12-14.
34. Янковский О.А. Нормативный документ по гофрированным трубам // Транспортное строительство. – 1979. – Вып. 2. – С. 59-60.
35. Янковский О.А., Желтов О.Е. Опытное строительство металлических гофрированных водопропускных труб // Транспортное строительство. – 1973. – Вып. 2. – С. 14-16.
36. Ярошенко В.А., Андреев О.В., Прокопович А.Г. Водопропускные трубы под железнодорожными насыпями. – М.: Трансжелдориздат, 1952. – 232 с.
37. Research on design parameters of double hole corrugated pipe culvert / C. Hao, L. Liu, Z. Wang, S. Wan // Advances in Engineering Research. 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). – 2018. – Vol. 170. – P. 184-189.
38. Piratla, K.R., Jin H., Y. Sepideh A Failure Risk-Based Culvert Renewal Prioritization Framework // Infrastructures. – 2019. – Vol. 4. – №3. – 14 p.
39. Effect of Deterioration on the Performance of Corrugated Steel Culverts / Van Thien Mai, Neil A. Hoult, Ian D. Moore // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2014. – Vol. 140. – №32. – 11 p.
40. Nakhostin E., Kenny S., Sivathayalan S. Buried Corrugated Steel Culvert Failure Mechanisms Due to Environmental Deteriorations // International Conference on Sustainable Infrastructure. – 2019. – P. 29-40.
41. Kolisoja P., Kalliainen A. Modelling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D // Procedia Engineering. Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). – 2016. – Vol. 143. – P. 427-434.

References

1. Artamonov E.A., Volchenkov G.Ya., Kleiner R.S., Podvalny R.E., Potapov A.S., Shcherbina

- K.B., Yankovsky O.A. Culverts under embankments. M.: Transport, 1982. 232 p.
2. Bugaeva O.E. Design of lining of transport tunnels. L.: Type. VVITKU, 1963. 100 p.
 3. Duke A.A. Corrugated pipes on highways. M.: Gushosdor, 1939. 112 p.
 4. Gorshkov N.I., Krasnov M.A., Lovtsov A.D., Fedorova V.S. Analysis and assessment of the stress-strain state of the system "Metal corrugated pipe (MHT) - base - embankment" on the basis of FEM. Bulletin of Civil Engineers. No. 3(74). 2019. Pp. 152-160.
 5. Grishina A.S., Birin A.S. Analysis of the stress-strain state of a culvert made of corrugated metal structures. Transport. Transport Facilities. Ecology. No. 4. 2017. Pp. 76-90.
 6. Emelyanov L.M. On the calculation of underground flexible pipes. Structural Mechanics and Calculation of Structures. Issue. 1. 1961. Pp. 1-7.
 7. Zhinkin A. Problems and prospects of typical design of metal corrugated structures. Transport of the Russian Federation. Issue. 5. 2006. Pp. 53-54.
 8. Zabelin S. Construction of metal corrugated pipes. Highways. Issue. 2. 1975. Pp. 17-18.
 9. Ivanov A.P., Lipnyagov B.A. Corrugated metal pipes on the Tyumen-Surgut line. Transport Construction. Issue. 5. 1973. Pp. 8-10.
 10. Kaznacheeva E.F. Backfilling of sinuses under the lower part of corrugated pipes. Transport Construction. Issue. 3. 1980. Pp. 3-4.
 11. Kiselnikov O.V. Disadvantages in the design and construction of road pipes. Highways. Issue. 3. 1970. Pp. 10-11.
 12. Klein G.K. Calculation of underground pipelines. M.: Stroyizdat, 1969. 240 p.
 13. Kolokolov N.M., Levin B.I., Yankovsky O.Ya. Corrugated steel structures in artificial structures. Transport Construction. Issue. 10. 1967. Pp. 56-58.
 14. Kolokolov N.M., Yankovsky O.A., Shcherbina K.B., Chernyakhovskaya S.E. Metal corrugated pipes under embankments. M.: Transport, 1973. 120 p.
 15. Kolokolov N.M., Levin B.I., Yankovsky O. Ya., Shcherbina K.B. About the use of culverts from corrugated metal. Transport Construction. No. 1. 1970. Pp. 13-15.
 16. Kondratyuk A.I., Khrakovsky E.G., Nechaev B.I., Shcherbina K.B. Pilot construction of corrugated culverts. Transport Construction. Issue. 2. 1978. Pp. 5-7.
 17. Kryukov A.S. Metal corrugated pipes under embankments. Transport Construction. Issue. 2. 1969. Pp. 42-44.
 18. Lisov V.M. Improvement of culverts. Highways. Issue. 7. 1982. Pp. 9-10.
 19. Mar'emaya P. Corrugated metal pipes on watercourses and for the passage of vehicles and pedestrians. Highways. Issue. 7. 1998. Pp. 18-19.
 20. Molchanov V.S., Simonov A.A., Prosekov S.A. Reconstruction of small bridges on highways of the Novosibirsk region into culverts made of corrugated metal. Bulletin of the Siberian State University of Railways. No. 21. 2009. Pp. 156-163.
 21. Nikiforov A.S., Kamentsev V.P., Royak G.S. Application of corrugated pipes in Western Siberia. Transport Construction. Issue. 4. 1985. P. 17.
 22. Ovchinnikov I.G., Osokin I.A. On the possibility of applying the theory of semi-momentless shells V.Z. Vlasova to the calculation of metal corrugated structures. Science. Issue. 4. 2014. 19 p.
 23. Osokin I.A. Application of the theory of shells of revolution to the calculation of corrugated culverts. Science. Issue. 2. 2013. 13 p.
 24. Popov B.I., Zlochevsky A.P., Linevich G.B. Culverts on the roads of the Far North. // Highways. Issue. 4. 1972. P 29-30.
 25. Potapov A.S., Kaznacheeva E.F., Palkina Z.M., Ratkevich M.G. Interaction of corrugated pipes with soil in the process of their filling. Transport Construction. Issue. 5. 1978. Pp. 43-45.
 26. Potapov A.S., Ratkevich M.G., Shcherbina K.B. Instrumental observations of corrugated metal pipes on the Tyumen-Surgut line. Transport Construction. Issue. 8. 1973. Pp. 15-16.
 27. Timchuk D.V., Lovtsov A.D. Features of the calculation of a corrugated culvert. Materials of

- Sectional Sessions of the 60th Student Scientific and Practical Conference PNU: Materials of the Conference: in 2 Volumes. Khabarovsk, 2020. Pp. 188-192.
28. Chernavsky V.P., Feitelman S.A., Strelnikov P.D., Kaleis P.K., Minzar N.S. Experience in the construction of corrugated culverts. *Transport Construction*. Issue. 1. 1979. Pp. 8-10.
 29. Chernikov A.V., Kozlov V.A. Determination of the stress-strain state of corrugated culverts with operational defects based on the semi-momentless theory of shells. *Structural Mechanics and Constructions*. No. 2(29). 2021. Pp. 12-28.
 30. Shapiro D.M., Tyutin A.P. Numerical elastoplastic calculation of road culverts. *Structural Mechanics and Constructions*. No. 2(11). 2015. Pp. 66-71.
 31. Shaposhnik O.M., Kudryavtsev L.B., Ratkevich M.G., Kaznacheeva E.F., Palkina Z.M. Multi-point corrugated pipe under a high embankment. *Transport Construction*. Issue. 2. 1983. Pp. 14-16.
 32. Shcherbina K.B. To the assessment of the bearing capacity of corrugated steel culverts. *Transport Construction*. Issue. 9. 1973. Pp. 46-48.
 33. Yankovsky O.A., Shcherbina K.B. Road pipes made of corrugated steel. *Highways*. Issue. 11. 1968. Pp. 12-14.
 34. Yankovsky O.A. Normative document on corrugated pipes. *Transport Construction*. Issue. 2. 1979. Pp. 59-60.
 35. Yankovsky O.A., Zheltov O.E. Experimental construction of metal corrugated culverts. *Transport Construction*. Issue. 2. 1973. Pp. 14-16.
 36. Yaroshenko V.A., Andreev O.V., Prokopovich A.G. Culverts under railway embankments. M.: Transzheldorizdat, 1952. 232 p.
 37. Hao S., Liu L., Wang Z., Wan S. Research on design parameters of double hole corrugated pipe culvert. *Advances in Engineering Research*. 7th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2018). Vol. 170. 2018. Pp. 184-189.
 38. Piratla K.R., Jin H., Sepideh Y. A failure risk-based culvert renewal prioritization framework. *Infrastructures*. Vol. 4. No. 3. 2019. 14 p.
 39. Van Thien Mai, Neil A. Hoult, Ian D. Moore effect of deterioration on the performance of corrugated steel culverts. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*. Vol. 140. No. 32. 2014. 11 p.
 40. Nakhostin E., Kenny S., Sivathayalan S. Buried corrugated steel culvert failure mechanisms due to environmental deteriorations. *International Conference on Sustainable Infrastructure*. 2019. Pp. 29-40.
 41. Kolisoja P., Kalliainen A. Modeling of Plastic Culvert and Road Embankment Interaction in 3D. *Procedia Engineering*. *Advances in Transportation Geotechnics 3*. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016). Vol. 143. 2016. Pp. 427-434.

BRIEF HISTORICAL REVIEW OF THE USE OF CORRUGATED CULVERTS AND THEIR APPLICATION AT THE PRESENT STAGE

A. V. Chernikov¹, V. A. Kozlov²

Voronezh State Technical University^{1,2}
Russia, Voronezh

¹Graduate Student of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(920)2467077, e-mail: chernickov-andrei@yandex.ru

²Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Structural Mechanics, Tel.: +7(473)2764006, e-mail: vakozlov@vgasu.vrn.ru

The article provides a historical overview of the main stages in the development of corrugated metal culverts (CMC) in our country and an analysis of the applied calculation methods. The assessment of the current state of the issue has been carried out. The main trends in this direction are highlighted and the further ways of development of the CMC are indicated.

Keywords: corrugated metal culvert (CMC), corrugated metal structures (CMS), culvert, historical review.

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА АДДИТИВНЫХ СТРУКТУР
ПРИ РАЗНОЙ МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ
СЕЧЕНИЙ ОБРАЗЦОВ**

А. Ю. Перельгина¹, Т. Я. Дружинина², С. А. Антипин³, Ю. А. Бобылева⁴

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»^{1,2,3,4}
Россия, г. Иркутск

¹Канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой инженерной и компьютерной графики, тел.: +7(3952)405373, e-mail: perelygina@istu.edu

²Канд. техн. наук, доцент кафедры механики и сопротивления материалов, тел.: +7(3952)405144, e-mail: dr@istu.edu

³Аспирант кафедры инженерной и компьютерной графики, тел.: +7(3952)405373, e-mail: sergey.antipin.98@mail.ru

⁴Младший научный сотрудник кафедры инженерной и компьютерной графики, тел.: +7(3952)405373, e-mail: bobylevajuliaal@yandex.ru

В статье рассматривается вопрос определения механических характеристик материала аддитивных структур с учетом таких параметров печати, как процент заполнения и направление нитей печати. В исследованиях использовались три типоразмера стандартизированных образцов на центральное растяжение, изготовленных с применением технологии 3D-печати. В ходе экспериментов было установлено, что при определении механических характеристик материала необходимо отходить от гипотезы однородности и сплошности материала, принятой в сопротивлении материалов. Для определения значений механических характеристик у образцов разных типоразмеров была предложена методика по расчету реальной площади поперечного сечения исследуемой структуры. В статье приведены диаграммы растяжения и рассчитанные по ним механические характеристики материала аддитивных структур, а также рассмотрен вопрос влияния отношения площади структуры к площади ограждения на механические характеристики материала.

Ключевые слова: механические характеристики материала аддитивных структур, 3D-печать, PetG термопластик, структура и ограждение изделия, процент заполнения, реальная площадь поперечного сечения.

Введение. Широкие возможности аддитивных технологий делают их актуальными в современном мире цифрового производства [1-4]. В настоящее время их функционал значительно увеличился от прототипирования к конструкциям, воспринимающим рабочие нагрузки [2, 3, 5-8]. Причём охвачены такие высокотехнологичные сферы производства, как авиастроение, кораблестроение, машиностроение, приборостроение, сфера медицинской инженерии.

В частности, интересна технология трёхмерной печати, или 3D-печати, именуемая FDM – печатью (Fused Deposition Modeling). В её основе лежит экструзионная печать, когда под воздействием экструдера исходный материал нагревается до заданной температуры и выдавливается через сопло, формируя слой за слоем требуемое изделие в соответствии с электронной моделью. Интересна данная технология простотой в исполнении,

возможностью создания деталей практически любой сложности и доступностью для пользователей в диапазоне от промышленной до бытовой сфер. Это обусловило предложение на рынке 3D-принтеров различной ценовой категории с разнообразными техническими возможностями. В этой связи данное направление 3D-печати стремительно развивается и для ряда изделий становятся важными вопросы оценки их прочности и жесткости. А значит, актуальными можно считать и вопросы оценки прочности такого рода изделий [3, 5, 6, 9-11].

В частности, в области медицины аддитивные технологии стали чрезвычайно востребованными во многих направлениях [4, 7, 10, 12, 13], например: в изготовлении имплантов, протезировании, стоматологии и т.д. И здесь модель прототипа должна учитывать наряду с геометрическими параметрами еще и физико-механические характеристики. Поэтому важно при изготовлении 3D-изделия добиться прочности и жёсткости, соответствующих прототипу.

Описание проблемы. Студентами Иркутского национального исследовательского технического университета в инновационном бюро «Авиатор» ведётся разработка бионического протеза руки для инвалидов, лишённых лучезапястного сустава. Наряду с обеспечением широкого функционала протеза к числу главных достоинств разработки относится доступная цена. Было решено выполнять детали протеза с помощью аддитивной технологии – экструзионной печати пластиком. Для изготовления деталей протеза предполагаются недорогие и доступные широкому кругу потребителей материалы: ABS пластик, PetG пластик.

Рабочие характеристики бионического протеза руки требуют ответственно отнестись к его прочностной надёжности. Конструкция протеза (рис. 1) представляет собой сложную структуру, элементы которой одновременно находятся в разных напряжённо-деформированных состояниях. Причём по понятной причине эти состояния меняются в процессе использования протеза. Согласно классической теории прочности оценка параметров напряжённо-деформированного состояния тела требует знания механических характеристик материала, из которого оно выполнено [14]. При этом в основе теории лежит ряд гипотез, принципов и допущений, подтвержденных экспериментально. Важной составляющей теории являются гипотезы о свойствах материала, в частности, об однородности и сплошности материала в пределах объёма исследуемого тела [15]. При этом не забывают о природной дискретности материала. На такой модели свойств материала основывается схематизация внутренних сил деформированного тела.

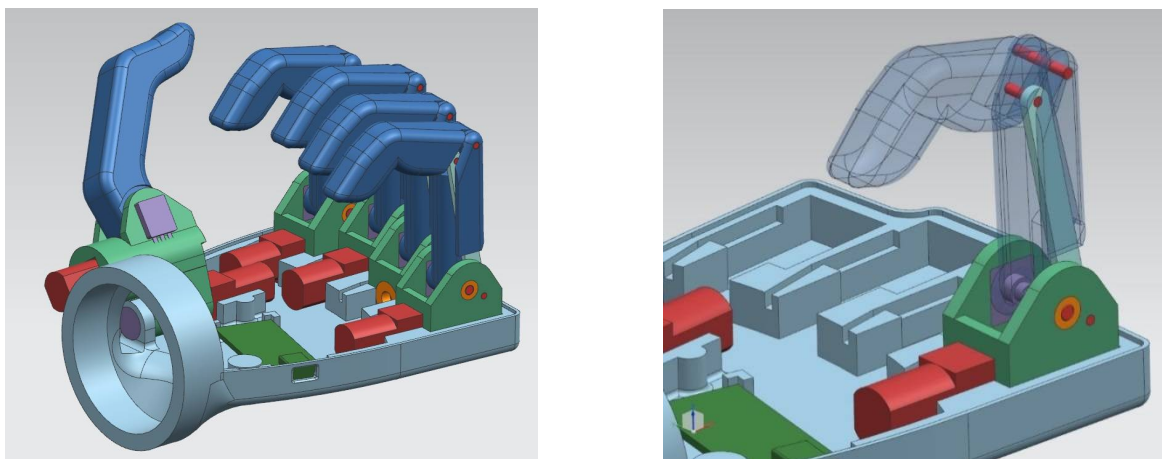


Рис. 1. Конструкция бионического протеза руки

Сочетание данной теории, информации о механических характеристиках материалов и современных технологий автоматизации инженерных расчётов позволяет рассчитывать

конструкции практически любой сложности с высокой долей достоверности результатов. Однако применяемая аддитивная технология для изготовления основных частей бионического протеза руки не дает возможности оценить параметры напряжённо-деформированного состояния конструкции, опираясь на классическую теорию прочности. Учитывая то, как формируется содержимое объёма, занимаемого телом [16, 17], ставится под вопрос применение гипотез об однородности и сплошности материала. В этом случае следует учитывать ту структуру, которая формируется из филамента соответствующего материала [18]. При этом решение данной задачи осуществляется не на микро-, а на макроуровне, поскольку оценка структурных составляющих коррелируется с категориями, соизмеримыми с диаметром сопла экструдера.

Для определения параметров прочности и жесткости изделия необходимо знать механические характеристики материалов филамента, то есть мононити сырья. Как правило, производитель их заявляет. Однако данной информации недостаточно для оценки прочности и жёсткости самого изделия. Практика показывает, что эти характеристики у нити и у изделия не совпадают. В частности, прочность изделия ниже прочности мононити сырья [14, 18]. Причём величина этого отклонения зависит от факторов, обусловленных как режимом печати, так и структурой, заполняющей объём изделия [9, 19-23].

Информация об исследованиях параметров напряжённо-деформированного состояния изделий, выполненных 3D-печатью, разрозненна и, как следствие, не систематизирована. Обычно это испытания образцов или готовых изделий с доведением их до нарушения целостности и фиксации на этом этапе значения соответствующего параметра состояния прочности или жёсткости, причём с применением терминологии, актуальной в рамках гипотезы об однородности и сплошности материала [20, 22-24].

Специфика конструкции протеза кисти руки такова, что натурные эксперименты, предоставляющие информацию о прочности и жёсткости конструкции при всех возможных способах нагружения, невозможны, потому что, не считая других причин, количество экспериментальных образцов из-за разнообразных случаев нагружения велико.

Однако гарантия надёжности изделия необходима, а также нужен глубокий анализ конструкции, содержащий достоверный расчёт прочности и жёсткости. Следовательно, требуется корректное описание поведения материала нагруженной конструкции. В этом случае без экспериментальных исследований поведения нагруженных образцов не обойтись.

Есть информация о прочностных характеристиках литых пластиковых образцов, в то время как для расчёта бионического протеза руки требуются характеристики образцов, послойно напечатанных на 3D-принтере. На данном этапе создания бионического протеза руки актуальна информация о поведении материалов при статических нагружениях.

В настоящей статье предлагается методика определения механических характеристик материала аддитивной структуры, изготовленной из термопластичного пластика PetG, а также устанавливается влияние площади поперечного сечения образцов на эти характеристики. С целью получения такого рода информации были проведены испытания образцов на центральное растяжение.

Исходные данные для эксперимента. Размеры образцов для испытания на центральное растяжение были приняты согласно ГОСТ 11262-2017 [25]. На рис. 2 представлен стандартный образец, геометрически выполненный в виде «собачей кости». Ввиду особенностей 3D-печати (в частности, минимизации материала поддержки, требуемого направления печати, габаритов пространства печати) в качестве испытуемых целесообразней использовать плоские пятикратные образцы.

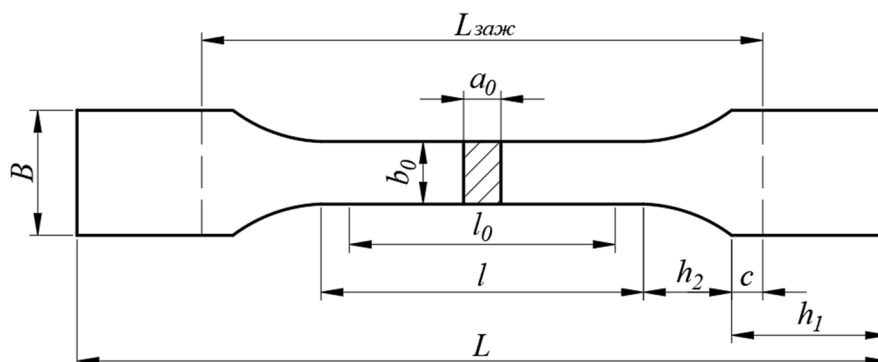


Рис. 2. Образец

Образцы были изготовлены из термопластика PetG, производства SolidFilament. Печать образцов осуществлялась на принтере Wanhao Duplicator 6 plus со скоростью печати $v_{зап} = 50$ мм/сек, температурой рабочего стола $t_{ст} = 75$ °C, температурой печати $t_{п} = 235$ °C, скоростью втягивания $v_p = 25$ мм/сек, величиной втягивания $l_p = 6$ мм. Проводились испытания образцов с 60 % заполнением и шаблоном заполнения линиями под углами $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$ к продольной оси образца (направления нитей печати периодически меняется от слоя к слою) (рис. 3).

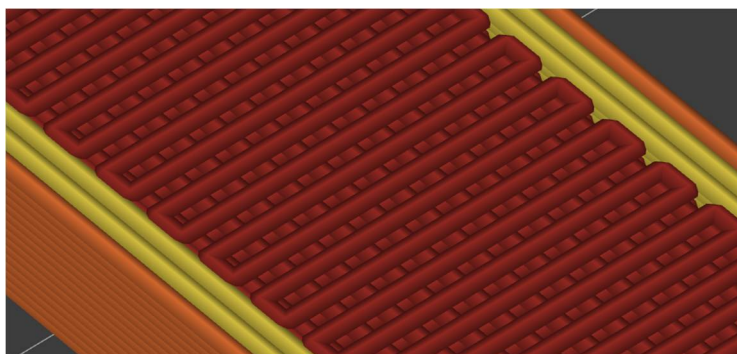


Рис. 3. Структура образца

В связи с тем, что в сфере аддитивных технологий нормативная документация по испытаниям на центральное растяжение отсутствует, размеры образцов были определены согласно ГОСТ 1497-84 [26]. Начальная расчетная длина и рабочая длина образца определялись, соответственно, по формулам:

$$l_0 = 5,65\sqrt{A_0}; \quad (1)$$

$$l = l_0 + 2\sqrt{A_0}, \quad (2)$$

где A_0 - начальная площадь поперечного сечения образца.

Экспериментальным путем было установлено, что для дальнейшего определения относительного удлинения ε важно значение длины между зажимными устройствами разрывной машины:

$$L_{заж} = l + 2h_2 + 2c, \quad (3)$$

где h_2 – длина, относящаяся к галтелям образца; c – расстояние, необходимое для равномерного распределения напряжений в образце (по 5 мм от каждой галтели).

Таким образом, общая длина образца была определена выражением:

$$L = L_{заж} + 2h_1 - 2c = l + 2h_2 + 2h_1. \quad (4)$$

Согласно нормативным документам [25, 26] и геометрическим ограничениям зажимных устройств разрывной машины Shimadzu AGS-X для испытаний на растяжение по определению физико-механических характеристик материала аддитивных структур были

выбраны сечения размером 3x10, 5x10 и 7x10 мм. Основные геометрические характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные геометрические характеристики образцов

№	a_0 мм	b_0 мм	B мм	l_0 мм	l мм	h_2 мм	h_1 мм	$L_{заж}$ мм	L мм
1	3	10	20	30	45	15	25	85	125
2	5	10	20	40	55	15	25	95	135
3	7	10	20	50	65	15	25	105	145

Для каждого типоразмера было напечатано по 10 образцов. Испытание на центральное растяжение проводилось на разрывной машине настольного типа Shimadzu AGS-X с программным обеспечением Trapezium X. Максимально возможная нагрузка испытательной машины модели Shimadzu AGS-X составляет 10 кН.

Результаты испытаний. В результате испытаний были получены диаграммы растяжения образцов в системе координат «усилие - абсолютное удлинение» ($F-\Delta l$). Согласно основной концепции сопротивления материалов для определения механических характеристик материала были построены диаграммы растяжения материала в системе координат «нормальное напряжение - относительное удлинение» ($\sigma-\varepsilon$) (рис. 4-6, а).

Для каждого типоразмера образца были построены диаграммы средних значений напряжений и по ним определены значения модуля Юнга E , предела пропорциональности $\sigma_{мп}$, условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, а также предела прочности σ_B материала (рис. 4-6, б). Для определения механических характеристик были произведены дополнительные построения вспомогательных прямых: сплошная тонкая линия – для определения значения предела пропорциональности $\sigma_{мп}$, штриховая линия – для определения значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, штрихпунктирная линия – для определения относительного удлинения при разрыве.

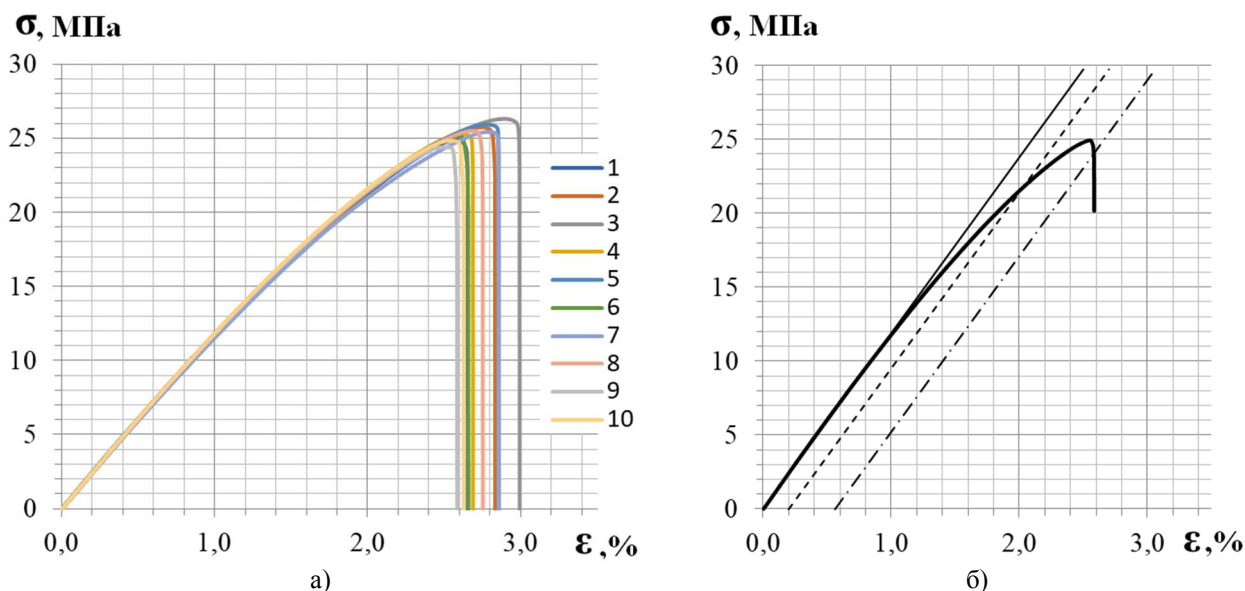


Рис. 4. Диаграммы растяжений материала с размерами образца 3x10

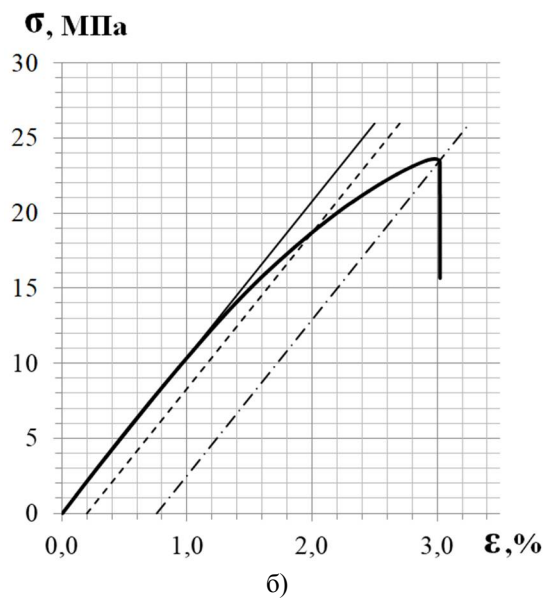
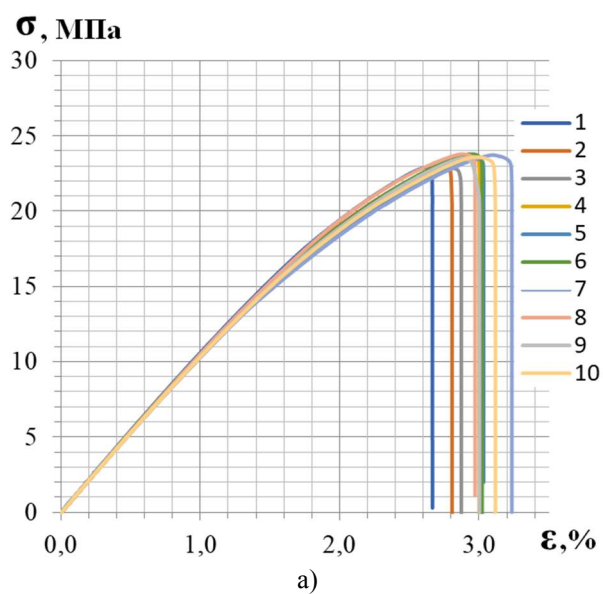


Рис. 5. Диаграммы растяжений материала с размерами образца 5x10

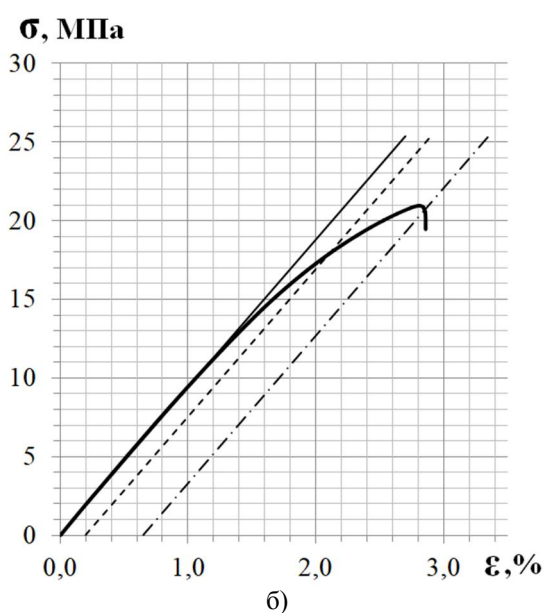
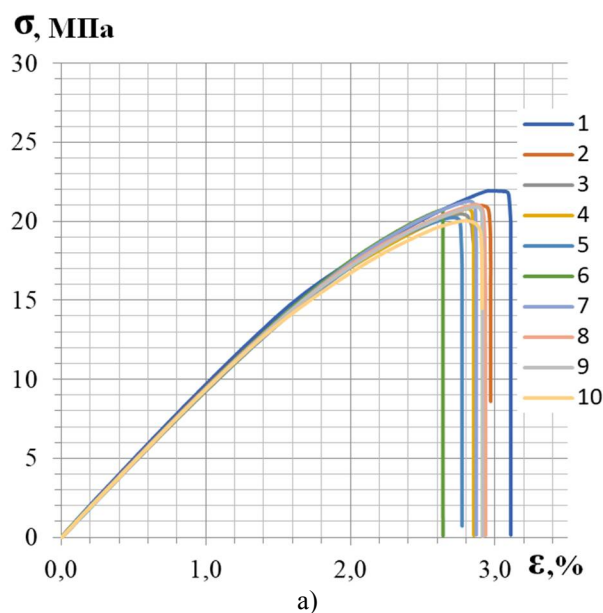


Рис. 6. Диаграммы растяжений материала с размерами образца 7x10

В табл. 2 и на рис. 7 представлены результаты расчета механических характеристик и диаграммы растяжения материала.

Таблица 2

Характеристики материала для каждого типоразмера

Типоразмер	$\sigma_{нр}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пред}$, МПа	$\epsilon_{ост}$, %	E , ГПа
3x10	11,61	21,73	24,93	0,56	1,19
5x10	11,35	18,72	23,60	0,76	1,04
7x10	11,44	17,89	20,96	0,65	0,94

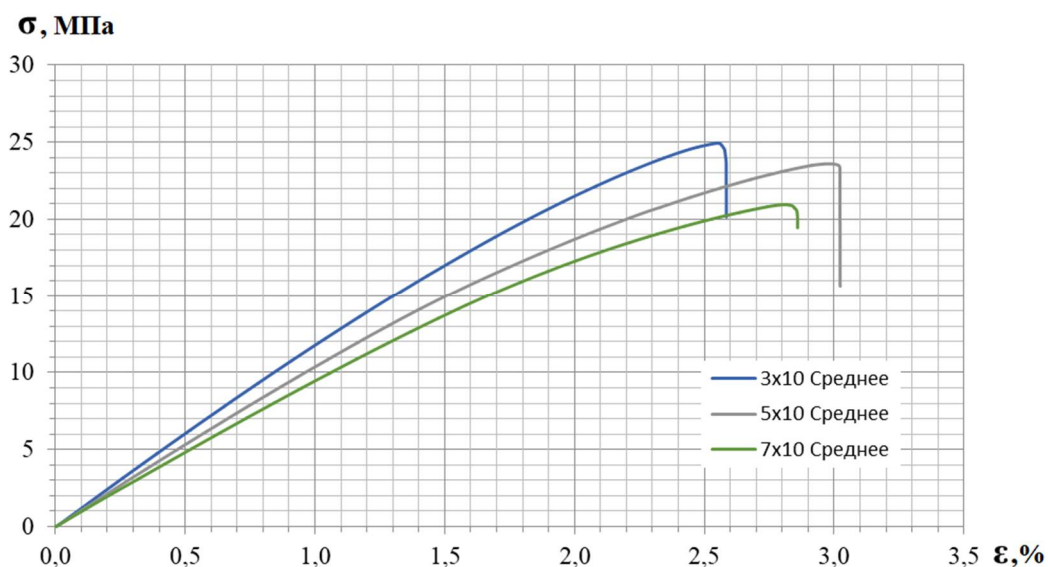


Рис. 7. Диаграммы растяжения материала (структуры)

Согласно табл. 2 и рис. 7 значения условного предела текучести, предела прочности и модуля Юнга зависят от начальной площади поперечного сечения и при её увеличении значения этих механических характеристик уменьшаются. В то же время изменение размеров образца практически не влияет на предел пропорциональности. Судя по явно выраженному участку пропорциональности и значениям остаточного относительного удлинения можно утверждать, что материал относится к упруго-пластичному. Однако, исходя из концепции сопротивления материалов при идентичных условиях изготовления образцов, их площадь поперечного сечения не должна влиять на механические характеристики материала.

Таким образом, недостаточно слепо использовать основы сопротивления материалов для определения механических характеристик материала аддитивных структур, необходимо учитывать внутреннее строение образца (см. рис. 3 и [27]). Авторами статьи была предпринята попытка разработать методику определения площади поперечного сечения образца с учетом особенностей 3D-печати на примере 60% заполнения.

Методика определения площади поперечного сечения для случая 60% заполнения. Детали, изготавливаемые по технологии FDM - печати (метода послойного наплавления), состоят из внешней и внутренней частей. Внешняя часть создаваемого изделия является сплошной, образует его внешний вид и называется ограждением (обозначена на рис. 3 и 8 оранжевым и желтым цветами). Внутренняя часть изготавливаемого изделия, выполняющая функцию заполнения его объемов с целью придания дополнительной прочности и жесткости, называется структурой (обозначена на рис. 3 и 8 красным цветом).

Согласно рис. 3 определение реальной площади поперечного сечения образца основывается на том, что необходимо учитывать число продольных и поперечных слоев в его поперечном сечении, количество и расположение ограждения образца. Также следует обратить внимание на тот факт, что при несплошном заполнении образца опасными являются сечения с минимальным заполнением сечения образца, где отсутствуют поперечные волокна структуры. Опасное поперечное сечение образца приведено на рис. 8, при этом цветовое отображение слоев соответствует рис. 3.

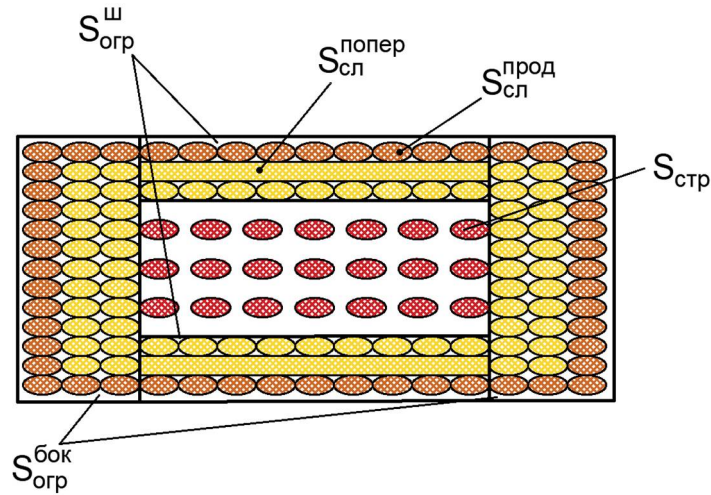


Рис. 8. Схема площадей поперечного сечения образца

Согласно рис. 8 элементарной составляющей поперечного сечения образца в случае продольных волокон является эллипс (рис. 9).

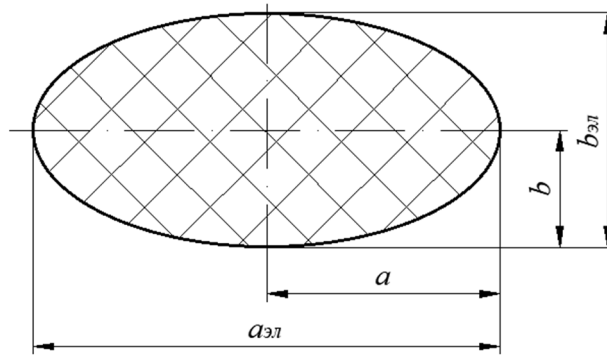


Рис. 9. Размеры эллипса, получаемого экструзией пластика из сопла

Из геометрии известно, что площадь эллипса определяется как

$$S_{сл}^{прод} = \pi \cdot a \cdot b, \quad (5)$$

где a и b – полуоси эллипса, которые из параметров печати равны 0,2 мм и 0,1 мм соответственно.

Согласно рис. 8 площадь поперечных слоев была определена по формуле:

$$S_{сл}^{попер} = b_{эл} \cdot (b_0 - a_{эл} \cdot n_{огр}^{бок}), \quad (6)$$

где $b_{эл}$ – высота эллипса, полученного экструзией пластика через сопло; b_0 – ширина рассматриваемого сечения образца (см. рис. 2 и табл. 1); $a_{эл}$ – длина эллипса, полученного экструзией пластика через сопло; $n_{огр}^{бок}$ – количество боковых слоев ограждения.

Площадь ограждения состоит из площади бокового ограждения $S_{огр}^{бок}$ и площадей верхнего и нижнего ограждения $S_{огр}^{ш}$, которые можно также разделить на площадь продольных слоев $S_{огр}^{ш\ прод}$ и площадь поперечных слоев $S_{огр}^{ш\ попер}$:

$$S_{огр} = S_{огр}^{бок} + S_{огр}^{ш\ прод} + S_{огр}^{ш\ попер}. \quad (7)$$

Площадь бокового ограждения:

$$S_{огр}^{бок} = S_{сл}^{прод} \cdot n_{огр}^{бок} \cdot \Sigma n, \quad (8)$$

где Σn – число слоев в образце по высоте.

Площадь продольных волокон верхнего и нижнего ограждения:

$$S_{огр}^{ш\ прод} = S_{сл}^{прод} \cdot n_{огр}^{прод} \cdot n_{огр}^{ш}, \quad (9)$$

где $n_{огр}^{прод}$ – количество слоев верхнего и нижнего ограждений, расположенных в продольном направлении относительно продольной оси образца, $n_{огр}^{ш}$ – количество поперечных слоев в верхнем и нижнем ограждениях.

Площадь поперечных волокон верхнего и нижнего ограждений:

$$S_{огр}^{ш\ попер} = S_{сл}^{попер} \cdot n_{огр}^{попер}, \quad (10)$$

где $n_{огр}^{попер}$ – количество слоев верхнего и нижнего ограждений, расположенных в поперечном направлении относительно продольной оси образца.

Площадь структуры в рассматриваемом сечении состоит только из продольных волокон структуры и определяется формулой:

$$S_{стр} = S_{сл}^{прод} \cdot n_{стр}^{прод} \cdot n_{стр}, \quad (11)$$

где $n_{стр}^{прод}$ – количество слоев структуры, расположенных в продольном направлении, $n_{стр}$ – количество продольных слоев в структуре образца.

Ввиду того, что у всех образцов одинаковая ширина сечения b_0 (см. табл. 1), следовательно, количество слоев по ширине в каждом из них одинаково:

$$n_{огр}^{бок} = 6; n_{огр}^{ш} = 19; n_{стр} = n_{огр}^{ш} \cdot 0,6 \text{ (так как образцы имеют 60\% заполнение).}$$

В табл. 3 приведены значения, указывающие количество продольных и поперечных слоев структуры и ограждения образца по высоте, а также общее число слоев для каждого типоразмера образца.

Таблица 3

Количество слоев по высоте в каждом типоразмере образца

Типоразмер	$n_{стр}^{прод}$	$n_{стр}^{попер}$	$n_{огр}^{прод}$	$n_{огр}^{попер}$	$\Sigma n_{прод}$	$\Sigma n_{попер}$	Σn
3x10	4	5	4	2	8	7	15
5x10	9	10	4	2	13	12	25
7x10	14	15	4	2	18	17	35

На основании формул (5)-(11) и параметров из табл. 3 были рассчитаны значения площадей ограждения и структуры опасного поперечного сечения образца, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4

Рассчитанные площади сечения образцов

Типоразмер	$S_{огр}$	$S_{стр}$	ΣS	$S_{стр}/S_{огр}$
3x10	13,47	2,87	16,34	0,21
5x10	17,24	6,45	23,69	0,37
7x10	21,01	10,03	31,04	0,48

На рис. 10 приведены диаграммы растяжения материала аддитивной структуры с учетом рассчитанных опасных площадей поперечного сечения для каждого типоразмера образцов.

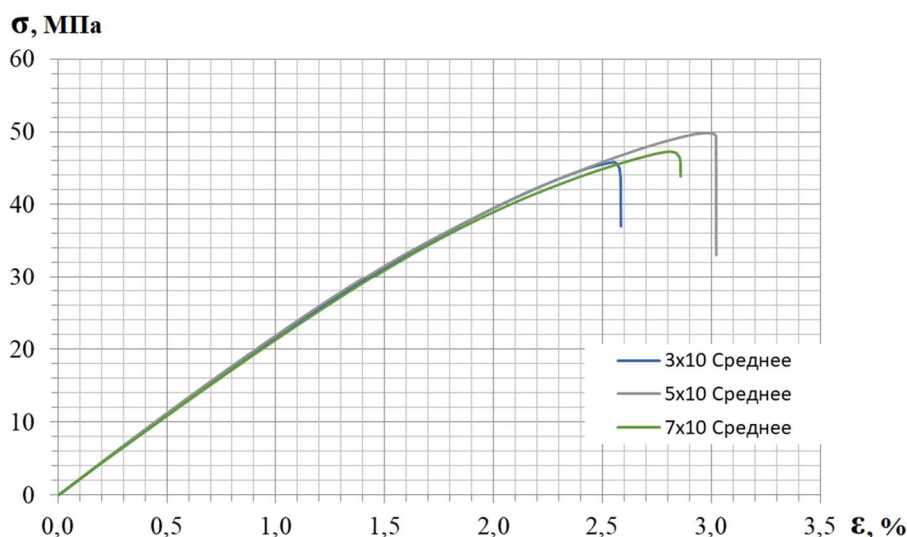


Рис. 10. Диаграммы растяжения материала аддитивных структур с учетом реальных площадей сечений

Согласно рис. 10 наблюдается значительная сходимость диаграмм растяжения материала аддитивных структур, что свидетельствует о справедливости предложенной методики определения опасной площади поперечного сечения.

Механические характеристики для всех типоразмеров с учетом реальных площадей представлены в табл. 5.

Таблица 5

Механические характеристики материала аддитивных структур с учетом реальной площади поперечного сечения

Типоразмер	$\sigma_{нр}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{пред}$ МПа	$\epsilon_{ост}$ %	E , ГПа
3x10	18,12	39,56	46,15	0,57	2,22
5x10	17,97	38,45	50,08	0,82	2,25
7x10	18,71	39,39	47,46	0,72	2,17

На рис. 11 показаны графики зависимости механических характеристик материала аддитивных структур от соотношения площадей структуры и ограждения, построенные согласно табл. 2, 4 и 5.

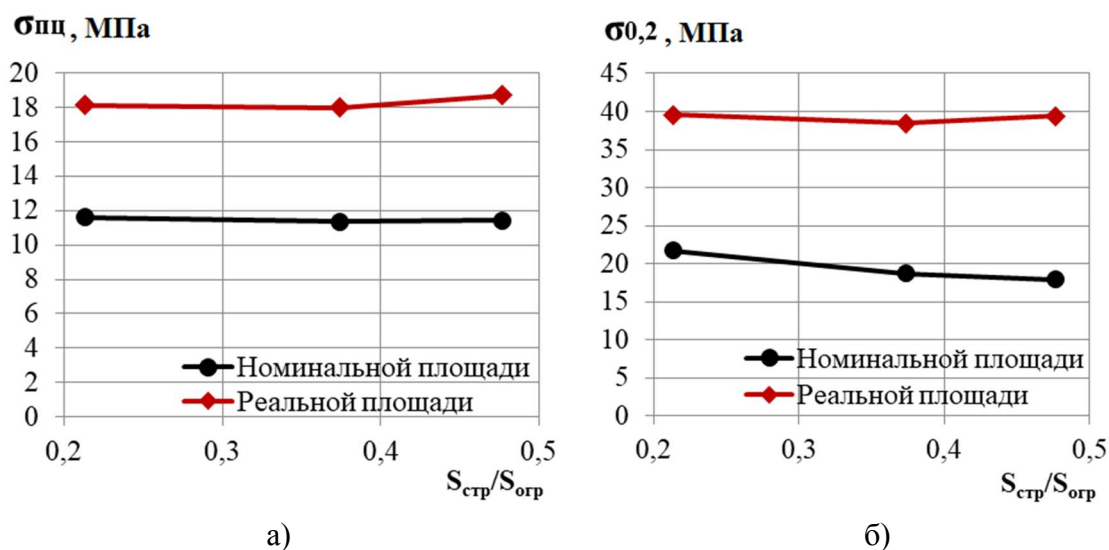


Рис. 11. Зависимость механических характеристик материала от отношения площадей структуры и ограждения

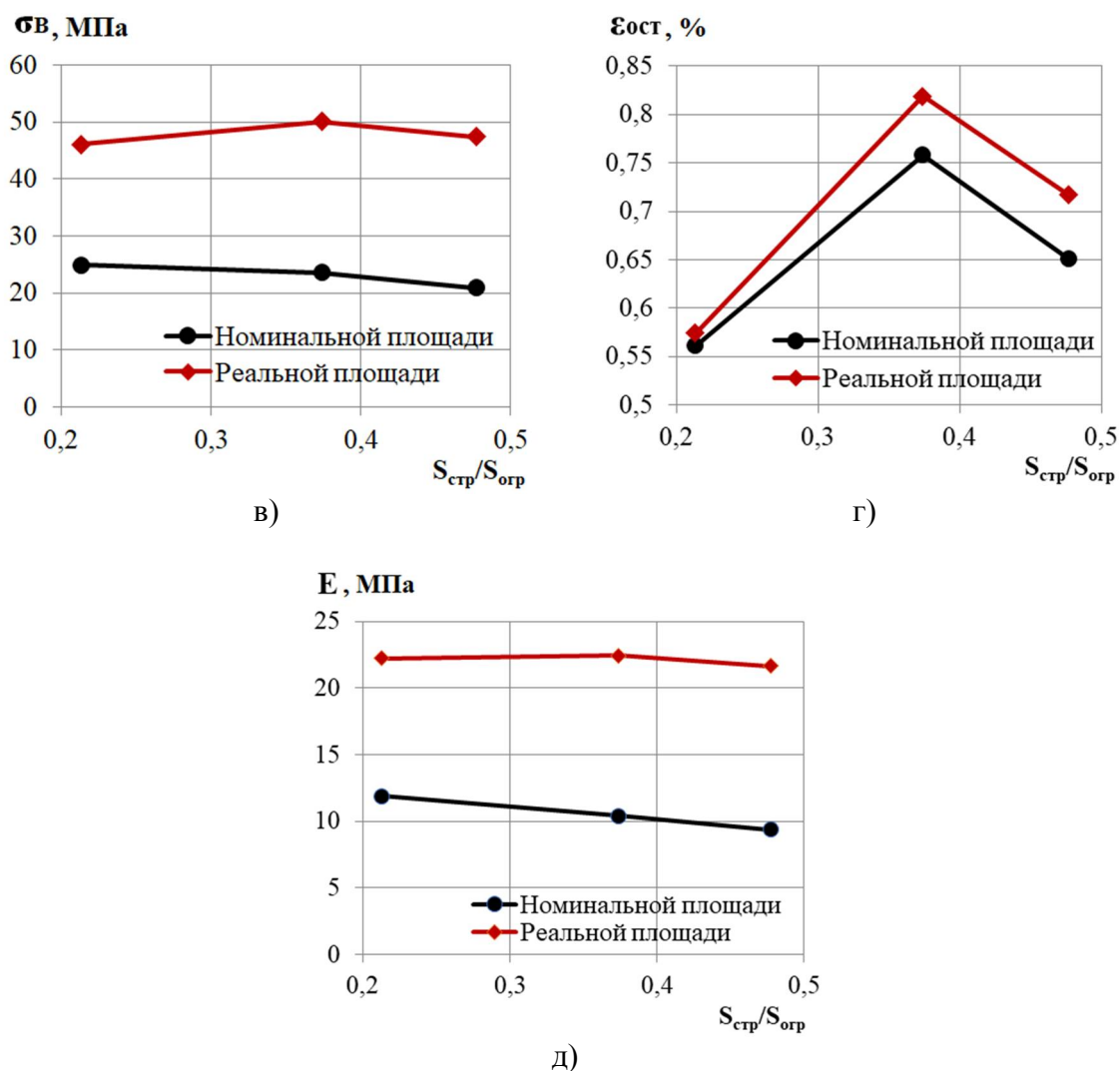


Рис. 11. Зависимость механических характеристик материала от отношения площадей структуры и ограждения (продолжение)

Из анализа представленных графических зависимостей и табл. 2 следует, что при увеличении коэффициента отношения площади структуры заполнения к площади ограждения, то есть доли структуры в общем объеме поперечного сечения, значения условного предела текучести, предела прочности и модуля Юнга, рассчитанных по номинальной площади поперечного сечения, уменьшаются. Доля структуры в общем объеме поперечного сечения не влияет на предел пропорциональности. Также интересно отметить, что наблюдается линейная зависимость модуля Юнга от коэффициента отношения площади структуры к площади ограждения.

Согласно рис. 11 и табл. 5 механические характеристики материала, полученные после использования предлагаемой методики расчёта опасной площади поперечного сечения, увеличились. Значения предела пропорциональности стали выше в среднем на 60%, что, возможно, связано с процентом заполнения образцов. Значения условного предела текучести, предела прочности и модуля Юнга возросли в среднем в 2 раза. Также следует отметить, что коэффициент отношения площади структуры заполнения к площади ограждения перестает оказывать влияние на условный предел текучести и модуль Юнга. В значениях предела пропорциональности наблюдаются некоторые изменения, однако этот выброс находится в пределах допустимых величин.

Выводы. В настоящей статье были представлены экспериментальные исследования по определению механических характеристик материала аддитивных структур при разной методике расчета площадей поперечных сечений образцов. Учитывая гипотезы об однородности и сплошности материала как одного из главных постулатов сопротивления материалов в любом сечении детали, независимо от её формы и размера, механические характеристики материала должны оставаться неизменными. Однако в случае аддитивных структур невозможно говорить о сплошности материала. На основе проведенных экспериментов было показано, что применение стандартной методики определения механических характеристик материала не влияет на значения предела пропорциональности, однако приводит к несовпадению в значениях условного предела текучести, предела прочности и модуля Юнга для разных размеров поперечных сечений образцов, изготовленных при идентичных условиях из одного и того же материала.

Таким образом, необходимо использовать иную методику определения механических характеристик материала аддитивных структур. Авторами статьи предложена методика расчета истинной площади поперечного сечения образца. Исходя из пересчета площадей поперечных сечений образцов были построены диаграммы растяжений материала для каждого типоразмера сечений. На основании полученных графиков и руководствуясь определенными допущениями, принятыми в сопротивлении материалов, можно сделать выводы, что диаграммы растяжения материала аддитивных структур для разной площади поперечного сечения образцов имеют высокую сходимость, что говорит о правильности предложенной методики расчета.

Следует отметить тот факт, что объем экспериментов, проведенных при написании этой статьи, не позволяет сделать однозначные выводы о прочности и жесткости материала аддитивных структур. На данном этапе исследований пока сложно давать рекомендации по практическому использованию какой-то определенной механической характеристики для проведения численных экспериментов и проектирования изделий, выполненных посредством FDM-печати. Однако результаты экспериментов дают возможность увидеть тенденции развития данной проблемы и требуют дальнейших исследований с большим числом образцов.

Библиографический список

1. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J.R.C. Dizon, A. H.Espera, Q. Chen, R.C. Advincula // Additive Manufacturing. – 2017 – Vol. 20 – P. 44-67. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
2. Никитина Л. Л., Гаврилова О. Е. Перспективы использования современных технологий 3D-печати в производстве изделий лёгкой промышленности из полимерных материалов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18. – №7. – С. 224-226.
3. Кочешков И.В. Камоничкина Н.В., Камоничкин Д.Т. Перспективы использования современных технологий 3D-печати полимерными материалами при изготовлении и проведении ремонта машиностроительных изделий // Инновационные технологии реновации в машиностроении: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конференции. – М., 2019. – С. 95-99.
4. Reddy R.D.P. Additive manufacturing in drug delivery applications: A review / International Journal of Pharmaceutics. – 2020. – Vol. 589. – P. 1-34.
5. Повышение точности зубчатых колёс, полученных 3D-печатью / А.В. Балашов, М.Н. Заборцева, А.С. Елюбаева, Б.К. Ахметкали // Инновации в машиностроении: сб. тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2018. – С. 326-333

6. 3-D Printed Strain Sensor for Structural Health Monitoring / N. Munasinghe, M. Woods, I. Miles, G. Paul // Conference: IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM) at: Bangkok – 2019.
7. Javaid M., Haleem A. Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review // Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma. – 2018. – Vol. 9. – P. 202-206.
8. Технология 3D-печати изделий из металла: от системы автоматизированного проектирования до реальной детали / А.А. Куликов, Ю.В. Небышинец, А.В. Сидорова, А.Е. Балановский // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 4. – С. 728–739.
9. Coogan T.J., Kazmer D.O. Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2020 – Vol. 35. – P. 1-16.
10. Effects of multiple sterilizations and natural aging on the mechanical behavior of 3D-printed ABS / D. Popescu, F. Baciuc, D. Vlăsceanu, C. Cotruț, R. Marinescu // Mechanics of Materials – 2020 – Vol. 148 - P. 1-12.
11. Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. № 23(3). С. 463–471.
12. Interdisciplinary-Based Development of User-Friendly Customized 3D Printed Upper Limb Prosthesis / L.A. Da Silva, F.O. Medola, A.C.T. Rodrigues, F.E. Sandnes // Ahram T., Falcao C. (eds) Advances in Usability, User Experience and Assistive Technology. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 794.
13. Design and Development of a Myoelectric Upper Limb Prosthesis with 3D Printing: A Low-Cost Alternative / B.B. Da Silva, R.N. Porsani, L.A.V. Hellmeister, F.O. Medola, L.C. Paschoarelli // Di Nicolantonio M., Rossi E., Alexander T. (eds) Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 975.
14. Марочник сталей и сплавов / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др.; под общ. ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – 4-е изд., переработ. и доп. – М., 2014. 1216 с.
15. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твёрдого тела: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 712 с.
16. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати / А.В. Балашов, А.О. Черданцев, Е.А. Новиковский, С.В. Ананьин, С.В. Белоплотов // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 61-64.
17. ГОСТ Р 57558-2017 (ISO/ASTM 52900:2015) Российской Федерации. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. Национальный стандарт. - М.: Стандартинформ, 2018 – 16 с.
18. Balachov A.V. Makarova M.I. Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing // Electronic scientific journal «Engineering Journal of Don». – 2019. - №1.
19. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестник Государственного университета и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. - №4. – С. 765 – 776.
20. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS / W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao // Materials – 2015. – Vol. 8. – P. 5834-5846.
21. Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre compos / V. Kovan, T. Tezel, H.E. Camurlu, E.S. Topal // International Scientific Journals

- «Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations» - 2018. – Vol. 4. – P. 126-128.
22. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts / J. Cantrell¹, S. Rohde¹, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro¹, J. Anton¹, A. Young, A. Jerez¹, D. Steinbach, C/ Kroese¹, and P. Ifju // *Advancement of Optical Methods in Experimental Metchanics*. – 2017. – Vol. 3. – P. 89-105.
 23. Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Идентификация параметров модели ABS-пластика, полученного методом послойного наплавления // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2018. – № 1 (25). – С. 130–140.
 24. Divyathej M V., Varun M., Rajeev P. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. – 2016. – Vol. 7. – Issue 3. – P. 116-124.
 25. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение. - Межгосударственный стандарт. - М.: Стандартиформ, 2018 – 44 с.
 26. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892—84) Металлы. Методы испытаний на растяжение. - Межгосударственный стандарт. - М.: Стандартиформ, 2008 – 24 с.
 27. Effects of multiple sterilizations and natural aging on the mechanical behavior of 3D-printed ABS / D. Popescu, F. Baciú, D. Vlăsceanu, C.M. Cotruț, R. Marinescu // *Mechanics of Materials* – 2020, 148, art. no. 103423.

References

1. Dizon J.R.C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / J.R.C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, R. C. Advincula // *Additive Manufacturing* – 2017 – Vol. 20 – Pp. 44-67. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
2. Nikitina L. L. Prospects for the use of modern 3D printing technologies in the production of light industry products from polymer materials / L. L. Nikitina, O. E. Gavrilova // *Bulletin of the Technological University*. 2015. Vol. 18, No. 7. С. 224-226.
3. Kocheshkov I V, Kamonichkina N V and Kamonichkin D T 2019 Prospects for the use of modern 3D printing technologies with polymeric materials in the manufacture and repair of machine-building products Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf. "Innovative Renovation Technologies in Mechanical Engineering" pp 95-99
4. Reddy R. D. P. Additive manufacturing in drug delivery applications: A review / *International Journal of Pharmaceutics* – 2020 - Vol. 589 - Pp. 1-34.
5. Balashov A.V. Improving the accuracy of gear wheels obtained by 3D printing / A.V. Balashov, M.N. Zabortseva, A.S. Elyubaeva, B.K. Akhmetkali // *Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Innovations in Mechanical Engineering"*. 2018.S. 326-333
6. Munasinghe N. 3-D Printed Strain Sensor for Structural Health Monitoring / N. Munasinghe, M. Woods, I. Miles, G. Paul // *Conference: IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM) at: Bangkok* – 2019. DOI: [10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095826](https://doi.org/10.1109/CIS-RAM47153.2019.9095826)
7. Javaid M. Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review / M. Javaid, A. Haleem // *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma* – 2018 - Vol. 9 - Pp. 202-206.
8. Kulikov A A, Nebyshinets Yu V, Sidorova A V and Balanovsky A E 2020 3D printing technology for metal products: from a computer-aided design system to a real part *Irkutsk State Technical University Bull.* 24(4) 728–739. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-728-739>.

9. Coogan T. J., Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing / T. J. Coogan, D. O. Kazmer // *Additive Manufacturing* – 2020 – Vol. 35 – Pp. 1-16. DOI: 10.1016 /j.addma.2020.101368.
10. Popescu D. Effects of multiple sterilizations and natural aging on the mechanical behavior of 3D-printed ABS / D. Popescu, F. Baciú, D. Vlăsceanu, C. Cotruț, R. Marinescu // *Mechanics of Materials* – 2020 – Vol. 148 - Pp. 1-12. doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103423
11. Larchenko A G 2019 Assessment of the quality of products made of polymer materials for machine-building purposes *Irkutsk State Technical University Bull.* 23(3) 463–471. DOI:10.21285 / 1814-3520-2019-3-463-471.
12. da Silva L. A., Medola F. O., Rodrigues A. C. T., Sandnes F. E. (2019) Interdisciplinary-Based Development of User-Friendly Customized 3D Printed Upper Limb Prosthesis. In: Ahram T., Falcao C. (eds) *Advances in Usability, User Experience and Assistive Technology*. AHFE 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 794. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94947-5_88.
13. da Silva B.B., Porsani R.N., Hellmeister L.A.V., Medola F.O., Paschoarelli L.C. (2020) Design and Development of a Myoelectric Upper Limb Prosthesis with 3D Printing: A Low-Cost Alternative. In: Di Nicolantonio M., Rossi E., Alexander T. (eds) *Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping*. AHFE 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 975. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3_30.
14. Dragunov Yu G, Zubchenko A S, Kashirsky Yu V et al 2014 *Grade of steels and alloys*, 4th ed. (Moscow) 1216 p
15. Rabotnov Yu N 1988 *Mechanics of a deformable solid body, training manual for universities*, 2nd ed (Moscow: Science) 712 p
16. Balashov A V, Cherdantsev A O, Novikovskiy E A, Ananyin S V and Beloplotov S V 2016 Study of the strength of products obtained by 3D printing *Polzunovskiy Bull.* 2 61- 64
17. GOST R 57558-2017 (ISO / ASTM 52900: 2015). Russian Federation. Additive technological processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions. - National standard. - M.: Standartinform, 2018 - 16 p.
18. Balachov A. V. Study of the structure and properties of products obtained by 3D printing / A. V. Balachov, M. I. Makarova // *Electronic scientific journal «Engineering Journal of Don»*. – 2019. - №1. – ISSN 2073-8633.
19. Petrov V M, Bezpachuk S N and Yakovlev S P 2017 About the influence of structure on the strength of plastic products obtained by 3D printing *Bull. of the State University and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov* 9(4) 765-776. DOI: 1021821 / 2309-5180-2017-9-4-765-776.
20. Wu W. Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS / W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao // *Materials* - 2015, Vol. 8, Pp. 5834-5846. DOI:10.3390/ma809527.
21. Kovan V. Effect of printing parameters on mechanical properties of 3D printed PLA/carbon fibre compos / Kovan V., Tezel T., Camurlu H.E., Topal E.S // *International Scientific Journals «Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations»* - 2018, Vol. 4, Pp. 126-128. WEB ISSN 2534-8477; PRINT ISSN 2367-749X
22. Cantrell J. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts / J. Cantrell1, S. Rohde1, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro1, J. Anton1, A. Young, A. Jerez1, D. Steinbach, C/ Kroese1, and P. Ifju // *Advancement of Optical Methods in Experimental Metchanics* – 2017, Vol. 3, Pp. 89-105. DOI:[10.1007/978-3-319-41600-7_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_11).

23. Kartashova E D and Muizemnek A Yu 2018 Identification of the parameters of the ABS-plastic model obtained by layer-by-layer fusion Models, systems, networks in economics, technology, nature and society 1(25) 130-140
24. Divyathej M V. Analysis of mechanical behavior of 3D printed ABS parts by experiments / M. V. Divyathej, M. Varun, P. Rajeev // International Journal of Scientific & Engineering Research – 2016, Vol. 7, Issue 3, Pp. 116-124. ISSN 2229-5518.
25. 2018 GOST 11262-2017 (ISO 527-2: 2012) Plastics. Tensile test method. Interstate standard (Moscow: Standartinform) 44 p
26. GOST 1497-84 (ISO 6892-84) Metals. Tensile test methods. - Interstate standard. – M.: Standartinform, 2008 - 24 p.
27. Diana Popescu. Effects of multiple sterilizations and natural aging on the mechanical behavior of 3D-printed ABS / Popescu D., Baciu F., Vlăsceanu D., Cotruș C.M., Marinescu R.// Mechanics of Materials – 2020, 148, art. no. 103423.

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL OF ADDITIVE STRUCTURES WITH DIFFERENT METHODS FOR DETERMINING THE CROSS-SECTION AREA OF SPECIMENS

A. Yu. Perelygina¹, T. Ya. Druzhinina², S. A. Antipin³, Yu. A. Bobyleva⁴

"Irkutsk National Research Technical University"^{1,2,3,4}
Russia, Irkutsk

¹PhD of Technical Sciences, acting head Department of Engineering and Computer Graphics, tel.: +7 (3952) 405373, e-mail: perelygina@istu.edu

²PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Strength of Materials, tel.: +7 (3952) 405144, e-mail: dr@istu.edu

³Graduate student of the Department of Engineering and Computer Graphics, tel.: +7 (3952) 405373, e-mail: sergey.antipin.98@mail.ru

⁴Associate scientist of the Department of Engineering and Computer Graphics, tel.: +7 (3952) 405373, e-mail: bobylevajuliaal@yandex.ru

The article discusses the issue of determining the mechanical characteristics of the material of additive structures, taking into account such printing parameters as the percentage of filling and the direction of the printing filaments. The studies used three sizes of standardized specimens for central tension, made using 3D printing technology. During the experiments, it was found that when determining the mechanical characteristics of a material, it is necessary to deviate from the hypothesis of material homogeneity and continuity, adopted in the strength of materials. To determine the values of mechanical characteristics for samples of different sizes, a technique was proposed for calculating the real cross-sectional area of the structure under study. The article presents tensile diagrams and the mechanical characteristics of the material of additive structures calculated from them, as well as the issue of the influence of the ratio of the structure area to the perimeter area on the mechanical characteristics of the material.

Keywords: mechanical characteristics of the material of additive structures, 3D printing, PetG thermoplastic, structure and fencing of the product, percentage of filling, real cross-sectional area.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

DOI 10.36622/VSTU.2021.30.3.007

УДК 624.073.2.04

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОРТОТРОПНЫХ ПЛИТ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМ ОСНОВАНИЕМ

Н. Н. Некрасова

Воронежский государственный технический университет
Россия, г. Воронеж

Канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики и механики, тел.: +79601239984,
e-mail: Nekrasova-N@yandex.ru

В работе приведено численное моделирование пространственной задачи контактного взаимодействия ортотропных плит переменной жесткости с упругими основаниями. Используемая методика расчета пригодна в случае любых известных контактных моделей упругих оснований. В качестве примера приведены численные результаты для пространственно-неоднородных оснований типа упругих слоев постоянной и переменной толщины. Система интегро-дифференциальных уравнений, к которой сводится задача, решается численно, сочетанием методов конечных разностей типа сквозного счета и граничных элементов. Найдены прогибы, изгибающие моменты и распределения контактных давлений прямоугольной плиты переменной жесткости, полностью примыкающей к основанию. Приводится анализ влияния на напряженно-деформированное состояние плиты, изменения ортотропных свойств ее материала и степень неравномерной сжимаемости толщи грунта. Разработанная методика позволяет эффективно моделировать работу плитных фундаментных конструкций, когда необходим учет неоднородности грунтов сжимаемой толщи в пределах габарита зданий или сооружений.

Ключевые слова: ортотропная плита, пространственно-неоднородные основания, коэффициент жёсткости, конечно-разностная схема типа сквозного счета, метод граничных элементов.

Введение. Теоретические исследования по расчету фундаментных плит постоянной жесткости (толщины), контактирующих с упругими основаниями, характеризуются весьма большим количеством публикаций, среди которых следует упомянуть работы [1-8].

Проблема расчета плит переменной жесткости (толщины) на упругих основаниях возникает в задачах оптимального проектирования фундаментов, ориентированных на обеспечение надежности, долговечности и экономичности, а также при проектировании плит, изменение жесткостей (толщин) которых зависит от расположения устанавливаемого технологического оборудования, или значительном изменении нагрузки на отдельных их участках. Можно выделить три типа плит переменной жесткости: материал плиты однородный, но при этом изменяется ее толщина; толщина плиты постоянна, но ее жесткость изменяется в результате армирования, изменчивости физических свойств материала, частичных пластических деформаций или трещинообразования; одновременно изменяются толщина и жесткость. В любом из этих случаев эффективная жесткость может описываться ступенчатым или непрерывным законами.

Анализ работ по изучению напряженно-деформированного состояния плит переменной жесткости (толщины) показывает, что исследования проведены либо для задач в осесимметричной постановке, либо для прямоугольных изотропных плит с переменной

жесткостью в одном направлении. При этом рассматривалась расчетная модель грунтового основания типа пространственного континуума [9-12]. Поэтому теория моделирования процесса изгиба плит переменной жесткости (толщины), расположенных на упругих неклассических основаниях, требует дальнейшего развития с целью возможного её применения к более широкому классу практически-ориентированных задач.

Система интегро-дифференциальных уравнений изгиба плиты, расположенной на упругом основании. Рассматриваются произвольно нагруженные ортотропные плиты кусочно-постоянной жесткости, контактирующие с пространственно-неоднородным основанием типа упругого слоя постоянной и переменной толщины. Для определения напряженно-деформированного состояния плиты разработана модель на основе сочетания конечно-разностной схемы типа сквозного счета [13, 14] и метода граничных элементов. Как и в традиционных подходах [1], трение в области контакта не учитываем, т.е. вертикальные перемещения точек плиты и поверхности основания в контактной зоне совпадают $W(x, y) = U(x, y)$. Дифференциальное уравнение изогнутой поверхности ортотропной плиты переменной жесткости (толщины), опирающейся на упругое основание и находящейся под действием поперечной нагрузки, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_x \cdot \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu_2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right] + 4 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(D_K \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) + \\ + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_y \cdot \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \right] = q(x, y) - p(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где $W(x, y)$ – вертикальное перемещение срединной плоскости плиты, $q(x, y)$ – интенсивность внешней нагрузки, $p(x, y)$ – контактное давление; D_x, D_y – цилиндрические жесткости изгиба для главных направлений упругости, $D_x = E_x h^3 / 12(1 - \nu_1 \nu_2)$, $D_y = E_y h^3 / 12(1 - \nu_1 \nu_2)$, $D_3 = D_x \cdot \nu_2 + 2D_K = D_y \cdot \nu_1 + 2D_K$, $D_K = Gh^3 / 12$ – жесткость кручения; E_x, E_y, ν_1, ν_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материала плиты соответственно; G – модуль сдвига, $h = h(l)$ – толщина плиты.

Для пространственной контактной задачи равенство вертикальных перемещений плиты и поверхности упругого основания приводит к интегральному уравнению для определения контактного давления

$$U(x, y) = \frac{1 - \nu_0^2}{\pi E_0} \iint_S \omega(x, y, \xi, \eta) p(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (2)$$

где $U(x, y)$ – осадка основания в точке (x, y) ; $p(x, y)$ – значение контактного давления в точке (ξ, η) ; $\omega(x, y, \xi, \eta)$ – осадка поверхности основания в точке (ξ, η) от действия вертикальной единичной сосредоточенной силы, приложенной к основанию в точке (x, y) ; E_0, ν_0 – модуль упругости и коэффициент Пуассона основания; S – область контакта плиты и основания. Функция $\omega(x, y, \xi, \eta)$ задается согласно используемой модели упругого основания.

Граничные условия на контуре плиты могут быть в виде:

$$1) \text{ защемления: } W|_{\Gamma_1} = 0, \quad W|_{\Gamma_2} = 0 \quad (3)$$

$$2) \text{ шарнирного опирания: } W|_{\Gamma_2} = 0, \quad M_n|_{\Gamma_2} = 0 \quad (4)$$

$$3) \text{ свободного края: } M_n|_{\Gamma_3} = 0, \quad N_n|_{\Gamma_3} + \frac{\partial M_m}{\partial s}\bigg|_{\Gamma_3} = 0, \quad (5)$$

где n – внешняя нормаль к контуру плиты Γ_1 ; M_n , M_m – изгибающий и крутящий моменты; N_n – перерезывающая сила; $\partial / \partial n$ – производная по нормали; $\partial / \partial s$ – производная по дуге контура плиты.

Математическая формулировка рассматриваемой задачи сводится к совместному решению дифференциального (1) и интегрального (2) уравнений с граничными условиями на краях контура плиты (3-5). Если выразить из уравнения (1) $p(x, y)$ и подставить в (2), то придем к сложному интегро-дифференциальному уравнению:

$$W(x, y) = \frac{1 - \nu_0^2}{\pi E_0} \left(\iint_S \omega(x, y, \xi, \eta) q(\xi, \eta) d\xi d\eta - \iint_S \omega(x, y, \xi, \eta) \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D_x \cdot \left(\frac{\partial^2 W(\xi, \eta)}{\partial x^2} + \nu_2 \frac{\partial^2 W(\xi, \eta)}{\partial y^2} \right) \right] + 4 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(D_k \frac{\partial^2 W(\xi, \eta)}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D_y \cdot \left(\frac{\partial^2 W(\xi, \eta)}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 W(\xi, \eta)}{\partial x^2} \right) \right] \right] d\xi d\eta \right).$$

Решение сформулированной пространственной контактной задачи при любой модели упругого основания представляет значительные трудности, а для прямоугольных плит точные решения к настоящему времени практически отсутствуют. Численно-аналитическое решение уравнения (2) относительно контактных давлений $p(x, y)$ заимствовано из работы [15] и является одним из входящих данных для разрабатываемого программного модуля.

Затем, записывая левую часть уравнения (1), а также уравнений (3-5) в конечных разностях и подставляя интенсивность реактивного давления в правую часть (1), определяем прогибы, изгибающие моменты, перерезывающие силы в плите. При этом используется конечно-разностная схема типа сквозного счета, когда граница раздела областей с различными жесткостными характеристиками (толщинами) не выделяется явно. Для жесткостей, входящих в выражения коэффициентов конечно-разностных уравнений в узлах сетки реализован принцип сглаживания.

В результате краевая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений с матрицей, порядок которой равен числу неизвестных прогибов плиты в выделенной дискретной совокупности точек.

В соответствии с данным подходом на начальном этапе формулируется дискретная модель прямоугольной упругой плиты. Начало координат помещаем в левом нижнем углу плиты. На область $0 \leq x \leq a$, $0 \leq y \leq b$, занятую плитой, вдоль осей OX и OY наносим сетку с шагом Δx по оси OX и Δy по оси OY (рис. 1).

Уравнение (1) во внутреннем узле конечно-разностной сетки (i, j) имеет вид:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \right]_{i,j} + \nu_2 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D_x \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right]_{i,j} + 4 \left[\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(D_k \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) \right]_{i,j} +$$

$$+ \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(D_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right]_{i,j} + \nu_1 \left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(D_y \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) \right]_{i,j} = q_{i,j} - p_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots, N-2; j = 1, 2, \dots, M-2. \quad (6)$$

Частные производные в каждом слагаемом левой части уравнения (6) расписываются на основе известных конечно-разностных соотношений для производных второго порядка [16].

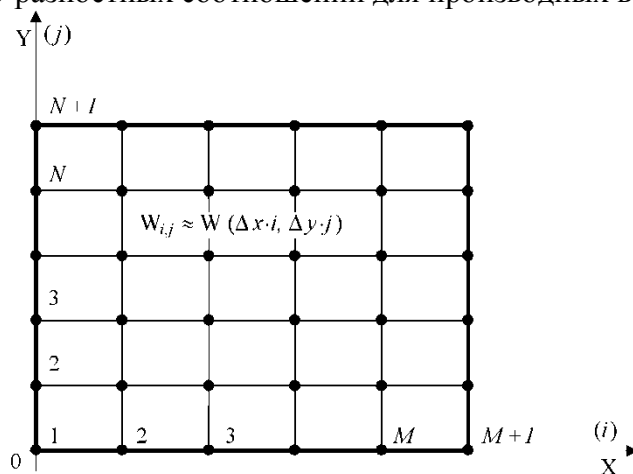


Рис. 1. Конечно-разностная сетка, нанесенная на плиту

При замене дифференциального уравнения (1) конечно-разностными выражениями воспользуемся известным 13-точечным шаблоном для построения разностного уравнения во внутренних узлах прямоугольной сетки (рис. 2). Кроме того, в дальнейшем для составления конечно-разностных уравнений потребуется использовать дополнительные точки $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$, расположенные в центрах соответствующих клеток.

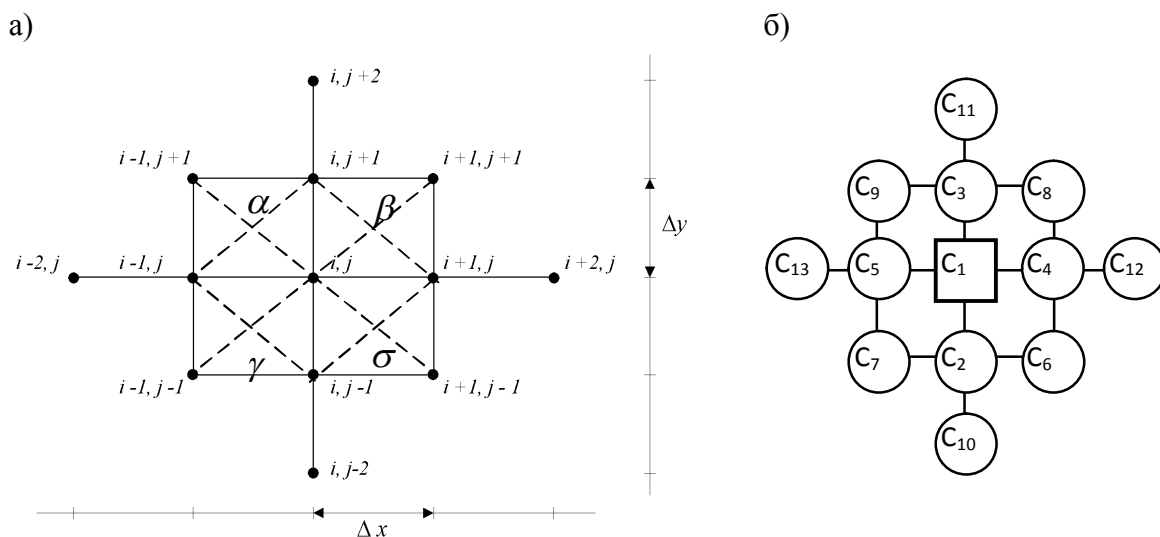


Рис. 2. Фрагмент разностной сетки для внутреннего узла с принятыми обозначениями нумерации (а); схематическое представление структуры конечно-разностных уравнений с использованием тринадцатиточечного шаблона (б)

Таким образом, уравнение (6) в узле (i, j) окончательно принимает следующий вид:

$$C_1 \cdot W_{i,j} + C_2 \cdot W_{i,j-1} + C_3 \cdot W_{i,j+1} + C_4 \cdot W_{i+1,j} + C_5 \cdot W_{i-1,j} + C_6 \cdot W_{i+1,j-1} +$$

$$\begin{aligned}
& +C_7 \cdot W_{i-1,j-1} + C_8 \cdot W_{i+1,j+1} + C_9 \cdot W_{i-1,j+1} + C_{10} \cdot W_{i,j-2} + C_{11} \cdot W_{i,j+2} + \\
& +C_{12} \cdot W_{i+2,j} + C_{13} \cdot W_{i-2,j} = (\Delta y)^4 \cdot (q_{i,j} - p_{i,j}), \quad i=1,2,\dots,N-2; j=1,2,\dots,M-2., \quad (7)
\end{aligned}$$

где разностные коэффициенты C_k ($k=1,\dots,13$) определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \lambda^2 \left[(\hat{D}_x)_{i,j-1} + 4(\hat{D}_x)_{i,j} + (\hat{D}_x)_{i,j+1} \right] + 4\lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j} + (\hat{D}_K)_\gamma + (\hat{D}_K)_\beta + (\hat{D}_K)_\sigma + \right. \\
& \quad \left. + (\hat{D}_K)_\alpha + v_1 (\hat{D}_y)_{i,j} \right] + (\hat{D}_y)_{i-1,j} + 4(\hat{D}_y)_{i,j} + (\hat{D}_y)_{i+1,j}; \\
C_2 &= -2\lambda^2 \left[(\hat{D}_x)_{i,j-1} + (\hat{D}_x)_{i,j} \right] - 2\lambda \left[2(\hat{D}_K)_\gamma + 2(\hat{D}_K)_\alpha + v_2 (\hat{D}_K)_{i,j-1} + v_1 (\hat{D}_y)_{i,j} \right]; \\
C_3 &= -2\lambda^2 \left[(\hat{D}_x)_{i,j+1} + (\hat{D}_x)_{i,j} \right] - 2\lambda \left[2(\hat{D}_K)_\beta + 2(\hat{D}_K)_\sigma + v_2 (\hat{D}_K)_{i,j+1} + v_1 (\hat{D}_y)_{i,j} \right]; \\
C_4 &= -2\lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j} + 2(\hat{D}_K)_\beta + 2(\hat{D}_K)_\alpha + v_1 (\hat{D}_y)_{i+1,j} \right] - 2 \left[(\hat{D}_y)_{i,j} + (\hat{D}_y)_{i+1,j} \right]; \\
C_5 &= -2\lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j} + 2(\hat{D}_K)_\gamma + 2(\hat{D}_K)_\sigma + v_1 (\hat{D}_y)_{i-1,j} \right] - 2 \left[(\hat{D}_y)_{i,j} + (\hat{D}_y)_{i-1,j} \right]; \\
C_6 &= \lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j-1} + 4(\hat{D}_K)_\alpha + v_1 (\hat{D}_y)_{i+1,j} \right]; \\
C_7 &= \lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j-1} + 4(\hat{D}_K)_\gamma + v_1 (\hat{D}_y)_{i-1,j} \right]; \\
C_8 &= \lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j+1} + 4(\hat{D}_K)_\beta + v_1 (\hat{D}_y)_{i+1,j} \right]; \\
C_9 &= \lambda \left[v_2 (\hat{D}_x)_{i,j+1} + 4(\hat{D}_K)_\sigma + v_1 (\hat{D}_y)_{i-1,j} \right]; \\
C_{10} &= \lambda^2 (\hat{D}_x)_{i,j-1}; \quad C_{11} = \lambda^2 (\hat{D}_x)_{i,j+1}; \quad C_{12} = (\hat{D}_y)_{i+1,j}; \quad C_{13} = (\hat{D}_y)_{i-1,j}.
\end{aligned}$$

Здесь $\lambda = (\Delta y / \Delta x)^2$ - отношение квадратов шагов конечно-разностной сетки в направлениях OY и OX соответственно. Для удовлетворения второго порядка аппроксимации значений жесткостей $\hat{D}_x, \hat{D}_y, \hat{D}_k$ в сеточных узлах определим согласно рекомендациям, приведенным в [14]:

$$\begin{aligned}
(\hat{D}_x)_{i,j-1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[(D_x)_{i,j-1} + (D_x)_{i,j-2} \right]; \\
(\hat{D}_x)_{i,j} &= \frac{1}{2} \cdot \left[(D_x)_{i,j} + (D_x)_{i,j-1} \right]; \\
(\hat{D}_x)_{i,j+1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[(D_x)_{i,j+1} + (D_x)_{i,j} \right]; \\
(\hat{D}_y)_{i-1,j} &= \frac{1}{2} \cdot \left[(D_y)_{i-1,j} + (D_y)_{i-2,j} \right]; \\
(\hat{D}_y)_{i,j} &= \frac{1}{2} \cdot \left[(D_y)_{i,j} + (D_y)_{i-1,j} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\hat{D}_y)_{i+1,j} &= \frac{1}{2} \cdot [(D_y)_{i+1,j} + (D_y)_{i,j}]; \\
(\hat{D}_k)_\alpha &= \frac{1}{4} \cdot [(D_k)_{i+1,j-1} + (D_k)_{i+1,j} + (D_k)_{i,j-1} + (D_k)_{i,j}]; \\
(\hat{D}_k)_\beta &= \frac{1}{4} \cdot [(D_k)_{i+1,j} + (D_k)_{i+1,j+1} + (D_k)_{i,j} + (D_k)_{i,j+1}]; \\
(\hat{D}_k)_\gamma &= \frac{1}{4} \cdot [(D_k)_{i,j-1} + (D_k)_{i,j} + (D_k)_{i-1,j-1} + (D_k)_{i-1,j}]; \\
(\hat{D}_k)_\sigma &= \frac{1}{4} \cdot [(D_k)_{i,j} + (D_k)_{i,j+1} + (D_k)_{i-1,j} + (D_k)_{i-1,j+1}].
\end{aligned}$$

В результате построения алгоритма расчета, основные положения которого изложены в работе [17,18], для уравнения (1) получим систему линейных уравнений относительно прогибов узловых точек плиты в матричной записи:

$$[H]\{W\} = \{q\} - \{p\}, \quad (8)$$

где $[H]$ – матрица дифференциального оператора относительно вектора прогибов $\{W\}$; $\{q\}$ и $\{p\}$ – векторы внешней нормальной нагрузки и реактивного давления, рассматриваемые в узлах конечно-разностной сетки. Система (8) решается методом Гаусса с исключением главного элемента по строке. В практических расчетах для матрицы системы (8) проводилась оценка её числа обусловленности, которое показывает меру близости результатов к вырожденности. Проведенная оценка обусловленности на основе многочисленных расчетов показала, что решение системы уравнений методом исключения Гаусса дает вполне приемлемые результаты в качестве первого приближения.

С целью улучшения полученного решения оно в дальнейшем уточнялось итерационным методом. Результаты проведенных расчетов показали, что после 3-5 итераций решение, как правило, сходится в пределах машинной точности $\varepsilon = 10^{-5}$.

Пример численного расчета. Рассмотрим шарнирно опертую ортотропную плиту со стороны $a = 16 \text{ м}$, лежащей на упругом клине ($\alpha = 30^\circ, x_c = 9 \text{ м}$). Характеристики основания: $E_0 = 29,1 \text{ МПа}$, $\nu_0 = 0,25$. На плиту действует равномерно распределенная нагрузка $q = 10^5 \text{ Н/м}^2$. Граница раздела $x = \rho$ ступенчатого изменения толщин расположена параллельно оси OY , ρ изменяется в пределах $a/2 \leq \rho \leq 7a/8$. Толщину той части плиты, которая расположена ближе к ребру клина, обозначим за h_1 , а толщину оставшейся части - h_2 . Будем предполагать, что $h_2 = 2 \cdot h_1$. На рис. 3, а построены изолинии прогибов для случая, когда $\rho = a/2$. Изолинии прогибов вытянуты вдоль границы раздела толщины плиты. С увеличением ρ происходит смещение контуров изолиний в сторону линии скачка изменения толщины (рис. 3, б). Возьмем границу $x = 7a/8$ ступенчатого изменения толщин, расположенную параллельно оси OY . Пусть соотношения между толщинами плиты $h_2/h_1 = 2$ ($h_1 = 0,889 \text{ м}$ – толщина той части плиты, которая лежит ближе к ребру упругого клина). Для учета свойств ортотропии плиты полагаем: $E_1 = 2,5E$, $\nu_1 = 2,5\nu$, $E_2 = E$, $\nu_2 = \nu$, $G = 0,429 \cdot E$, $E = 2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$, $\nu = 0,167$. На рис. 4, а приведены

расчетные данные для прогибов, полученные для ортотропной плиты, когда $E_x = E_1$, а на рис. 4, б рассмотрена ситуация, когда та же плита повернута относительно своего центра на прямой угол ($E_y = E_1$). Как видно, при выбранных значениях расчетных параметров изменение ориентации осей ортотропии приводит к незначительной асимметрии изолиний прогибов вдоль оси изменения упругих характеристик.

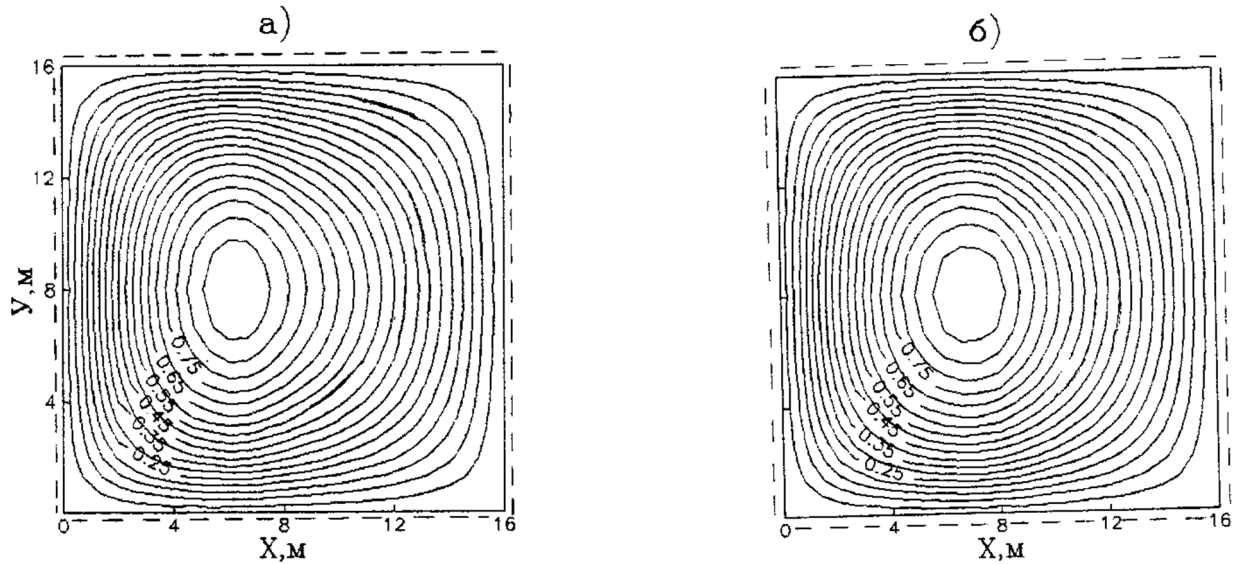


Рис. 3. Изолинии прогибов W , см шарнирно опертой плиты с кусочно-постоянной функцией толщины на упругом клине при: а) $\rho = \frac{\alpha}{2}$; б) $\rho = \frac{5\alpha}{8}$

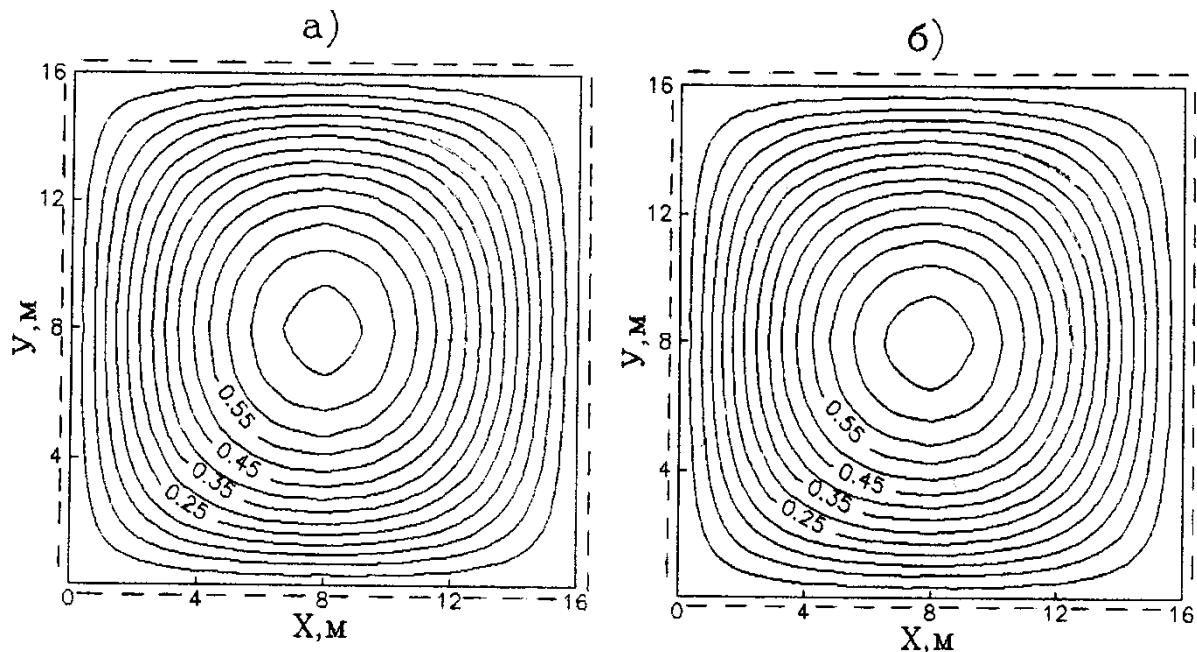


Рис. 4. Изолинии равных прогибов W , см шарнирно опертой ортотропной плиты с кусочно-постоянной функцией толщины на упругом клине ($\alpha = 30^\circ$, $X_c = 9$ м) при $\rho = \frac{7a}{8}$: а) упругое полупространство $E_x = 2,5E$, $E_y = E$; б) упругий клин $E_y = 2,5E$, $E_x = E$.

Как следует из представленных данных, неравномерная сжимаемость основания сказывается в первую очередь на характере распределения прогибов. При взаимодействии с упруго сжимаемым клином происходит смещение контуров изолиний в сторону увеличения толщины неоднородно сжимаемого слоя. Но изменение механических свойств основания и учет ортотропных свойств материала плиты существенно влияют на изгиб фундаментных плит переменной геометрии. Таким образом, смещая границу раздела жесткостей, можно добиться практически симметричной картины изолиний, несмотря на переменность толщины плиты и неоднородность основания.

Вывод. Исходя из полученных результатов можно сделать выводы о том, что механические свойства основания и изменение осей ортотропии, а также различные виды закрепления контура плиты существенно влияют на изгиб фундаментных плит переменной жесткости.

Предлагаемая методика может эффективно применяться при решении задач оптимального проектирования плитных конструкций, оптимизировать и снижать их материалоемкость по бетону и арматуре, а также повышать эффективность принятия проектных решений.

Библиографический список

1. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
2. Новотны Б., Ганушка А. Прямоугольная плита на упругом полупространстве. – Staveb. Cas, 1987.
3. Кончковский З. Плиты. Статические расчеты. – М.: Стройиздат, 1984. – 480 с.
4. Горлов А.М., Серебряный Р.В. Автоматизированный расчет прямоугольных плит на упругом основании. М.: Стройиздат, 1968. – 208 с.
5. Варвак А.П. Балки на упругом основании и сваях // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1963. – № 8. – С. 12 - 14.
6. Bufler H., Lieb H., Meier G., Frictionless contact between an elastic stamp and elastic foundation // Ing. Arch. – 1982. – Vol. 52. – No. 1/2. – P. 63 - 76.
7. Ioannides A.M., Finite difference solution for plate on elastic solid // J. Nransp. Engng. – 1988. – Vol. 114. – No. 1. – P. 57 – 75.
8. Selvadurai A.P.S. Elastic analysis of soil-foundations interaction. – Amsterdam: Elsevier, 1979. – 534 p.
9. Гришин В.А. Расчет круглой пластинки переменной толщины, лежащей на неоднородном упругом основании // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1969. – № 12. – С. 44–48.
10. Коренева Е.Б. Об одном приближенном методе расчета круглых ортотропных пластин линейно-переменной толщины // Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура. – 1991. – № 8. – С. 26 – 29.
11. Клепиков С.Н., Маликова Т.А. Изгиб ортотропной плиты переменной жесткости на нелинейно-деформируемом смещающемся основании // Тр. НИИ оснований и подземных сооружений. – 1982. – Вып. 73. – С. 15 – 19.
12. Эж Р.Н., Рямет Р.К. Расчет ортотропных пластинок переменной толщины методом сеток // Тр. Таллинский политех. ин-та. – 1984. – № 575. – С. 13 – 21.
13. Самарский, А.А. Теория разностных систем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
14. Самарский А.А., Фрязинов И.В. О разностных схемах решения задачи Дирихле в произвольной области для эллиптического уравнения с переменными коэффициентами // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1971. – Вып. 11. – № 2. – С. 385 – 410.

15. Алейников С.М., Иконин С.В. Пространственная деформация поверхности упругого слоя переменной толщины // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 5. – С. 21 – 23.
16. Варвак, П.М., Варвак Л.П. Метод сеток в задачах расчета строительных конструкций. –М.: Стройиздат, 1977. – 154 с.
17. Бурковский В.Л., Некрасова Н.Н. Численная реализация модели цилиндрического изгиба ортотропных плит переменной жесткости на упругом основании // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – №10. – С. 101-107.

References

1. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Calculation of structures on an elastic foundation. M.: Stroyizdat, 1984. 679 p.
2. Novotny B., Ganushka A. Rectangular plate on an elastic half-space. Staveb. Cas, 1987.
3. Konchkovsky Z. Plates. Static calculations. M.: Stroyizdat, 1984. 480 p.
4. Gorlov A.M., Serebryany R.V. Automated calculation of rectangular slabs on an elastic foundation. Moscow: Stroyizdat, 1968. 208 p.
5. Varvak A.P. Beams on an elastic foundation and piles. Universities News. Construction and Architecture. No. 8. 1963. Pp. 12-14.
6. Bufler H., Lieb H., Meier G. Frictionless contact between an elastic stamp and elastic foundation. Ing. Arch. Vol. 52. No. 1/2. 1982. Pp. 63-76.
7. Ioannides A.M. Finite difference solution for plate on elastic solid. J. Nransp. Engng. Vol. 114. No. 1. 1988. Pp. 57-75.
8. Selvadurai A.P.S. Elastic analysis of soil-foundations interaction. Amsterdam: Elsevier, 1979. 534 p.
9. Grishin V.A. Calculation of a circular plate of variable thickness lying on an inhomogeneous elastic foundation. Universities News. Construction and Architecture. No. 12. 1969. Pp. 44–48.
10. Koreneva Ye.B. On one approximate method for calculating circular orthotropic plates of linearly variable thickness. Universities News. Construction and Architecture. No. 8. 1991. Pp. 26-29.
11. Klepikov S.N., Malikova T.A. Bending of an Orthotropic Slab of Variable Stiffness on a Nonlinear Deformable Shifting Foundation. Research Institute of Foundations and Underground Structures. Issue. 73. 1982. Pp. 15-19.
12. Eek R.N., Ryamet R.K. Calculation of Orthotropic Plates of Variable Thickness by the Mesh Method. Tallinn Polytechnic Institute. No. 575. 1984. Pp. 13-21.
13. Samarsky A.A. Theory of difference systems. M.: Nauka, 1977. 656 p.
14. Samarskiy A.A., Fryazinov I.V. Difference schemes for solving the Dirichlet problem in an arbitrary domain for an elliptic equation with variable coefficients. J. Cal. Mat. & Mat. Phys. Issue. 11. No. 2. 1971. Pp. 385-410.
15. Aleinikov S.M., Ikonin S.V. Spatial deformation of the surface of an elastic layer of variable thickness. Foundations, Foundations and Soil Mechanics. No. 5. 1990. Pp. 21 - 23.
16. Varvak P.M., Varvak L.P. The method of grids in the problems of calculating building structures. M.: Stroyizdat, 1977. 154 p.
17. Burkovsky V.L., Nekrasova N.N. Numerical implementation of the model of cylindrical bending of orthotropic slabs of variable stiffness on an elastic foundation. Bulletin of the Voronezh State Technical University. Vol. 5. No. 10. 2009. Pp. 101-107.

CONTACT PROBLEM FOR ORTHOTROPIC PLATES OF VARIABLE THICKNESS WITH A SPATIALLY INHOMOGENEOUS BASE

N. N. Nekrasova

Voronezh State Technical University
Russia, Voronezh

PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics,
Tel.: +79601239984, e-mail: Nekrasova-N@yandex.ru

The paper presents a numerical simulation of the spatial problem of contact interaction of orthotropic slabs of variable stiffness with elastic foundations. The calculation technique used is suitable for any known contact models of elastic foundations. As an example, numerical results are given for spatially inhomogeneous foundations such as elastic layers of constant and variable thickness. The system of integrodifferential equations, to which the problem is reduced, is solved numerically by a combination of finite difference methods such as end-to-end counting and boundary elements. Deflections, bending moments and contact pressure distributions of a rectangular slab of variable stiffness, completely adjacent to the base, are found. An analysis of the influence on the stress-strain state of the slab of changes in the orthotropic properties of its material and the degree of uneven compressibility of the soil thickness is given. The developed technique makes it possible to effectively simulate the operation of slab foundation structures when it is necessary to take into account the heterogeneity of the soil of the compressible strata within the dimensions of buildings or structures.

Keywords: orthotropic slab, spatially inhomogeneous foundations, stiffness coefficient, end-to-end finite-difference scheme, boundary element method.

DOI 10.36622/VSTU.2021.30.3.008

УДК 625.7

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ
ДОРОГ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ**

А. В. Еремин¹, О. А. Волокитина², Н. Ю. Алимова³

Воронежский государственный технический университет^{1,2,3}
Россия, г. Воронеж

¹Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования автомобильных дорог и мостов, тел.: +7(910)3469587, e-mail: bora.av@mail.ru

²Канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов, тел.: +7(910)3497256, e-mail: dixi.o@mail.ru

³Канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования автомобильных дорог и мостов, тел.: +7(920)4051025, e-mail: natalimowa@ya.ru

Постановка задачи. Разработать рецептуры шлаковых асфальтобетонных смесей с оптимальным содержанием битума, исследовать их физико-механические свойства и на основании полученных результатов выявить преимущества и обосновать комплексное применение отходов металлургической промышленности на стадии проектирования конструкций дорожных одежд.

Результаты. Проведены испытания образцов материалов конструктивных слоев в лабораторных условиях, дана оценка физико-механическим и прочностным характеристикам на основе определения фактического модуля упругости путем послойного измерения прогибов дорожной одежды на экспериментальном участке.

Выводы. Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности применения шлаковых материалов в составе различных слоев нежесткой дорожной одежды на стадии проектирования конструкции. Выявлены преимущества использования шлаковых материалов в процессе строительства автомобильных дорог за счет сокращения затрат на материалы и в процессе эксплуатации с позиции безопасности и экологичности.

Ключевые слова: автомобильная дорога, конструктивный слой, шлаковые материалы, физико-механические свойства, эксплуатационные качества.

Введение. За последние 10 лет протяженность федеральных автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям, возросла на 4 % (рис. 1).

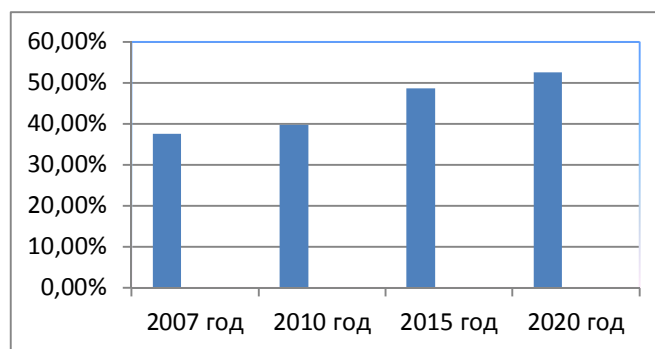


Рис. 1. Доля автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям к транспортно-эксплуатационным показателям сети автомобильных дорог общего пользования федерального значения

Наблюдаемое в последние годы увеличение интенсивности, скоростей движения и грузоподъемности автомобилей, заставляет уделять большое внимание транспортно-эксплуатационным и прочностным показателям автомобильных дорог.

В настоящее время одной из важнейших задач национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» является использование наилучших технологий и материалов [1].

Основным конструктивным элементом автомобильной дороги является дорожная одежда, которая и определяет транспортно-эксплуатационное состояние, прочностные показатели и, в конечном итоге, эффективность перевозок и срок службы. Поэтому применение нового комплекса материалов в конструкции дорожной одежды требует оценки эксплуатационных и прочностных свойств.

Реализация государственной транспортной политики и повышение ее эффективности в области обеспечения транспортной безопасности предусматривает относительно требований национальных стандартов увеличение прочностных характеристик автомобильных дорог.

Решение задачи приведения протяженности и состояния дорожной сети в соответствие с потребностями экономики и населения существенно осложняется влиянием опережающего роста рыночных цен на применяемые для конструктивных слоев дорожных одежд материалы. Стоимость указанных ресурсов за последние 5 лет в 1,5 раза превышает индексы цен в строительстве за этот же период [2].

Сокращение затрат на материалы для дорожного строительства может быть реализовано за счет применения местных дорожно-строительных материалов.

Известно, что отсутствие в ряде регионов Российской Федерации местных каменных материалов, заставляет все более широко использовать в дорожном строительстве побочные продукты и отходы промышленности. Наиболее ценным по физико-химическим и физико-механическим свойствам для дорожного строительства в Центрально-Черноземном регионе являются отходы черной и цветной металлургии – шлаковые материалы.

Для строительства автомобильных дорог применяется широкий спектр шлаковых материалов, например, полученных при отсеве дробления шлаковой пемзы (рис. 2) и литого шлакового щебня на фракционированный щебень (рис. 3), шлакопемзовые и шлаковые пески (рис. 4).



Рис. 2. Общий вид пробы шлаковой пемзы фракции 0-5



Рис. 3 Общий вид пробы шлакового щебня фракции 5-20



Рис. 4. Общий вид пробы шлакового песка фракции 0-5

Экспериментальное обоснование. Как известно, на стадиях проектирования и строительства автомобильных дорог основными требованиями являются стоимость конструкции, выбор типа и материала покрытия с учетом его сцепных характеристик, экологичности, долговечности и шумовых качеств.

Физико-механические свойства шлаковых материалов Новолипецкого и Тульского металлургических комбинатов изучались сотрудниками кафедры проектирования автомо-

бильных дорог и мостов Воронежского государственного технического университета, на основе этих свойств были разработаны рекомендации по применению шлаковых материалов в конструктивных слоях дорожных одежд нежесткого типа [3].

С учетом использования шлаковой минеральной части без включения других минеральных заполнителей была разработана рецептура смесей, зерновой состав которых подбирался исходя из требований нормативных документов [4-6]. Содержание битума определялось экспериментальным путем на основании сравнения показателей плотности, прочности и водонасыщения. Процентное содержание битума в смеси назначалось с учетом повышенной битумоемкости шлаковых минеральных заполнителей и колебалось в пределах от 4% до 9% для различных типов смесей. Учитывая региональное расположение Центрального федерального округа с выделением преимущественно III и IV дорожно-климатических зон, для приготовления горячих асфальтобетонных смесей были выбраны битумы БНД 60/90 и БНД 90/130 [7].

В результате проведенных испытаний образцов, приготовленных из асфальтобетонных смесей различной рецептуры с оптимальным содержанием битума, были получены основные физико-механические характеристики, приведенные на рис. 5 – 22 и в табл. 1.

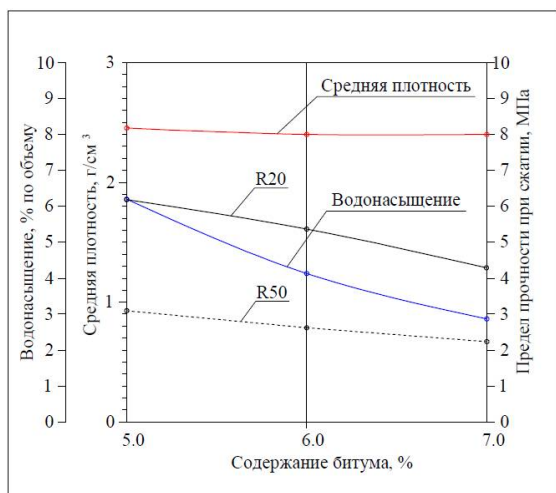


Рис. 5. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ВП

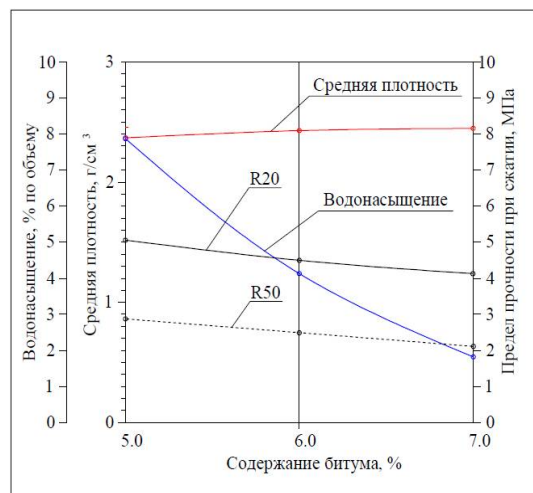


Рис. 6. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ВПШ

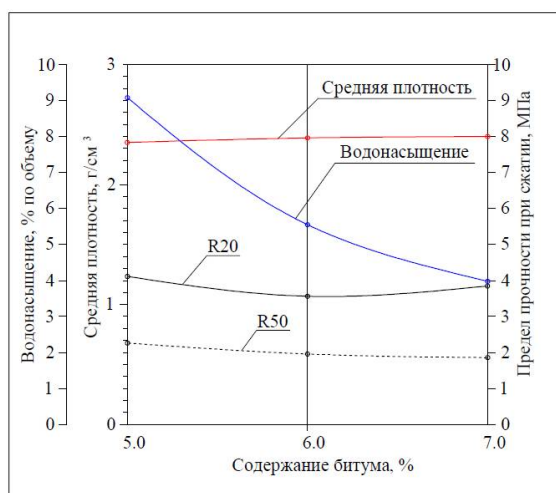


Рис. 7. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси АИ-1

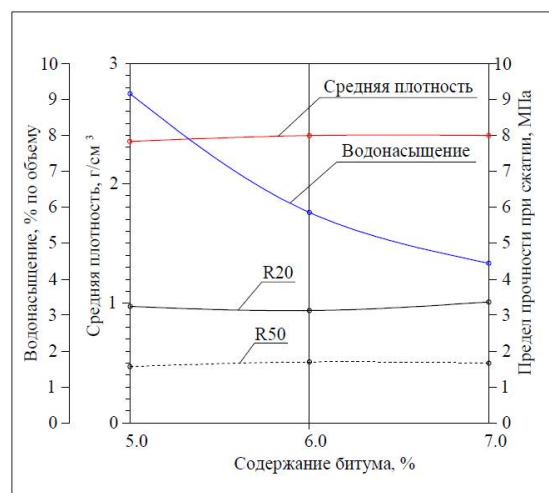


Рис. 8. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси АИ-2

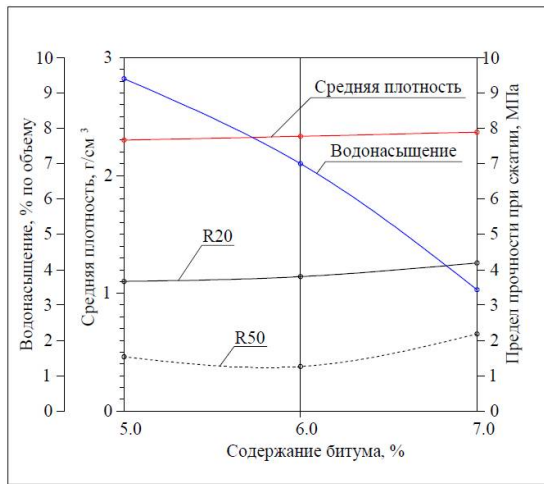


Рис. 9. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси АП-1

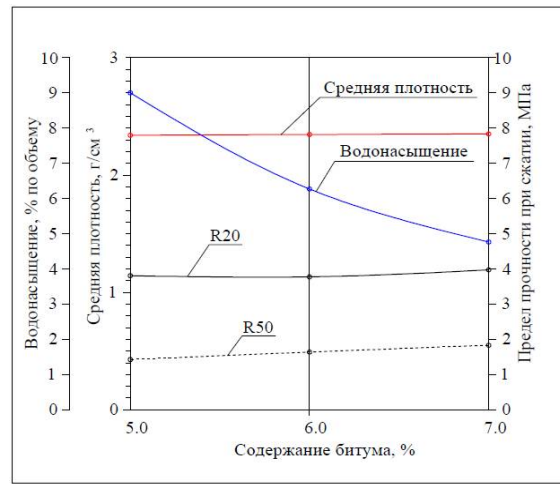


Рис. 10. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси АП-2

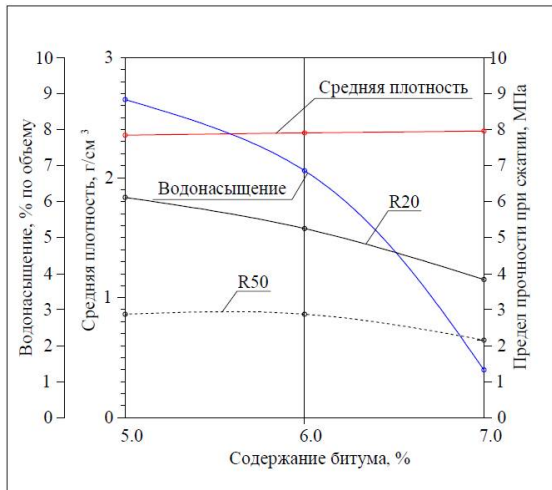


Рис. 11. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси Б1-1

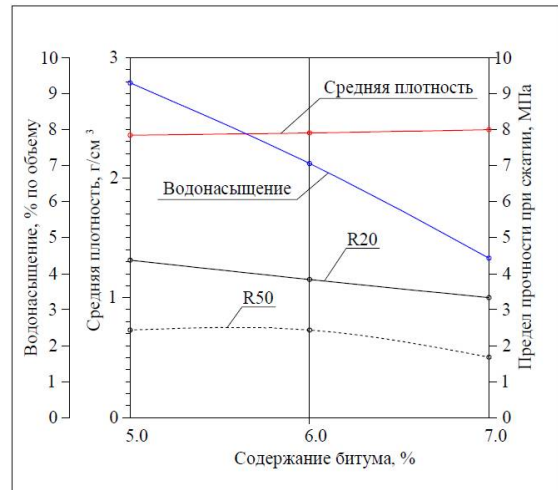


Рис. 12. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси Б1-2

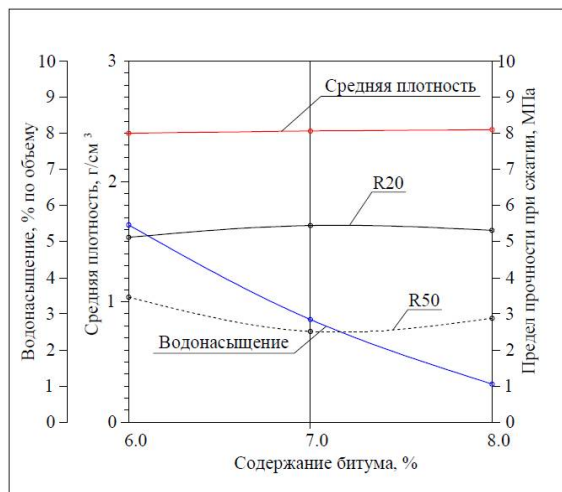


Рис. 13. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси В1

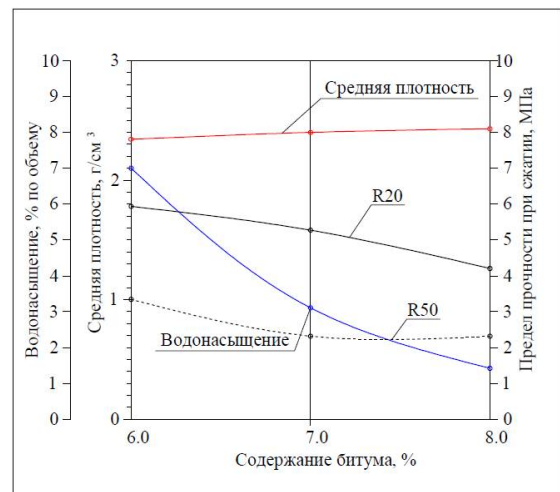


Рис. 14. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ВП

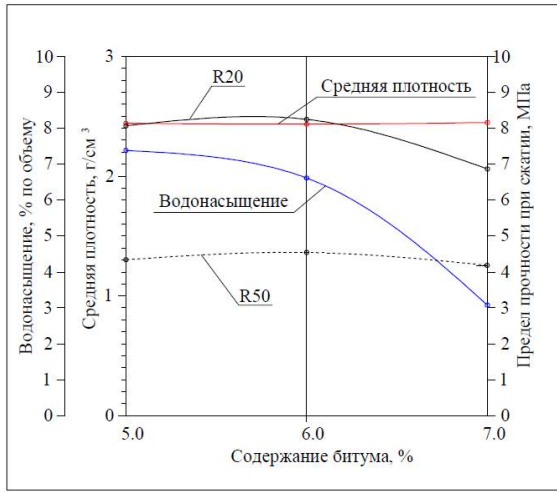


Рис. 15. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПI-1

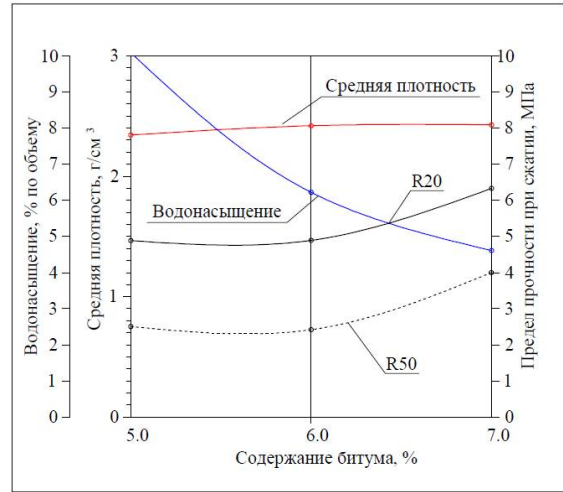


Рис. 16. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПI-2

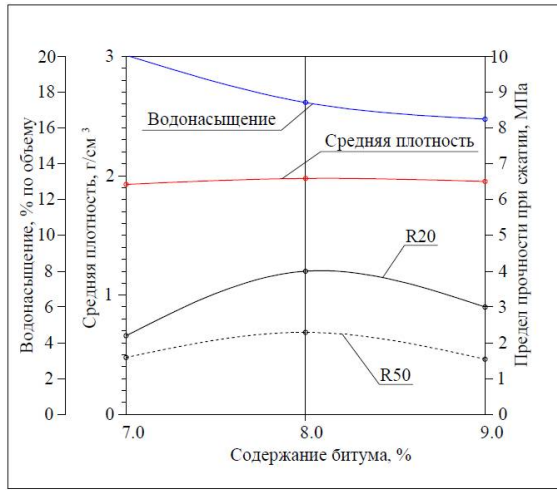


Рис. 17. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПII-1

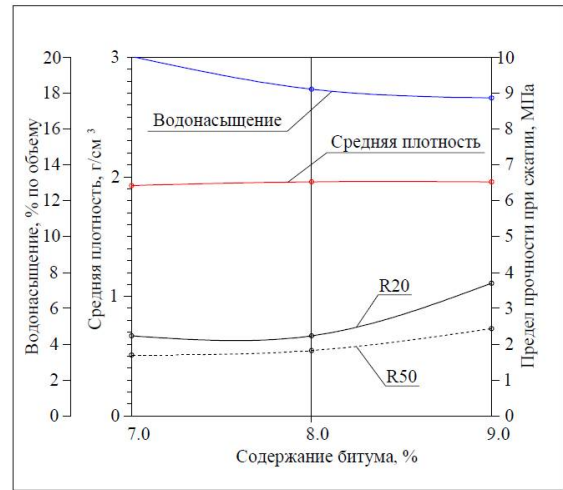


Рис. 18. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПII-2

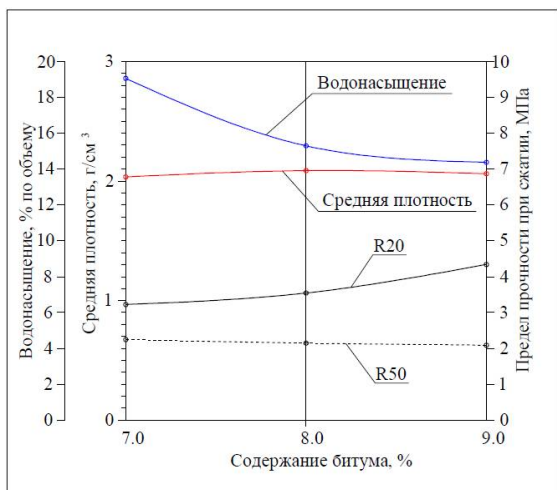


Рис. 19. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПIII-1

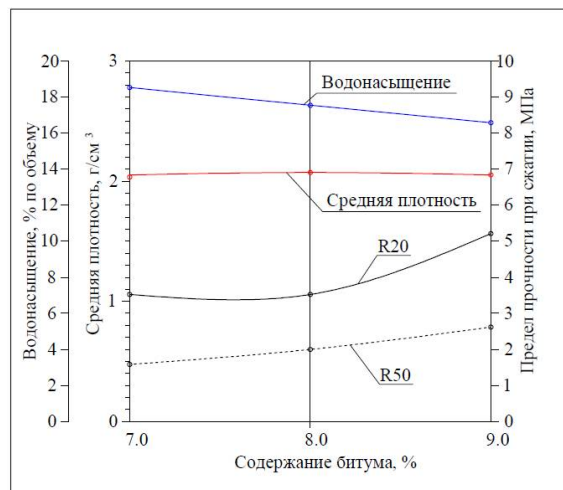


Рис. 20. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси ПIII-2

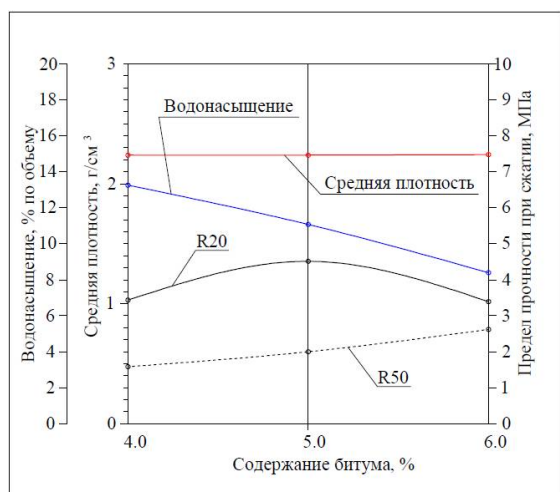


Рис. 21. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси КР-1

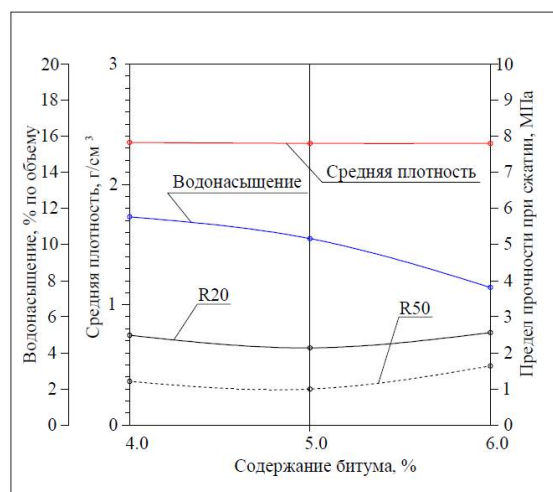


Рис. 22. Физико-механические свойства асфальтобетонной смеси КР-2

Таблица 1

Физико-механические характеристики горячих асфальтобетонных смесей с оптимальным содержанием битума

Наименование исследуемой шлаковой асфальтобетонной смеси	Фактические показатели									
	Средняя плотность, г/см³	Водонасыщение, % по объему	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С			Водостойкость	Водостойкость длительная	Сдвигоустойчивость		Трещиностойкость
			+20	+50	0			по коэффициенту внутреннего трения	по сцеплению при сдвиге при 50°С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Высокоплотные шлаковые асфальтобетонные смеси										
ВП	2,40	3,30	4,65	1,87	7,01	0,90	0,90	0,85	0,40	2,44
ВПП	2,40	3,32	3,77	1,74	6,12	1,00	0,90	0,48	0,59	2,03
Асфальтобетонные смеси типа А										
АI-1	2,37	5,75	3,37	1,99	7,56	0,96	1,00	0,89	0,40	2,29
АI-2	2,35	6,58	4,37	1,81	6,73	0,92	0,90	0,82	0,41	2,34
АII-1	2,36	4,76	3,00	1,25	5,76	1,00	1,00	0,88	0,26	2,13
АII-2	2,36	5,74	3,96	1,99	6,59	0,91	0,90	0,85	0,43	2,29
Асфальтобетонные смеси типа Б										
БИ-1	2,36	4,45	3,96	2,25	6,67	0,95	0,96	0,84	0,49	2,03
БИ-2	2,35	5,35	4,62	2,06	7,0	0,92	0,90	0,81	0,47	2,39
Асфальтобетонные смеси типа В										
ВI	2,40	2,60	5,30	3,43	7,99	1,00	0,96	0,75	0,86	3,34
ВII	2,39	3,11	5,12	2,06	7,55	0,90	0,96	0,68	0,56	3,17
Асфальтобетонные смеси типа Г										
ГI-1	2,45	4,19	5,50	3,37	9,16	0,91	0,91	-	-	2,30
ГI-2	2,44	3,94	4,25	2,87	10,5	1,00	0,94	-	-	2,60
ГII-1	1,94	18,94	2,54	1,5	4,87	0,90	0,90	-	-	1,46
ГII-2	1,96	11,11	2,41	1,41	4,75	0,90	0,97	-	-	1,27
ГIII-1	2,08	15,20	3,87	2,66	6,12	0,90	0,90	-	-	1,40
ГIII-1	2,10	14,23	4,62	1,75	7,25	0,90	0,91	-	-	7,25

Крупнозернистые асфальтобетонные смеси										
КР-1	2,29	10,87	3,42	1,56	4,58	0,93	0,90	0,80	0,38	1,01
КР-2	2,30	9,41	2,81	1,31	6,53	1,00	0,90	0,85	0,28	1,02

На основании полученных значений можно сделать вывод, что данные материалы соответствуют требованиям ГОСТ 9128-2013 [5] и могут быть использованы в процессе проектирования конструкции дорожных одежд в качестве верхних и нижних слоев покрытия для распределительных автомобильных дорог регионального значения [4, 8]. Отличием технологии устройства конструктивных слоев автомобильных дорог, в состав которых входят шлаковые материалы, является пониженная температура смеси: на выходе из смесителя она должна находиться в пределах 110 – 130 °С, в начале уплотнения – 60 – 70 °С.

Оценка физико-механических и прочностных свойств конструктивных слоев проводилась на основе определения фактического модуля упругости путем послойного измерения прогибов дорожной одежды на экспериментальном участке автомобильной дороги в Липецкой области. При этом определялись значения коэффициента сцепления (табл. 2).

Таблица 2

Эксплуатационно-прочностные показатели дорожной одежды

Конструктивная схема дорожной одежды	№ п/п слоя	Толщина слоя, см.	Модули упругости на границе контакта, МПа	Модуль упругости слоя, МПа	Коэффициент уплотнения слоя	Коэффициент сцепления слоя
			<u>322,26</u> ↓			
	1	5	<u>264,25</u> ↓	3200	0,98	0,35
	2	6	<u>211,40</u> ↓	2000	0,96	0,57
	3	7	<u>160,67</u> ↓	1800	0,96	-
	4	20		337	-	-
	5	26	<u>36,25</u> ↓	337	-	-

Примечание: 1. Модули упругости конструктивных слоев получены методом пересчета на основании модулей упругости, полученных на поверхности.

2. На конструкции дорожной одежды цифрами обозначены:

1. Мелкозернистый шлаковый асфальтобетон I марки; шлаковая минеральная смесь (фр. 0 – 15 мм.) – 100 %, битум БНД 60 / 90 – 8 %.

2. Крупнозернистый шлаковый асфальтобетон; шлаковый щебень (фр. 15 – 40 мм.) – 70 %, шлаковая минеральная смесь (фр. 0 – 15 мм.) – 30 %, битум БНД 90 / 130 – 6,5 %.

3. Крупнозернистый шлаковый асфальтобетон; шлаковый щебень (фр. 15 – 40 мм.) – 70 %, шлаковая минеральная смесь (фр. 0 – 15 мм.) – 30 %, битум БНД 90 / 130 – 6,5 %.

4. Отвальный рядовой доменный шлаковый щебень.

5. Отвальный рядовой доменный шлаковый щебень.

Для лабораторных испытаний асфальтобетонных конструктивных слоев были взяты образцы – керны, физико-механические свойства которых приведены в табл. 3.

Физико-механические свойства асфальтобетона

Название материала конструктивного слоя	Плотность г/см ³	Водонасыщение % объема	Набухание % объема	Прочность при сжатии, МПа		Коэффициент водостойкости	
				при температуре, °С		К _в	К _в ¹⁵
				20	50		
Мелкозернистый шлаковый асфальтобетон I марки	2,37	2,05	0,38	4,4	2,11	0,94	0,90
Крупнозернистый шлаковый асфальтобетон	2,31	8,05	0	3,67	1,89	0,95	0,78
Крупнозернистый шлаковый асфальтобетон	2,32	8,46	0	4,55	1,22	0,82	0,85

Данные, полученные при обследовании конструкции дорожной одежды в процессе строительства, и выводы, сделанные на основе работ, изучающих шлаки как дорожно-строительные материалы, показывают, что дорожная одежда, выполненная с комплексным применением металлургических шлаков отвечает эксплуатационным и прочностным требованиям, предъявляемым ко II технической категории. Она обладает достаточной прочностью, шероховатостью, коэффициентом сцепления. Исследования шлакового асфальтобетона показывают, что он по основным физико-механическим свойствам не уступает асфальтобетону на традиционных материалах [9, 10].

В период эксплуатации во время наблюдения за данной конструкцией с покрытием из шлакового асфальтобетона пористая структура шлакового щебня определяет избирательную адсорбцию битума. При этом более легкие фракции просачиваются в поры шлакового щебня на большую глубину, а тяжелые фракции остаются на поверхности. Это свойство шлакового щебня позволяет сделать вывод, что при нагревании покрытия в летний период времени испарение легких фракций битума существенно меньше, чем на покрытии с применением, например, гранитного щебня. То есть применение шлакового асфальтобетона для строительства автодорог и тротуаров в черте населенных пунктов снижает загрязнение атмосферы токсичными легкими фракциями битума.

Еще одной не менее значимой особенностью шлаковых асфальтобетонных покрытий является меньший уровень шума при движении по ним автотранспорта как по сухому, так и по мокрому покрытию, по сравнению с традиционными. Данный эффект хорошо ощущается при переходе транспортного средства с одного покрытия (шлакового) на другое (традиционное с применением гранитного щебня). Дальнейшее изучение этого эффекта позволяет дать рекомендации по применению шлаковых асфальтобетонных покрытий в местах, где необходимо максимально снизить влияние транспортного шума на окружающую среду, а устройство шумозащитных экранов или заграждений не целесообразно.

Для повышения безопасности движения автотранспорта с целью улучшения сцепных качеств покрытия автомобильных дорог обычно эксплуатационные организации устраивают поверхностную обработку из трудно полируемых пород, что также является источником внешнего шума. Пористая структура шлакового асфальтобетона, предопределяет высокий коэффициент сцепления покрытий без устройства поверхностной обработки как в летний, так и зимний периоды. При этом на шлаковых покрытиях наблюдается пониженное гололедообразование. Эти свойства предопределяют меньшие затраты при борьбе с гололедом в зимний период времени, что в свою очередь уменьшает загрязнение хлоридами придорожной полосы отвода.

Комплексное применение шлаковых материалов в дорожной одежде дает увеличение межремонтных сроков на 3-5 лет, при этом покрытие имеет хорошие эксплуатационные показатели. Наблюдение за дорожной одеждой на экспериментальном участке в Липецкой об-

ласти, выполненной с применением шлаковых материалов в покрытии или основании и имеющей длительный период эксплуатации, подтверждает надежность конструкции при значительном сроке службы. На покрытиях не наблюдаются проломы и прогибы, характерные для слабых оснований. Значительно меньше температурных трещин и выбоин. Поэтому с экономической позиции увеличение межремонтных сроков приводит к уменьшению затрат материально-технических ресурсов дорожно-строительных организаций в процессе эксплуатации автомобильной дороги.

Все вышеперечисленные особенности шлаковых материалов и применение их в районах с развитой металлургической промышленностью в комплексе, то есть во всех конструктивных слоях дорожной одежды, дает существенный положительный эффект: рационально используются местные сырьевые ресурсы, что, в конечном счете, существенно уменьшает стоимость строительства; улучшает условия охраны окружающей среды.

Выводы. 1) Полученные в лабораторных и натуральных условиях физико-механические характеристики шлаковых материалов позволяют рекомендовать их применение на стадии проектирования конструкций дорожных одежд нежесткого типа.

2) В процессе строительства комплексное применение шлаковых материалов, позволяет наиболее полно использовать вторичные отходы металлургического производства. При этом решаются проблемы сверхнормативного накопления вторичного сырья на территориях предприятия и отвалах, а также, решается задача обеспечения дорожно-строительных организаций качественными материалами взамен природных минеральных материалов, без ущерба для окружающей среды.

2) На стадии эксплуатации автомобильных дорог поверхность покрытия из шлаковых асфальтобетонов обеспечивает повышенные сцепные качества, что сокращает гололедообразование в зимний период и сокращает расходы на содержание.

3) Оценка использования шлаков в конструкции дорожной одежды с точки зрения экологической безопасности автомобильной дороги с позиции избирательной адсорбции битума снижает загрязнение атмосферы токсичными легкими битумными фракциями в черте населенных пунктов.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (с изменениями от 12 мая 2018 года). - М.: Правительство РФ, 2008. - 267 с.
2. Российская Федерация. Федеральный закон. "Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 08.11.2007 N 257-ФЗ (с изменениями на 2 июля 2021 года). [федер. закон: принят Гос. Думой 18 октября 2007 г.: по состоянию на 21 июля 2021 г.]. - М.: Кремль, 2007.- 63 с
3. ОДМ 218.3.087-2017. Рекомендации по применению асфальтобетонных смесей на основе металлургических шлаковых материалов для условий Центрального федерального округа. - М.: Информавтодор, 2020. - 35 с.
4. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги. - М.: ЗАО "ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ", 2021. - 94 с.
5. ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. - М.: Стандартинформ, 2019. - 50 с.
6. ГОСТ 9128-2009 Смеси дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия. - М.: Стандартинформ, 2010. - 18 с.

7. ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие (с изменениями от 01.06.1996 года). - М.: Изд-во стандартов, 1991. - 77 с.
8. ОДН 218.046.01. (взамен «Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83»). Проектирование нежестких дорожных одежд. - М.: Информавтодор, 2001. - 146 с.
9. Еремин В.Г., Волокитина О.А. Метод определения расчетных характеристик конструктивных слоев нежестких дорожных одежд // Вестн. Томск. гос. арх.-стр. ун-та. – 2010. – № 3 (28). – С. 228-234.
10. Еремин А.В. Волокитина О.А. Метод оценки прочностных и деформационных характеристик конструктивных слоев дорожных одежд // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1 (17). – С. 152-157.

References

1. Order of the Government of the Russian Federation. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 (as amended on May 12, 2018). M.: Government of the Russian Federation, 2008. 267 p.
2. Russian Federation. The federal law. "On highways and road activities in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" dated 08.11.2007. N 257-FZ (as amended on July 2, 2021). [Federal law: adopted by the State Duma on October 18, 2007: as of July 21, 2021]. M.: Kremlin, 2007. 63 p.
3. ODM 218.3.087-2017. Recommendations for the use of asphalt concrete mixtures based on metallurgical slag materials for the conditions of the Central Federal District. M.: Informavtodor, 2020. 35 p.
4. Set of rules 34.13330.2021. Highway transportation facilities. M.: CJSC "PROMTRANS-NIIPROEKT", 2021. 94 p.
5. Federal Standard 9128-2013. Mixes asphalt concrete, polymer asphalt concrete, asphalt concrete, polymer asphalt concrete for highways and airfields. M.: Standartinform, 2019. 50 p.
6. Federal Standard 9128-2009. Road, airfield and asphalt concrete mixtures. Technical conditions. M.: Standartinform, 2010. 18 p.
7. Federal Standard 22245-90. Oil road viscous bitumen (as amended on 01.06.1996). M.: Publishing house of standards, 1991. 77 p.
8. ODN 218.046.01. (instead of "Instructions for the design of non-rigid pavements. VSN 46-83"). Design of non-rigid road pavements. M.: Informavtodor, 2001. 146 p.
9. Eremin V.G., Volokitina O.A. Method for determining the design characteristics of structural layers of non-rigid road pavements. Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. No. 3(28). 2010. Pp. 228-234.
10. Eremin A.V. Volokitina O.A. Method for assessing the strength and deformation characteristics of structural layers of road pavements. Scientific Bulletin of the Voronezh State Architectural and Construction University. Construction and Architecture. 2010. No. 1(17). Pp. 152-157.

**DESIGNING STRUCTURES OF RIGID ROAD CLOTHING
WITH THE APPLICATION OF METALLURGICAL BY-PRODUCTS
INDUSTRY FOR DISTRIBUTION R
ROADS OF REGIONAL SIGNIFICANCE**

A. V. Yeregin¹, O. A. Volokitina², N. Yu. Alimova³

Voronezh State Technical University^{1,2,3}
Russia, Voronezh

¹PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Designing Highways and Bridges,
Tel.: +7(910)3469587, e-mail: bora.av@mail.ru

²PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Designing Highways and Bridges,
Tel.: +7(910)3497256, e-mail: dixi.o@mail.ru

³PhD of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design of Highways and Bridges,
Tel.: +7(920)4051025, e-mail: natalimowa@ya.ru

Problem statement. To develop formulations of slag asphalt concrete mixtures with an optimal bitumen content, to study their physical and mechanical properties, and, on the basis of the results obtained, to identify the advantages and substantiate the integrated use of metallurgical industry waste at the stage of designing pavement structures.

Results. The tests of samples of materials of structural layers in laboratory conditions were carried out, an assessment of the physical-mechanical and strength characteristics was given based on the determination of the actual modulus of elasticity by layer-by-layer measurement of the deflections of the pavement in the experimental section.

Conclusions. The obtained research results indicate the possibility of using slag materials in the composition of various layers of non-rigid pavement at the design stage of the structure. The advantages of using slag materials in the process of building highways by reducing the cost of materials and in the process of operation from the standpoint of safety and environmental friendliness are revealed.

Keywords: road, structural layer, slag materials, physical and mechanical properties, performance.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. К рассмотрению принимаются научные статьи общим объемом от 8 до 16 страниц. Материал статьи следует представить в редакцию в электронном и печатном виде.

2. Формат страницы – А4. Поля: верхнее – 2, нижнее – 3, правое и левое – 2 см.

Шрифт текста – Times New Roman с одинарным интервалом. Размер шрифта основного текста – 12 пт. Аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, информация об авторах – 10 пт. Абзацный отступ – 1,25 см.

3. Структура статьи:

3.1. УДК (приводится в левом верхнем углу);

3.2. Название статьи (шрифт – 12 пт., жирный);

3.3. Имя, отчество, фамилия автора (-ов);

3.4. Сведения об авторе(-ах): ученая степень, ученое звание, занимаемая должность, место работы, город, контактная информация;

3.5. Аннотация (основная информация о статье и полученных результатах исследования; требуемый объем аннотации – от 100 до 250 слов);

3.6. Ключевые слова (основные понятия, рассматриваемые в статье);

3.7. Текст статьи;

3.8. Библиографический список (на русском и английском языках);

3.9. Пункты 3.2–3.6 на английском языке. Предлагаемый перевод должен полностью соответствовать тексту на русском языке;

3.10. Сведения о финансировании (если есть).

4. Основной текст статьи должен быть структурирован (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.).

5. Рисунки и таблицы располагаются по мере их упоминания в тексте. Рисунки в виде ксерокопий из книг и журналов, а также плохо отсканированные не принимаются.

6. Ссылки на литературу в статье указываются в квадратных скобках (например, [1]).

Библиографический список приводится в конце статьи (по порядку упоминания в тексте) и оформляется по ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Самоцитирование не более 30 %.

7. Для публикации статьи необходимо выслать на почтовый адрес редакции внешнюю рецензию. Обращаем внимание авторов на то, что наличие внешней рецензии не отменяет внутреннего рецензирования и не является основанием для принятия решения о публикации.

8. Все представленные в редакцию материалы проверяются в программе «Антиплагиат». Автор несет ответственность за научное содержание статьи и гарантирует оригинальность представляемого материала.

9. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописи.

ПО ВСЕМ ВОПРОСАМ,
СВЯЗАННЫМ С ПУБЛИКАЦИЕЙ СТАТЕЙ, ОБРАЩАТЬСЯ:

главный редактор – Сафронов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, проф.,
зам. главного редактора – Козлов Владимир Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, проф.,
ответственный секретарь – Габриелян Грайр Егишеевич, канд. техн. наук, доцент.

Почтовый адрес редакции: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, ком. 2211.
Тел./факс: +7(473)271-52-30, e-mail: vss22@mail.ru.